

# Fortschritte in Entwurf und Berechnung von Stahltragwerken

Autor(en): **Sedlacek, Gerhard**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht**

Band (Jahr): **12 (1984)**

PDF erstellt am: **15.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-12092>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

**Fortschritte in Entwurf und Berechnung von Stahltragwerken**

Developments in the Design of Steel Structures

Développements dans le projet et le calcul de constructions métalliques

**Gerhard SEDLACEK**  
Professor Dr.-Ing.  
RWTH Aachen  
Aachen, Fed. Rep. of Germany



Gerhard Sedlacek, geboren 1939, Studium TH Karlsruhe, Promotion TU Berlin, 8 Jahre Tätigkeit in der Stahlbauindustrie, zuletzt als Abteilungsleiter für Brückenbau, seit 1976 Professor für Stahlbau an der RETH Aachen.

**ZUSAMMENFASSUNG**

Anhand von Beispielen wird auf Entwicklungen und Tendenzen in Entwurf und Berechnung von Stahltragwerken eingegangen, wie sie sich auch in den neuesten ISO- und Eurocode-Entwürfen für die Bemessung und Berechnung von Stahltragwerken niederschlagen.

**SUMMARY**

The article presents, with examples, the developments and trends in the design of steel structures. It considers also the latest drafts of the ISO and Eurocode recommendations for the design of steel structures.

**RESUME**

L'article considère, à l'aide d'exemples, les développements et les tendances dans le projet et le calcul de constructions métalliques. Cette évolution se reflète également dans les projets les plus récents des normes ISO et Eurocode pour le projet et le calcul de constructions métalliques.



## 1. ALLGEMEINES

Die Sicherheitsnachweise für Stahltragwerke sind zur Zeit weltweit in Umstellung begriffen; von dem bislang verwendeten Verfahren der zulässigen Spannungen wird auf das sogenannte semiprobabilistische Verfahren mit getrennten Nachweisen für die Grenzzustände der Gebrauchsfähigkeit und der Tragfähigkeit umgestellt, und dabei werden die Grenzzustände und die dafür anzuwendenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen mit den zugehörigen Sicherheitskoeffizienten neu definiert.

Dies geschieht zum Zwecke der Harmonisierung des Nachweisformates über alle Bauweisen und Baustoffe hinweg und bietet für neue Bauweisen und Baustoffe den Vorteil einer vergleichbaren sicherheitsmäßigen Einordnung; es wird aber durch den Bezug auf eine definierte Zielzuverlässigkeit für die Tragfähigkeit und für die Gebrauchsfähigkeit auch beabsichtigt, die Bemessungssicherheit und die wirtschaftliche Ausnutzung des Materials im Sinne einer Konstruktionsoptimierung zu vergleichmäßigen. Schließlich wird durch ausdrückliches Offenlegen aller Gefährdungen und durch die Nachweise ihrer Begegnung eine sichere Entwurfsarbeit und eine bessere Baudurchführung angestrebt.

Die Umstellung auf das neue Nachweisformat ist durch die Arbeit einer Reihe internationaler technisch-wissenschaftlicher Verbände vorbereitet, die wichtige Berichte und Empfehlungen herausgegeben haben. Erste Entwürfe für internationale Standardempfehlungen für Stahlkonstruktionen erschienen bereits bei ISO und im Rahmen der Europäischen Gemeinschaften als Eurocodes. Diese internationalen Entwürfe sind naturgemäß umso allgemeiner gehalten, je mehr Mitgliedsstaaten mitwirkten; sie gehen häufig nationalen Normenarbeiten voraus und werden in Zukunft eine größere Vereinheitlichung der Vorgehensweisen bei Entwurf und Bemessung von Stahlkonstruktionen bewirken.

## 2. BESONDERE BEDINGUNGEN FÜR ENTWURFS- UND BEMESSUNGSREGELN IM STAHLBAU

Zunächst gilt als Feststellung, daß bei den meisten Bauaufgaben im Brücken- und Hochbau die Planung und die Realisierung als Stahlbau nicht mehr den Regel-, sondern mehr den Sonderfall darstellt, d. h. Consultings und Behörden haben relativ selten mit Stahlkonstruktionen zu tun. Es muß deshalb im Interesse des Stahlbaus liegen, die Entwurfs- und Berechnungsmethoden möglichst so an geläufige Methoden anzupassen und einfach darzustellen, daß Stahlbauten leicht von Ingenieuren entworfen und beurteilt werden können, die gewöhnlich mit Massivbauten zu tun haben. Ein hochspezialisierter Stahlbauingenieur ist in der Regel in Büros nicht vorhanden, und die Antwort von Consultings und Behörden auf ungewohnte, kompliziert erscheinende Entwurfs- und Bemessungsregeln würde sein, daß Stahl nur da eingesetzt wird, wo es nicht anders geht; die Bearbeitung von Alternativentwürfen in Stahl, die zu einer breiteren Anwendung führen sollen, würden erschwert.

