

# Zur Leistungsfähigkeit, korrekten Anwendung und Kontrolle von EDV-Programmen für die Berechnung räumlicher Stabwerke im Stahlbau (Teil 1)

Räumliche Stabwerke aus Stahl werden in der Regel mit Hilfe von Statik-Programmen berechnet, die auf einer baustatischen Theorie zweiter oder höherer Ordnung basieren. Im vorliegenden Beitrag wird unter besonderer Berücksichtigung der Ersatzimperfektionen geklärt, ob diese vereinfachten Theorien ausreichen und welche Erweiterungen erforderlich sind, um in allen Fällen für die Baupraxis hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen. Für Programm-Hersteller und -Nutzer werden einfache Systeme angegeben, an denen die grundsätzliche Leistungsfähigkeit eines Statikprogramms mit geringem Aufwand überprüft werden kann. Ferner werden Hinweise zur korrekten Anwendung von Statikprogrammen gegeben.

**On performance, correct use and control of computer programs for structural analysis of three-dimensional steel frameworks.** *Structural analysis of three-dimensional steel frameworks is normally carried out by means of computer programs based on second or higher order theory. The present article classifies under special consideration of equivalent imperfections, whether these simplified theories are adequate or if additional terms are necessary to obtain sufficiently accurate results in practical engineering in any case. For software producers and users, several simple examples are presented, in order to demonstrate the general performance of a software. Furthermore important hints are given for the correct use of computational software developed for statical framework calculation.*

## 1 Einleitung

Die statische Berechnung eines Tragwerks ist heutzutage ohne die Nutzung eines der zahlreichen Stabwerksprogramme undenkbar. Wie allseits bekannt, werden Auswahl und Anwendung eines Programms jedoch häufig mehr oder weniger ohne kritische Prüfung der Leistungsfähigkeit der Programme und der Genauigkeit der Ergebnisse durchgeführt. Hierbei stellt sich bei einem kritischen Anwender nicht selten das Gefühl einer gewissen Hilflosigkeit ein, da eine irgendwie geartete Kontrolle des als „Black Box“ empfundenen Programmsystems unmöglich erscheint. Schlimmer noch: Wer sich als sorgfältiger Nutzer intensiver mit den Handbüchern und bei weitergehenden Fragen mit der Hotline des Herstellers auseinandersetzt, kann in manchen Fällen den Eindruck ge-

winnen, dass auch die Programmverfasser nicht immer auf dem erforderlichen Kenntnisstand sind oder dass wirtschaftliche Interessen im Vordergrund stehen. Diese Kritik soll nicht als böswillig verstanden werden: Viele Mitarbeiter der Hotlines sind in vorbildlicher Weise bemüht, den Anwendern bei der Lösung der Probleme behilflich zu sein, und die Mehrzahl der Hersteller hat die vorliegenden Untersuchungen konstruktiv unterstützt.

Der folgende Beitrag soll Anwendern und Herstellern einfache Hilfsmittel und Beispiele an die Hand geben, die eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Programmen zur Berechnung schlanker Stahlstabwerke im Rahmen der Elastizitätstheorie und eine Kontrolle der Ergebnisse ermöglichen. Darüber hinaus werden einige für den „Berechnungsalltag“ wichtige Grundlagen geklärt

sowie die Frage erörtert, ob eine Theorie zweiter oder höherer Ordnung (im Folgenden „Th.II.O.“ bzw. „Th.III.O.“) bei räumlichen Systemen für baupraktische Anwendungen hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

Um jedem Nutzer eine möglichst einfache Überprüfung des von ihm verwendeten Stabwerksprogramms zu ermöglichen, werden im Folgenden die Probleme auf ihre Grundzüge reduziert. Es wird vorausgesetzt, dass die Querschnitte doppelt symmetrisch sind und die Lasten im Schwerpunkt (hier gleich Schubmittelpunkt) eingeleitet werden. Das Eigengewicht der Konstruktion wird bei allen Beispielen vernachlässigt. Auf die nach [1] beim Verfahren Elastisch-Elastisch zulässige Abminderung der Ersatzimperfektionen um 1/3 wird verzichtet.

Bei einigen Beispielen werden zusätzlich auch die Auswirkungen der Schubverformungen und der Wölbkrafttorsion angegeben.

## 2 Varianten der Elastizitätstheorie II. und III. Ordnung; exakte Stabtheorie; EDV-Programme

Für die Berechnung der Schnittgrößen eines Stahltragwerks können nach DIN 18800 [1] verschiedene Methoden angewandt werden. Als ein besonders günstiger Weg zur Berechnung der statischen Größen hat sich die Theorie II. Ordnung erwiesen, da hierbei in einem einzigen Berechnungsgang auch das Biegeknicken erfasst werden kann [2].

Die „baustatische“ Elastizitätstheorie II. Ordnung ist in der umfangreichen Literatur für ebene Systeme ausführlich beschrieben [6], [7]. Der Zusatz „baustatisch“ soll darauf hin-

weisen, dass es sich hierbei nicht um eine mathematisch eindeutig beschriebene Theorie handelt, etwa in dem Sinn, dass nichtlineare Beziehungen in Reihen entwickelt und diese nach dem quadratischen Glied abgebrochen werden. Entsprechend ist auch der von den Programmherstellern gegebene Hinweis auf eine „Th.III.O.“ einzuschätzen: Es werden zwar nichtlineare geometrische Zusammenhänge genauer berücksichtigt; der Anwender kann jedoch weder die Qualität der Umsetzung noch die Relevanz der Ergebnisse ohne weiteres überprüfen. Die Begriffe „Th.II.O.“ und „Th.III.O.“ sind nicht eindeutig definiert; zudem wird das Kürzel „Th.III.O.“ häufig auch für Programmbausteine zur Berechnung von Seilen verwendet.

Die bisher an ebenen Systemen gemachten Erfahrungen verleiten zu dem Schluss, dass die üblichen Vereinfachungen der baustatischen Th.II.O. bei der Beschreibung der Verformungsgeometrie im Rahmen der in der Baustatik auftretenden Probleme generell zulässig sind. Diese positiven Erfahrungen mit der Th.II.O. bei ebenen Systemen werden häufig ohne grundlegende Untersuchungen auf die Berechnung räumlicher Stabwerke übertragen und in der Praxis kaum hinterfragt. So basiert eine große Anzahl der EDV-Programme auf den weiter unten beschriebenen Varianten, die im Folgenden mit Th.II.O.-S bzw. Th.II.O.-M bezeichnet werden.

Für die Deutung der Ergebnisse ist es notwendig, zunächst eine Systematik für die Einordnung der verschiedenen Stabwerksprogramme zu definieren.

**Th.II.O.-S (S wie „small“)**

Es werden nur die Zusatzmomente  $\Delta M_y$  und  $\Delta M_z$  infolge der Normal-

kräfte und der elastischen Verschiebungen berücksichtigt; das Biegeknicken kann erfasst werden. Torsionsmomente werden wie in der Th.I.O. berechnet; der Einfluss der elastischen Verschiebungen auf die Torsions-Hebelarme wird vernachlässigt. Viele der in der Praxis verwendeten Programme basieren auf dieser Näherungsstufe.

**Th.II.O.-M (M wie „medium“)**

Neben den Zusatzmomenten  $\Delta M_y$  und  $\Delta M_z$  wie in der Th.II.O.-S werden auch Änderungen  $\Delta M_x$  des Torsionsmomentes infolge der Querkräfte und der elastischen Verschiebungen berücksichtigt (Bild 1), die besonders bei offenen Querschnitten wie z. B. H-Walzträgern wegen deren geringer Torsionssteifigkeit zu einer erheblichen Vergrößerung der Verformungen und zu einer Umlagerung und Vergrößerung von Schnitt- und Verformungsgrößen führen können. Auch hier kann nur das Biegeknicken erfasst werden, nicht z. B. das Biegedrillknicken.

**Th.III.O.**

Außerdem sind Programme auf dem Markt, die zusätzlich zu den Merkmalen der Th.II.O.-M weitere Einflüsse auf das nichtlineare Systemverhalten berücksichtigen. Hierbei gibt es eine große Variationsbreite der Möglichkeiten von einer (nicht verbindlich definierten) „Theorie III. Ordnung“ bis hin zu exakten (Stab-) Theorien, wie sie z. B. in den Programmen ABAQUS und S3D [3] umgesetzt sind.

**Exakte Stabtheorie und Referenzprogramm**

Die – im Rahmen der getroffenen Annahmen – exakte geometrisch nichtlineare Stabtheorie ist in [5] für mäßige

und in [3] für große Verdrehungen im Überblick dargestellt; sie ist Grundlage des nicht-kommerziellen Programms S3D, das als Referenzprogramm für die folgenden Beispiele dient. Das Programm S3D wurde an zahlreichen Beispielen überprüft, die u. a. sehr große Verformungen, Probleme der Wölbkrafttorsion und Stabilitätsprobleme wie das Biegedrillknicken (BDK) betreffen [3] bis [5]. Zusätzlich wurden das Beispiel „Druckriegel“ (Bild 3) mit dem Programm ABAQUS und weitere Beispiele mit NASTRAN NX und ABAQUS z. T. auch mit verschiedenen Elementtypen (Stab-, Volumen-, Schalenelementen) gegengerechnet, so dass die im Folgenden als „exakt“ bezeichneten Ergebnisse als gesichert angesehen werden können. Auf den insbesondere bei schlanken Stäben häufig vernachlässigbaren Einfluss der Schubverformungen, die in S3D nicht implementiert sind, wird bei der Diskussion der Ergebnisse des ersten Beispiels genauer eingegangen (vgl. Tab. 5).

In Bild 2 wird dargestellt, welche anschauliche Bedeutung die einzelnen Terme eines Potentials haben können. In der Th.II.O.-S werden lediglich die unterstrichenen Summanden verwendet. Bereits aus der großen Zahl der weiteren Terme, die bei räumlichen Stabwerken mindestens berücksichtigt werden müssen, ist zu erkennen, dass Erfahrungen und Schlussfolgerungen, die im Rahmen der Th.II.O. an ebenen Problemen gewonnen wurden, keinesfalls auf räumliche Probleme übertragen werden dürfen.

Exemplarisch für die intensive Kopplung aller Schnitt- und Verformungsgrößen bei räumlichen Stabwerken selbst bei einer Theorie kleiner Verformungen soll die zweite Zeile des Potentials in Bild 2 näher betrachtet werden. Sie beschreibt den Einfluss der Normalkraft auf den Torsionsdrehwinkel  $\vartheta$  (im Folgenden wie auch in vielen EDV-Programmen als  $\phi_x$  bezeichnet), der sich bei Druck vergrößert und bei Zug verringert. Bei einer Vernachlässigung dieser Terme wird z. B. das Drillknicken nicht erfasst (Beispiele s. Abschn. 6). Entsprechend könnte das Biegeknicken nicht berechnet werden, wenn in Zeile 1 des Potentials der Summand mit  $v^2$  bzw.  $w^2$