Ein weiteres Argument für einfache und durchschaubare Regeln liegt in der Struktur der Stahlbauunternehmen. Dazu gehören häufig Klein- und Mittelbetriebe mit lokalem Marktfeld, die aus Wirtschaftlichkeitsgründen mit kleinem Entwurfsbüro arbeiten, das nicht mit übermäßigen Berechnungen blockiert werden kann. Natürlich müssen einfache Regeln sicher und wirtschaftlich sein und deshalb auf der Basis realitätsnaher und daher oft komplizierter Modelle entwickelt werden.

Aus diesen Bedingungen ergibt sich notgedrungen ein zweiseitiges Vorgehen bei der Entwicklung von Entwurfs- und Bemessungsregeln:

Auf der einen Seite geht es darum, für die Anwendung von Computern in der Entwurfsarbeit kompliziertere Modelle beliebiger Annäherung benutzen zu können, wie zum Beispiel Traglastmodelle Theorie 2.Ordnung mit Berücksichtigung elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens, wofür Vereinbarungen über die Rechen-

annahmen auf der Lastseite und auf der Widerstandsseite erforderlich sind, wie zum Beispiel

- Spannungs- und Dehnungslinie für der Stahl
- geometrische Imperfektionen inform von Schiefstellungen, Stabkrümmungen oder Vorbeulen
- Ansatz von Eigenspannungsfeldern
- Last-Verformungsverhalten von Anschlüssen.

Solche Modelle finden in der wissenschaftlichen Arbeit, zum Beispiel zum Studium von Phänomenen und zur Ableitung und Begründung einfacher Verfahren, aber auch zunehmend in der praktischen Anwendung, zum Beispiel bei Sondertragwerken mit besonderen Sicherheitsproblemen, und bei entsprechend schnell-laufenden guten Programmen auch in der breiteren Entwurfsarbeit Verwendung.

Auf der anderen Seite sind einfache, möglichst lineare oder quasilineare Modelle und Beziehungen für die normale Entwurfsarbeit notwendig; hierbei müssen die Anwendungsgrenzen definiert sein, und im Falle der Überschreitung müssen einfache Abschätzverfahren zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten anwendbar sein. Die Anwendung dieser vereinfachten Verfahren erstreckt sich vom Tischcomputer bis zur Handhabung mit kleinem Taschenrechner, und es sollte möglich sein, sozusagen aus der Aktentasche heraus einen Entwurf durchzuführen und zu kontrollieren.

### 3. ZUM TRAGFÄHIGKEITSNACHWEIS

#### 3.1 Zugstab

Grenzzustände der Tragfähigkeit zu definieren, kann selbst bei einem so einfachen Bauelement wie dem Zugstab zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Konventionell wird nicht die Bruchgrenze des Zugstabes als Grenzzustand definiert, sondern ein Zustand, der bei den üblichen Baustählen weit unterhalb der Bruchgrenze liegt (ca. 70 %), nämlich am Beginn erkennbarer plastischer Verformungen hervorgerufen durch Fließen. Ist der Zugstab gestört, zum Beispiel durch Löcher an den Anschlüssen, so sind die Bemessungs- und Detailierungsregeln so, daß immer das Fließen des Stabes gewährleistet ist, bevor an Störstellen Bruch auftritt. Diese als Duktilität bezeichnete besondere Eigenschaft von Stahlkonstruktionen kann als Bemessungsphilosophie auch auf Schraubverbindungen und Schweißverbindungen übertragen werden. Wenn es die Sicherheitsbedingungen verlangen oder besondere Duktilitätsanforderungen bestehen, zum Beispiel für die Energiedissipation für Erdbeben, können die Schrauben nicht nur für ausreichende Tragfähigkeit gegenüber den Anschlußkräften bemessen werden, die sich aus den rechnerischen Lasten ergeben, sondern derart, daß Fließen des Zugstabes immer gewährleistet ist, bevor die Schrauben brechen. Dies bedeutet nicht nur Einhaltung einer Mindestfließgrenze, sondern die Kenntnis der Höchstfließgrenze des Zugstabes.

#### 3.2 Druckbeanspruchte Bauteile

Die Festlegung der Tragfähigkeit von Druckstäben oder Biegeträgern mit druckbeanspruchten Teilen ist nicht am Spannungsdehnungsdiagramm des Kleinteilversuches, sondern an Bauteilversuchen im Maßstab 1 : 1 orientiert.