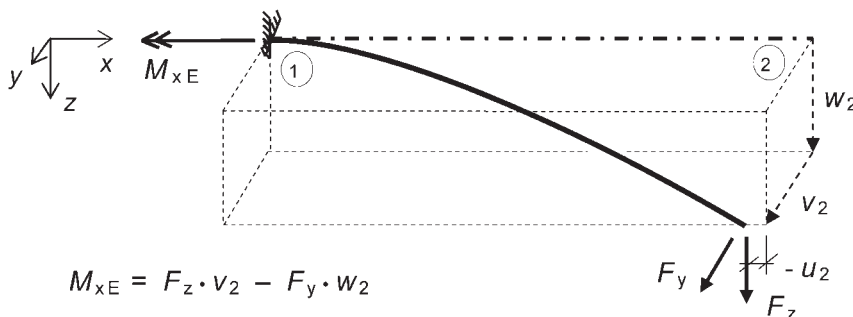


Bild 1. Einfluss der Durchbiegungen  $v$  und  $w$  auf das Torsionsmoment  $M_{xE}$   
 Fig. 1. Effect of deflections  $v$  and  $w$  to the torsional moment  $M_{xE}$

Potenzial der inneren Kräfte	interpretierbar als Arbeit von
$\frac{1}{2} EA \int_0^L \left\{ u_s' \left[ u_s' + v'^2 + w'^2 + 2g'(z_M v' - y_M w') + i_M^2 g'^2 \right] + i_z^2 v'' (v'' - 2w'g' - r_{My} g'^2) + i_y^2 w'' (w'' + 2v'g' - r_{Mz} g'^2) + \frac{I_\omega}{A} g''^2 + \frac{1}{A} \int_A \omega (y^2 + z^2) dA g'' g'^2 \right\} dx$	$N = EA u_s'$ $N = EA u_s'$ $M_z = -EA i_z^2 v''$ $M_y = -EA i_y^2 w''$ $M_\omega = -EI_\omega g''$ nichtlin. Wölbanteilen
$+ EA \int_0^L \left\{ \frac{1}{2} i_\phi^2 g'^2 - i_z^2 v''' w' g' + i_y^2 w''' v' g' \right\} dx$	$M_x = GI_T g'$ $Q_{12} = -EA i_z^2 v'''$ $Q_{13} = -EA i_y^2 w'''$
unterstrichene Terme: Th.II.O.-S Das dargestellte Potenzial gilt für kleine Verschiebungen und Verdrehungen (in [3] als „Kinematoren“ bezeichnet). Im Programm S3D werden von den (beliebig großen) Gesamt-Kinematoren die Starrkörper-Kinematoren abgespalten. Die verbleibenden Relativ-Kinematoren können durch Elementverfeinerung beliebig klein gehalten werden, so dass mit dem obenstehenden Potenzial die Formänderungsenergie des Elements vollständig beschrieben wird, wenn anstelle der Verschiebungen $v, w, g$ usw. die Relativkinematoren $\Delta v, \Delta w, \Delta g$ usw. eingesetzt werden. Weiteres s. [3], Abschnitt 3.1. Der Torsionsdrehwinkel $g$ wird im Folgenden wie auch in vielen EDV-Programmen mit $\phi_x$ bezeichnet.	

Bild 2. Potenzial der inneren Kräfte (nach [3])  
 Fig. 2. Potential energy of internal forces (acc. to [3])

fehlte. Ferner wird in Tab. 4 dargestellt, welche unerwartet große Auswirkung allein der letzte Summand in Zeile 2 des Potenzials auf die numerischen Ergebnisse des ersten Beispiels hat.

Im Rahmen der Forschungsergebnisse zu [3] wird belegt, dass die Abschätzung der Größenordnung von Potenzial-Anteilen, wie sie in zahlreichen Herleitungen zu finden sind, kein ausreichendes Kriterium für die Vernachlässigbarkeit eines Terms darstellt.

**EDV-Programme**

Für den Test wurden insgesamt 11 kommerzielle räumliche Stabwerksprogramme (P1 bis P11) von sieben Herstellern verwendet, wobei die Programme P7 bis P11 auf der einfachsten Variante Th.II.O.-S, die Programme P5 und P6 auf der Erweiterung Th.II.O.-M basieren. Die Programme P1 bis P4 enthalten zu-

sätzliche geometrisch nichtlineare Terme („Th.III.O.“). Die Wölbkraft-torsion kann außer vom Referenzprogramm S3D nur von P4 berücksichtigt werden (Tab. 1).

Neben der einem Programm zugrunde gelegten Theorie und deren Umsetzung wird die Güte der Ergebnisse zusätzlich von den verwendeten

Tabelle 1. Übersicht über die getesteten Programme  
 Table 1. Overview of the checked programs

Leistungsfähigkeit	Programm	Charakteristik	
↓     (+)	P7 – P11	Th.II.O. – S	erfasst nur das Biegeknicken; nicht das Drill- und Biegedrillknicken, keine Wölbkrafttorsion
	P5, P6	Th.II.O. – M	
	P2, P3	„Th.III.O.“	
	P1	„Th.III.O.“	keine Wölbkrafttorsion, aber stets mit Schubverformungen
	P4	„Th.III.O.“	Schubverformungen und Wölbkrafttorsion können zusätzlich erfasst werden

mathematischen Lösungsverfahren beeinflusst. Auch aus diesem Grund können die Ergebnisse von Programmen, die auf der gleichen Theorie basieren, unterschiedlich ausfallen.

Eine weitere Ursache für ungenaue oder falsche Ergebnisse können auch Programmierfehler sein. In den Programmen P3 und P6 wurden ursprünglich die Gleichgewichtsbedingungen für Torsion (z. B. am Kragarm nach Bild 8) nicht erfüllt. Dieser Fehler wurde durch die vorliegenden Untersuchungen aufgedeckt und mittlerweile vom Hersteller beseitigt. Im Programm P1 wird die für den Riegel nach Bild 3 zu erfüllende Symmetriebedingung bei den Torsionsmomenten verletzt (s. Anm. unter Tab. 2 und 3). Der Hersteller arbeitet an der Verbesserung des Programms.

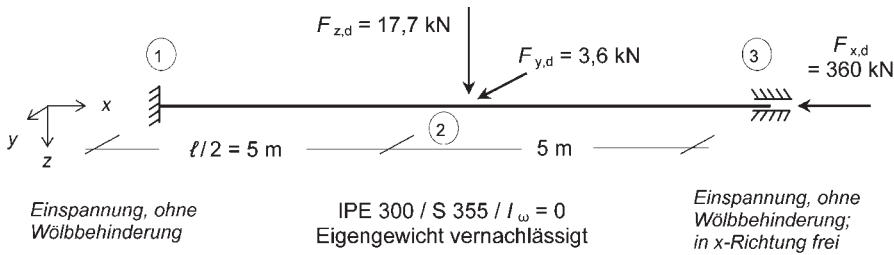
**Hinweis zur Finite-Element-Methode (FEM)**

Fast alle modernen Stabwerksprogramme nutzen die Methode der Finiten Elemente. Die FEM kann selbstverständlich mit Stabtheorien unterschiedlicher Genauigkeit (z. B. auch mit der Th.I.O.) verbunden werden und verschiedene Elementtypen verwenden. Das Etikett „FEM“ darf also nicht als Garant für ein außergewöhnlich leistungsfähiges Programm und für besonders gute Ergebnisse missverstanden werden.

**3 Gegenseitige Beeinflussung aller statischen Größen**  
**3.1 Druckriegel**

Bei dem für den ersten Test verwendeten System handelt es sich um einen beiderseits eingespannten Druckstab mit planmäßiger Biegung um die starke Achse (Bild 3). Aus

**a) Variante 1**



**b) Variante 2**

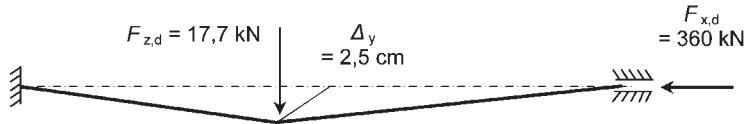


Bild 3. Druckriegel, a) mit Ersatzlast  $F_{y,d}$ , b) mit geometrischer Ersatzimperfektion  $\Delta_y$   
 Fig. 3. Beam column, a) with equivalent load  $F_{y,d}$ , b) with equivalent geometrical imperfection  $\Delta_y$

den Knicklängen  $s_{Ky} = s_{Kz} = \ell/2$  und den Trägheitsradien des Walzprofils IPE 300 ergeben sich die Schlankheiten  $\lambda_y = 40$  und  $\lambda_z = 149$ . Ferner ergibt sich für die Biegeknicklasten  $N_{Ki,y,d} = 6301$  kN und  $N_{Ki,z,d} = 455$  kN.

Die das Biegedrillknicken (BDK) beschreibenden Größen wurden mit dem Programm S3D ermittelt. Unter Berücksichtigung des Wölbflächenmoments  $I_\omega$  ergibt sich mit  $N = 0$  für das ideale BDK-Moment  $M_{Ki,y,d} = 87,8$  kNm und  $\lambda_M = 1,25$ . Die entsprechenden Werte für  $I_\omega = 0$  sind  $M_{Ki,y,d} = 77,0$  kNm und  $\lambda_y = 1,33$ . Unter Berücksichtigung der gleichzeitig wirkenden Druckkraft liefert S3D einen Verzweigungslastfaktor für BDK ( $M_y$  mit  $N$ ) von 1,1 (bezogen auf das Designlast-Niveau) bzw. von 1,7 (bezüglich des Gebrauchslast-Niveaus).

Diese Werte wie auch die weiter unten berechneten Werte der Verformungen infolge der Bemessungslasten liegen im baupraktisch relevanten Bereich.

Die nach [1] zu berücksichtigenden Imperfektionen werden in der ersten Variante vereinfacht mit  $N_d/200 = 1,8$  kN je Stab angesetzt, woraus sich insgesamt eine horizontale Ersatzlast  $F_{y,d} = 3,6$  kN in Feldmitte ergibt. In der zweiten Variante wird statt dieser Ersatzlast eine äquivalente geometrische Imperfektion  $\Delta_y = 0,5 \ell/200 = 2,5$  cm des Knotens 2 berücksichtigt. In beiden Varianten werden somit auch die nach [1], El 202, letzter Satz, geforderten Ersatzimperfektionen für das Bie-

gedrillknicken von der Tendenz her abgedeckt. Um eine einfache Kontrolle der Ergebnisse zu ermöglichen, wird auf den Ansatz einer Vorkrümmung verzichtet und das Eigengewicht des Trägers vernachlässigt.

**3.2 Diskussion der Ergebnisse**

Die Ergebnisse sind in Bild 4 und den Tabellen 2 und 3 dargestellt. Nach den Ergebnissen der Programme P7 bis P11, die auf der Th.II.O.-S basieren, ist das System gemäß Verfahren Elastisch-Elastisch (E-E) tragsicher, während die exakte Berechnung eine Spannungsüberschreitung von 22 % ergibt. Betrachtet man die Spannungen getrennt nach den zugehörigen Schnittgrößen, so fallen die Werte infolge der Einspannmomente  $M_y$  um 30 % und  $M_z$  um 17 % zu klein aus. Die für den Nachweis maßgebende Stelle verlagert sich außerdem von der Feldmitte zu den Einspannungen. Noch gravierender sind die Abweichungen bei den Verschiebungen  $u$ ,  $v$  und  $w$ . Hier sind die tatsächlichen Werte um 80 % bzw. 30 % bzw. 130 % größer als die von den Programmen P5 bis P11 ausgewiesenen Werte. Insgesamt wird also der tatsächliche Gleichgewichtszustand bei der Berechnung nach einer Th.II.O. völlig falsch wiedergegeben.