Die Versuche lieferten für die Grenzzustände zwei wichtige Größen: einmal die Werte der größten aufnehmbaren Last, der sogenannten Traglast, die durch verschiedene Stabilitätsphänomene begrenzt sein kann, wie zum Beispiel lokales Beulen, Biegeknicken oder Biegedrillknicken; zum anderen den Verformungsbereich, in dem das Bauteil die Traglast auf gleichem Niveau halten kann.

Aus der statistischen Analyse der gemessenen Größen der Traglast sind die cha-



rakteristischen Werte der Festigkeit ableitbar, zum Beispiel die Europäischen Knickspannungskurven. Indem man zusätzliche Sicherheitselemente in Form von Eigenspannungsverteilungen und/oder geometrischer Imperfektionen am statischen Modell des Stabes oder des Stabsystems einführte, konnten die gemessenen Festigkeitswerte auch rechnerisch als Grenzschnittgrößen des verformten Systems erklärt werden. Daraus hat sich die Möglichkeit entwickelt, Stabilitätsprobleme grundsätzlich nicht mehr durch Vergleich mit den theoretischen Verzweigungslasten, sondern realistischer durch Nachweis des Grenzzustandes für imperfekte Strukturen nach der Theorie 2. Ordnung (nicht linearem geometrischen Modell) zu lösen.

Die Einteilung der Stauchungsfähigkeit von Querschnitten auf dem Traglastniveau in verschiedene Klassen ist eine Hilfe für die Anwendung verschiedener Materialmodelle bei der Berechnung der Traglast; nämlich eines linearen Materialmodells, bei dem die Verformungen als elastisch unterstellt und eine Stauchung bis zur Beulgrenze oder bis in den Fließbereich zugelassen wird oder eines nicht linearen Materialmodells, bei dem aufgrund größerer Verformungsfähigkeit planmäßig Schnittgrößenumlagerungen aus Fließzonenausbreitungen, auch vereinfacht dargestellt als Wirkung von "Fließgelenken" berücksichtigt werden können.

Um der Praxis zu ersparen, jedes Problem mit nicht linearem geometrischem Modell (Theorie 2. Ordnung) berechnen zu müssen und um die Vorteile der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit infolge des Fließens auch ohne größeren Rechenaufwand in Anspruch nehmen zu können, sind Vereinfachungen vereinbart worden. Danach dürfen Stabwerke grundsätzlich nach Theorie 1. Ordnung berechnet werden, wenn nicht bestimmte Kriterien für die Horizontalsteifigkeit von Strukturen und Stabsteifigkeit von Stäben überschritten werden. Bei Überschreitung dieser Kriterien werden zusätzlich Näherungslösungen auf der Basis der Ergebnisse der Theorie 1. Ordnung angegeben.

Für Einzelstäbe sind Gebrauchsformeln für den Nachweis des Biegeknickens und Biegedrillknickens unter beliebiger Randbelastung abgeleitet worden, mit denen die aus Strukturen herausgeschnittenen Einzelstäbe nachgewiesen werden können und die sich auch für den Nachweis ganzer Strukturen eignen, wenn deren Verhalten auf das Verhalten von Einzelstäben zurückgeführt werden kann, zum Beispiel durch Knicklängen.

Besondere Bemessungsregeln sind zur Zeit noch häufig für Bauteile aus dünnwandigen kaltverformten Profilen und Blechen erforderlich, deren wirtschaftliche Bedeutung zunehmend wächst. Die Bemessung könnte in Zukunft mit Vorteil an die Bemessungsregeln für konventionelle Stabelemente aus Walzprofilen oder geschweißten Profilen angepaßt werden, und nur die zusätzlichen Versagensmodi für dünnwandige Elemente müßten getrennt berücksichtigt werden. Eine Vereinheitlichung der Nachweise für dünnwandige und nicht dünnwandige Bauteile würde auch die Beulnachweise für ausgesteifte und nicht ausgesteifte Blechfelder betreffen. Auf diesem Sektor gibt es eine Reihe verschiedenster Definitionen von Grenzzuständen und verschiedener Bemessungsmodelle.

### 3.3 VERBINDUNGSMITTEL UND VERBINDUNGEN

Eine weitgehende Anpassung der Regeln ist auch für die Bemessung von Verbindungsmitteln zu erwarten.

Das Tragverhalten von Schraubenverbindungen ist für Baustähle bis Festigkeiten ähnlich Fe 510 unter statischer Last genügend geklärt und die Regeln sind soweit entwickelt, daß Vereinfachungen zum Beispiel für Schraubenstellungen (Konzentration auf weniger verschiedene Materialgüten, Eingrenzung unterschiedlicher Klemmlängen durch Zulassung von Gewinde im Loch etc.) möglich sind. Besonders wichtig sind die erreichten Vereinfachungen der konstruktiven Detailierung von Schraub- und von Schweißverbindungen als "steifenlose Verbindungen" für statische Lasten und der entsprechenden Nachweise zum



Beispiel für Kopfplatten, Auflager- und Anschlußpunkte.