Besonders aufschlussreich sind die Ergebnisse für das Torsionsmoment, das für die System-Variante 1 bei den Programmen P7 bis P11 identisch null ist, da die elastischen He-

belarme der Querkräfte nicht berücksichtigt werden. Bei Variante 2 ergibt sich infolge des in  $y$ -Richtung verschobenen Knotens 2 bereits im unverformten Zustand ein planmäßiger Torsions-Hebelarm der Knotenlast  $F_z$ , der deshalb genau wie bei Th.I.O. ein (geringes) Torsionsmoment erzeugt. Die weitere Richtungsänderung der Stabsehne und die zusätzliche Verschiebung des Knotens infolge der Verformungen bleiben jedoch unberücksichtigt, so dass das Torsionsmoment ungefähr um den Faktor 9 zu klein ausfällt.

In der Th.II.O.-M werden bei den Hebelarmen der Querkräfte die Verformungen  $v$  und  $w$  berücksichtigt. Die Programme P5 und P6 liefern deshalb hinsichtlich der Torsion deutlich bessere Werte, während die Ergebnisse für andere Größen auch hier teilweise beträchtlich von den Referenzwerten abweichen (Bild 4), ein Hinweis darauf, dass bei räumlichen Systemen weitere Zusatzterme zu berücksichtigen sind [3].

Weiterhin ist anzumerken, dass bereits bei einem geraden Balken mit Doppelbiegung Torsionsmomente auftreten (s. Abschn. 7). Dieser Effekt wird nur dann erfasst, wenn die Nichtlinearität der geometrischen Beziehungen mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt wird (P1 bis P4).

Die aus der Linearisierung der geometrischen Beziehungen entstehenden Ungenauigkeiten sind besonders einfach in der Variante 1 an der Verschiebung des Knotens 3 in Richtung der Stabachse zu erkennen. Die Programme P5 bis P11 ermitteln diese Verschiebung allein aus der Stauchung der Stabachse infolge der Druckkraft  $N = -360$  kN:

$u = N\ell/(EA)_d = -3,5$  mm. Hierbei wird in der Reihenentwicklung für die Dehnung  $\epsilon = u' + 1/2(v'^2 + w'^2)$  nur der erste Summand  $u'$  berücksichtigt. Der Anteil der Verschiebung aus den weiteren Reihengliedern wird vernachlässigt, obgleich er im vorliegenden Beispiel mit  $6,1 - 3,5 = 2,6$  mm (s. Tab. 2, Variante 1) die gleiche Größenordnung aufweist wie das erste Reihenglied. Ganz überwiegend stammt dieser Anteil von 2,6 mm aus der Integration des zweiten Summanden  $1/2(v'^2 + w'^2)$  über die Stablänge und somit aus der (räumlichen) Neigung der Stabachse.

An diesem einfachen Beispiel ist zu erkennen, dass die Frage, welche Glieder einer Reihenentwicklung zu berücksichtigen sind, nicht einfach anhand der Potenz des jeweiligen Gliedes geklärt werden kann. In Tab. 4 ist dargestellt, welch großen Einfluss ein einzelner Term im Potenzial auf die Ergebnisse aufweisen kann, wobei es außerdem kaum möglich ist, vorab einzuschätzen, welche Größen besonders stark betroffen sein könnten. Im vorliegenden Beispiel sind dies neben dem Torsionsmoment überraschenderweise auch die Größen  $M_y$  und  $w$ .

Wegen der geringen Biegesteifigkeit um die z-Achse und der ebenfalls kleinen Torsionssteifigkeit lagern sich die Schnittgrößen von der Feldmitte zu den Einspannungen um. Sämtliche Schnitt- und Verformungsgrößen beeinflussen sich gegenseitig in erheblichem Maß. All diese Effekte werden von einer Th.II.O. nicht oder nur unzulänglich erfasst.

Wölbeffekte werden nur von den Programmen S3D und P4 berücksichtigt. Deshalb wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse eine Einspannung ohne Wölbbehinderung gewählt. Darüber hinaus bleibt bei den untersuchten Programmen auch das Wölbflächenmoment 2. Grades  $I_{\omega}$  des Walzprofils unberücksichtigt. Die mit S3D berechneten Referenzergebnisse wurden jedoch unter Berücksichtigung dieser tatsächlich vorhandenen Wölbsteifigkeit ermittelt. Wird S3D mit  $I_{\omega} = 0$  ausgewertet, so ergeben sich bereits bei 95 % des Lastniveaus (bezogen auf die Bemessungslasten) Torsionsverdrehungen von  $11,3^\circ$ . Bei einer weiteren Laststeigerung konvergiert die Berechnung bei dem in S3D verwendeten Lösungsalgorithmus nicht mehr. Die Fehler der nach Th.II.O. ermittelten Ergebnisse werden im Vergleich mit dieser Berechnungsvariante noch größer als in den Tabellen 2 und 3 dargestellt, was vor allem für den Torsionsdrehwinkel und das Torsionsmoment gilt.

Hieraus folgt, dass der Berechnung auch nach der in den Programmen P5 und P6 verwendeten genaueren baustatischen Th.II.O.-M einerseits ein zu steifes System zugrunde liegt, da die nichtlinearen geometrischen Beziehungen nicht bzw. nicht hinreichend genau

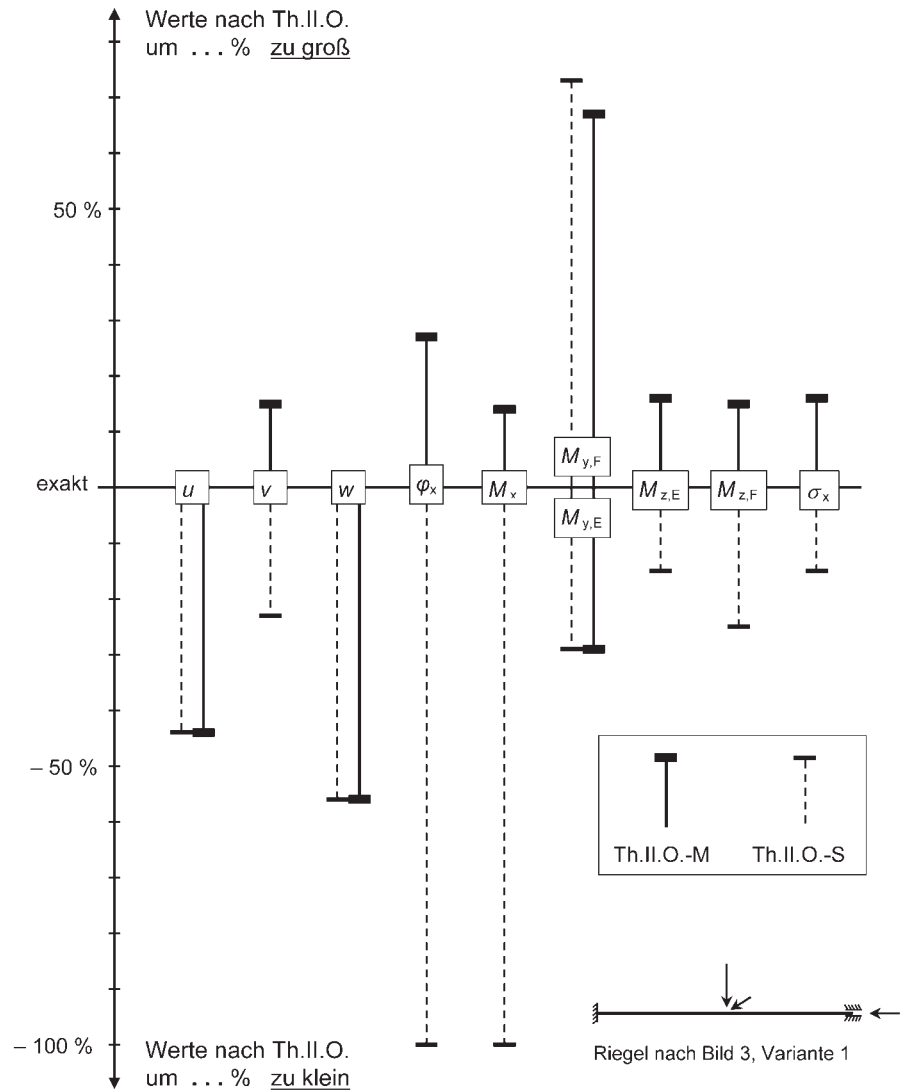


Bild 4. Vergleich der Ergebnisse nach Th.II.O. mit den exakten Werten (vgl. Tab. 2)  
Fig. 4. Relationship of the results according to second order theory with exact values (cf. tbl. 2)

Tabelle 2. Statische Größen für Variante 1 ( $H_y = 3,6 \text{ kN}$ )  
Table 2. Static quantities of variant 1 ( $H_y = 3,6 \text{ kN}$ )

Stat. Größe (mm, kNm)	exakt	„Th.III.O.“				Th.II.O.-M		Th.II.O.-S	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7 – P11	
min $u$	- 6,1	- 6,2	- 5,6	- 5,8	- 5,5	- 3,5	- 3,5	- 3,5	
max $v$	100	101	94	96,1	89	106	115	76 – 79	
max $w$	14,4	14,6	11,5	13,9	13,9	5,8	6,1	6,1 – 6,4	
max $\varphi$	7,8°	7,4°	5,9°	7,3°	5,2	7,8°	9,9°	0° – 0,5°	
$M_x$	Aufl.	1,12 / 0,60		0,81	1,22	0,63	0,82	1,01	0
	stabbez.	0,86							
$M_y$	Einsp.	- 32,6	- 31,2	- 29,5	- 30,7	- 32,7	- 22,5	- 23,1	± 23,2
	Feld	13,5	15,1	16,6	15,4	14,3	20,3	22,6	
$M_z$	Einsp.	- 22,0	- 22,3	- 21,4	- 21,5	- 20,6	- 23,9	- 25,7	± 18,4
	Feld	25,0	25,0	23,4	24,1	22,2	26,0	28,6	
Ausnutzung	Einsp.	122 %	124 %	118 %	119 %	116 %	126 %	132 %	103 %
	Feld	123 %	125 %	120 %	120 %	113 %	130 %	143 %	

Anm.:  $M_x$  (P1) = 1,12 / 0,60 am linken und rechten Lager ungleich trotz Symmetrie von System und Belastung

Tabelle 3. Statische Größen für Variante 2 ( $\Delta_y = 2,5 \text{ cm}$ )  
 Table 3. Static quantities of variant 2 ( $\Delta_y = 2,5 \text{ cm}$ )

Stat. Größe (mm, kNm)	exakt	„Th.III.O.“				Th.II.O.-M		Th.II.O.-S	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7 – P11	
min $u$	<b>-7,2</b>	-7,1	-6,5	-6,7	-6,4	-4,6	-4,6	-4,3	
max $v$	<b>101</b>	100	94	95	89	105	114	77 – 78	
max $w$	<b>17,4</b>	16,9	13,6	16,3	15,9	7,7	7,6	6,6 – 7,0	
max $\varphi$	<b>8,5°</b>	8,0°	6,6°	8,2°	5,8°	8,4°	10,5°	2,2° – 2,8°	
$M_x$	Aufl.	<b>1,12</b>	1,39 / 0,82	1,05	1,35	0,68	1,02	1,23	0,11 – 0,23
	stabbez.	<b>0,94</b>	0,93 / 1,27	0,89	(-)	0,68	0,89	1,11	0,11
$M_y$	Einsp.	<b>-36,2</b>	-34,0	-32,1	-33,7	-35,3	-25,1	-25,3	-24
	Feld	<b>10,6</b>	13,0	14,4	13,0	12,3	18,2	16,1	22,1 – 22,8
$M_z$	Einsp.	<b>-21,9</b>	-21,9	-21,2	-21,0	-20,3	-23,5	-25,1	-18,5
	Feld	<b>25,5</b>	25,0	23,5	24,0	22,2	25,9	28,6	18,3 – 19,4
Ausnutzung	Einsp.	<b>123 %</b>	124 %	121 %	118 %	117 %	126 %	132 %	103–106 %
	Feld	<b>123 %</b>	104 %	117 %	119 %	112 %	129 %	139 %	

Anm.:  $M_x$  (P1) = 1,39 / 0,82 bzw. 0,93 / 1,27 ungleich trotz Symmetrie von System und Belastung

berücksichtigt werden. Andererseits ist das statische Modell zu weich, da die Wölbsteifigkeit vernachlässigt wird. Diese beiden Ungenauigkeiten haben völlig verschiedene Ursachen und können sich deshalb prinzipiell nicht gegenseitig ausgleichen.