Für oft wiederholte Belastungen sind geschraubte und geschweißte Anschlußstellen als Störstellen des Kraftflusses hinsichtlich ihrer Betriebsfestigkeit zu untersuchen, wofür ein einfaches Festigkeitsmodell in Form der Europäischen Ermüdungslinien für verschiedene Kerbkategorien entwickelt wurde, das eine relativ einfache Betriebsfestigkeitsüberprüfung erlaubt. Hier werden in Zukunft Entwicklungen vor allem bei den Vereinfachungen der Belastungsbeschreibung zu erwarten sein.

Eine trendtypische Entwicklung stellen im Zusammenhang mit Verbindungen knotenblechfreie Fachwerkkonstruktionen mit Hohlprofilen dar, bei denen die wirtschaftliche steifenlose Ausbildung der geschweißten Knoten besondere Nachweise für statische und wiederholte Belastung erfordert, die für die Anwendung stark vereinfacht werden konnten. Typisch für wirtschaftliche Anschlußlösungen ist hierbei die Entfeinerung der Verbindungen durch Inkaufnahme von Exzentrizitäten der geometrischen Achsen (weg vom idealen Fachwerk) und ungleichmäßiger Steifigkeits- und Kraftverteilungen längs der Anschlußfugen.

### 3.4 KONTROLLEN

Das den Funktionszielen und Festigkeitsannahmen zugrunde gelegte Qualitätsniveau für die Ausführung von Strukturen, Bauelementen und von Anschlüssen wird durch Toleranzen für Imperfektionen und Defekte festgelegt, deren Einhaltung durch Kontrollen verschiedener Intensität nachgewiesen werden muß (Qualitätssicherung). Hier sind noch bessere Zusammenhänge zwischen Defekten und zugehöriger Festigkeit in Zukunft erwünscht.

### 4. ZUM GEBRAUCHSFÄHIGKEITSNACHWEIS

Während bei der Anwendung des früheren Bemessungsverfahrens mit zulässigen Spannungen häufig neben der Tragsicherheit auch eine ausreichende Gebrauchssicherheit sichergestellt war, sind infolge der Ausnutzung der Fließreserven in Querschnitten und Strukturen bei dem neuen Tragsicherheitsnachweis die Bedingungen für ordnungsgemäße Funktion nicht automatisch erfüllt.

Demzufolge ist die Erfüllung dieser Bedingungen auf dem Niveau der Gebrauchslasten gesondert nachzuweisen. Das bedeutet einen gewissen Mehraufwand. Der Gebrauchsfähigkeitsnachweis ist aber gerade für Stahlkonstruktionen, denen im Wettbewerb häufig nachgesagt wird, sie seien zu "weich", neigen zu Schwingungen etc., besonders wichtig und ist häufig für die Bemessung maßgebend. Die Gebrauchsbedingungen betreffen Funktionsaspekte, zum Beispiel Rissefreiheit von Einbauten in Hochbauten oder von Fahrbahnbelägen auf Brücken, oder Komfortbedingungen zum Beispiel bei Schwingungen von Gebäuden oder Gebäudeteilen, oder Freihalten von Rissen hervorgerufen durch Ermüdung oder auch optische Gesichtspunkte wie störende Verformungen, Atmen von Blechen etc.

Da Schäden an Bauwerken im wesentlichen Schäden sind, die unter Gebrauchsbedingungen auftreten, ist der Nachweis ausreichender Gebrauchstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit und damit geringer Unterhaltungskosten für den Bauherrn von besonderer Bedeutung. Er wird ähnlich wie im Massivbau auch im Stahlbau in Zukunft sicher zunehmend ins Blickfeld geraten, möglicherweise mit dem Ergebnis, daß nicht mehr immer der Tragsicherheitsnachweis primär geführt wird.

Die Konsequenzen für die Vereinfachung des Nachweiskonzeptes wären, bei der Definition von Gebrauchslasten und der Sicherheitsbeiwerte, mit denen aus den Gebrauchslasten die Grenzlasten für den Tragfähigkeitsnachweis gebildet werden, so vorzugehen, daß nach Möglichkeit die Durchrechnung von Systemen auf einem Niveau, zum Beispiel dem Gebrauchslastniveau genügt, um damit die Konsequenzen für das zweite Niveau, z. B. das Grenzlastniveau, schnell übersehen zu können.

**LITERATURVERZEICHNIS**

1. ISO/TC 167 / SC 1 - Working Draft, 1983
3. Eurocode 3 - Draft July 1983
3. European Recommendations for Steel Construction, 1978