Die den meisten der getesteten Programme zugrunde liegende Theorie II. Ordnung ist für räumliche Stabwerke also **grundsätzlich** nicht geeignet, auch wenn sie für Systeme, die in allen Richtungen eine ungefähr gleichwertige Biegesteifigkeit

aufweisen und bei denen die Torsionsverformungen von untergeordneter Bedeutung sind, gute Ergebnisse liefern kann.

### 3.3 Einfluss der Schubverformungen

Da die Schubverformungen bei schlanken Stäben im Allgemeinen eine untergeordnete Rolle spielen, werden sie in vielen Programmen vernachlässigt. Der Hersteller des Programms P4 hat eine Vergleichsrechnung durchgeführt, deren Ergebnisse in Tab. 5 zusammengestellt sind. Im Durchschnitt ergeben sich Änderungen von 3 % bis 5 %, für einzelne Größen aber auch bis zu 18 %. Der Ausnutzungsgrad des Systems bleibt allerdings praktisch unverändert.

Da die Schubverformungen bei Stäben mit geringerem Schlankheitsgrad, aber auch z. B. bei Schwingungsuntersuchungen einen größeren Einfluss haben können, scheint es angeraten, die Berücksichtigung der Schubverformungen bei der Neugestaltung der Programme zumindest als Option vorzusehen.

Tabelle 4. Auswirkung des letzten Terms in Bild 2, Zeile 2 des Potentials (Druckriegel, Variante 1)  
 Table 4. Effect of the last term in Fig. 2, row 2 of the potential (beam column, variant 1)

Stat. Größe (mm, kNm)	exakt	Th.III.O. (P3)			
		Term ... $i_M^2 \vartheta'^2$ ..	Abweichung		
		ohne	mit		
min $u$	<b>-6,1</b>	-5,9	-5,8	+ 2 %	
max $v$	<b>100</b>	98,2	96,1	+ 2 %	
max $w$ (!)	<b>14,4</b>	5,9	13,9	<b>-58 % (!)</b>	
max $\varphi$	<b>7,8°</b>	7,5°	7,3°	+ 3 %	
$M_x$	<b>0,86</b>	0,8	1,22	<b>-34 %</b>	
$M_y$	Einsp.	<b>-32,6</b>	-22,9	-30,7	<b>-25 %</b>
	Feld	<b>13,5</b>	21,2	15,4	<b>+38 %</b>
$M_z$	Einsp.	<b>-22,0</b>	-22,2	-21,5	+ 3 %
	Feld	<b>25,0</b>	24,3	24,1	+ 1 %
Ausnutzung	Einsp.	<b>122 %</b>	118 %	119 %	- 1 %
	Feld	<b>123 %</b>	126 %	120 %	+ 5 %

Tabelle 5. Einfluss der Schubverformungen (Druckriegel, Variante 1)

Table 5. Effect of shear strains (beam column, variant 1)

Stat. Größe (mm, kNm)	exakt (ohne Schubverformungen)	Th.III.O. (P4)			
		Schubverformungen :		Abweichung	
		ohne	mit		
min $u$	<b>-6,1</b>	-5,5	-5,3	- 4 %	
max $v$	<b>100</b>	89	86,3	- 3 %	
max $w$	<b>14,4</b>	13,9	12,5	<b>-11 %</b>	
max $\varphi$	<b>7,8°</b>	5,2	4,4	<b>-18 %</b>	
$M_x$	<b>0,86</b>	0,63	0,62	- 2 %	
$M_y$	Einsp.	<b>-32,6</b>	-32,7	-31,4	- 4 %
	Feld	<b>13,5</b>	14,3	15,5	+ 8 %
$M_z$	Einsp.	<b>-22,0</b>	-20,6	-20,1	- 2 %
	Feld	<b>25,0</b>	22,2	21,5	- 3 %
Ausnutzung	Einsp.	<b>122 %</b>	116 %	115 %	- 1 %
	Feld	<b>123 %</b>	113 %	113 %	0

## Literatur

- [1] DIN 18800, Teil 2: Stahlbauten. Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken (November 1990).
- [2] Gensichen, V.: Zur praktischen Anwendung von DIN 18800 (11.90), Teil 1 und Teil 2. Bauingenieur 72 (1997), S. 393–403.
- [3] Lumpe, G.: Zur Stabilität und Biegetorsion großer Verformungen von räumlichen Stabwerken Bauingenieur 80 (2005), S. 169–177.
- [4] Stern, J.: Der Gelenkstab mit Vorverformung. Ing.-Arch. 54 (1984), S. 152–160.
- [5] Salzgeber, G.: Nichtlineare Berechnung von räumlichen Stabtragwerken aus Stahl. Heft 10, Inst. f. Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz 2000.
- [6] Rubin, H.: Das Drehwinkelverfahren zur Berechnung biegesteifer Stabwerke nach Elastizitäts- oder Fließgelenktheorie I. und II. Ordnung unter Berücksichtigung von Vorverformungen. Bauingenieur 55 (1980), S. 81–92.
- [7] Rothert, H., Gensichen, V.: Nichtlineare Stabstatik. Baustatische Methoden, Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer 1987.
- [8] Drees, Chr.: EDV-Modellierung des Tragsicherheitsnachweises eines weitgespannten zweifeldrigen Fachwerk-Hallenbinders unter Berücksichtigung der Schub- und Biegesteifigkeit der Dachscheibe. Diplomarbeit, FH Münster 2006.
- [9] Klävers, S.: Statische Berechnung einer weit gespannten Freiluft-Lagerhalle aus Stahl. Diplomarbeit, FH Münster 2006.
- [10] Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H. (Hrsg.): Stahlbauten: Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. 3. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn 1998.
- [11] Germanischer Lloyd: Tätigkeitsbericht 2003, S. 22–24.

### Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Volker Gensichen,  
Lehrgebiet Statik und Stahlbau,  
Fachhochschule Münster,  
Corrensstraße 25,  
D – 48016 Münster  
Prof. Dr.-Ing. Günter Lumpe,  
Lehrgebiet Stahlbau,  
Hochschule Biberach,  
Karlsruhe 9,  
D – 88400 Biberach

## Aktuell

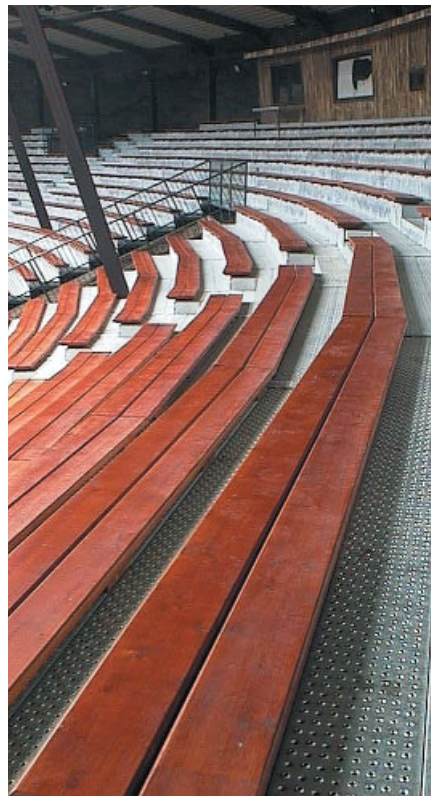
### Technische Regelwerke

#### Blechprofilroste: neue DIN-Normen geben Planungssicherheit

Die im August 2007 veröffentlichten Anforderungsnormen für Blechprofilroste DIN 24531-2 und DIN 24537-7 sind nach Angaben der Arbeitsgemeinschaft Blechprofilroste, dem Branchenverband für die Hersteller von Profilrosten aus Stahl mit Sitz in Hagen, inzwischen im Markt eingeführt und dienen überwiegend als Grundlage für die Konstruktion und Planung von Blechprofilrosten im Industrie- und Anlagenbau. Die DIN-Normen beschreiben Anforderungen für Blechprofilroste als Bodenbelag (DIN 24537-2) und als Stufen (DIN 24531-2), die in Anlagen der chemischen Industrie, der Automobilindustrie oder auch in Kraftwerken oder Abwasseranlagen eingesetzt werden. Je nach Einsatzbereich werden dabei Vorzugsmaße und Gewichte für schweißbaren Stahl, Edelstahl und Aluminium angegeben.

Bei Blechprofilrosten handelt es sich um umgekannte Bleche, die meist als C-Profile (seltener als U-Profile) ausgeführt sind, mit einem in der Regel größeren Verhältnis von Länge zu Breite. Im Sinne der Rutschhemmung ist die Oberseite der Profilroste profiliert. Die Normen für Blechprofilroste legen verschiedene Anforderungen an z. B. Korrosionsschutz, Werkstoffgüten (Stahl, Edelstahl und Aluminium)

sowie auch Rutschhemmung und Befestigung fest. Bei der Statik als Kernelement der Anforderungen wird Bezug auf die Güte- und Prüfbestimmungen RAL-GZ 639 verwiesen. Die Belastungstabellen nach RAL-GZ 639, die bereits 2001 veröffentlicht wurden, sind



Blechprofilroste dienen im Stadion als Bodenbelag auf der Tribüne

von den Mitgliedern der Gütegemeinschaft Blechprofilroste in der Arbeitsgemeinschaft Blechprofilroste erarbeitet worden. Blechprofilroste mit dem Gütesiegel RAL-GZ 639 entsprechen damit bereits seit sieben Jahren den statischen Anforderungen, die jetzt durch die veröffentlichte DIN verbindlich einzuhalten sind. Gleiches gilt für die einzuhaltenden Toleranzen bei der Ausführung der Roste, die 1:1 von der RAL-GZ 639 übernommen worden sind. Für die RAL-Gütegemeinschaft Blechprofilroste ist die Anpassung der DIN an die RAL-Güte- und Prüfbestimmungen als Erfolg zu werten. Darüber hinaus weist die DIN 24537-2 darauf hin, dass quadratische, aus Einzelrosten zusammengesetzte Elemente zu vermeiden sind, um das Verwechsellern der Profilausrichtung zu verhindern. Die statische Eigenschaft der Rostelemente ist nämlich nur dann gegeben, wenn die Elemente quer zur Tragstabrichtung aufliegen. Diese Anforderung entfällt naturgegeben dann, wenn eine allseitige Auflagerung der Rostelemente gegeben ist.

Bezüglich der Rutschhemmung verweisen die DIN-Normen auf die berufsgenossenschaftliche Richtlinie BGR 181. Die Rutschhemmung, die durch Aufmörtelung der Rostoberfläche erzielt wird, muss danach zwischen den Bewertungsgruppen R 9 und R 13 liegen. Weitere Informationen: Arbeitsgemeinschaft Blechprofilroste, Tel.: 02331/20080, Fax: 02331/200840