

41. Deutscher Stahlbautag
26./27. September 2024 in Lindau

Eurocodes im globalen Kontext – Das Beste aus zwei Welten

Ein kombiniertes, europäisch-amerikanisches Bemessungskonzept für dünnwandige Stahlbauteile

tu technische universität
dortmund

Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Lehrstuhl Stahlbau

Prof. Dr.-Ing. habil. Bettina Brune

Prof. Dr.-Ing. habil. Bettina Brune
bettina.brune@tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann
dieter.ungermann@tu-dortmund.de

Tim Lemański, M.Sc.
tim.lemanski@tu-dortmund.de

 Projekt P1328

 IGF-Nr. 19964 N



Eurocodes im globalen Kontext – Das Beste aus zwei Welten

Ein kombiniertes, europäisch-amerikanisches Bemessungskonzept für dünnwandige Stahlbauteile

1. Einführung

2. Internationale Bemessungskonzepte für den Stahlleichtbau
3. Das Beste aus zwei Welten: Das kombinierte europäisch-amerikanische Bemessungskonzept
4. Experimentelle Forschung zur Druckbeanspruchbarkeit
5. Experimentelle Forschung zur Biegebeanspruchbarkeit
6. Numerische Simulationen
7. Fazit und Ausblick

1. Einführung

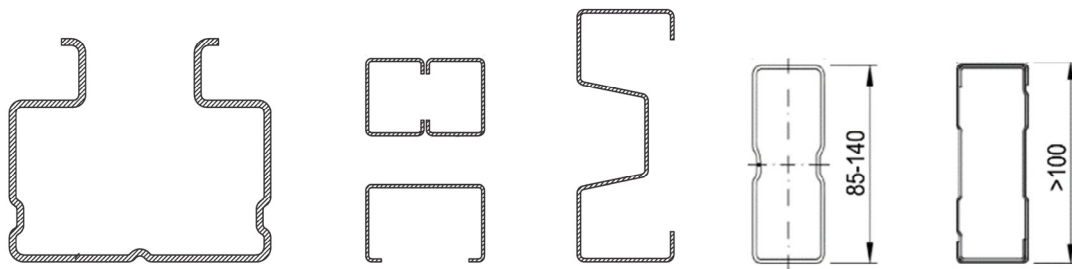
Dünnwandige Profile im Stahlhochbau

- Hallenbau
- Wohnungs- und Geschossbau (Modulbauweise)
- (Hoch)Regallagerbau
- Fassadenbau
- Bauen im Bestand (Aufstockung)
- Solarunterkonstruktion
- Sonderbauweisen

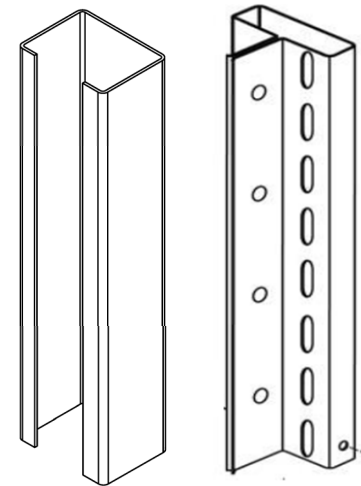
1. Einführung

Profilformen im Stahlleichtbau

- kaltverformte, rollprofilierte oder gekantete Profile
- Werkstoff: ab S350GD+Z nach EN 10346
Blechkicken $t=1,25-3,50\text{mm}$
- große Bandbreite herstellerspezifischer Profilformen für verschiedene Anwendungsgebiete
- Versteifungen über Sicken, Lippen oder Bördel
- ggf. kontinuierlich perforiert



(Hoch)regallagerbau Quelle: Fritz Schäfer GmbH



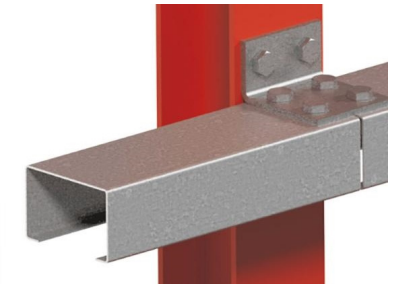
Stützenprofile im Industrie- und Geschossbau



Weinbau Quelle: voestalpine PP GmbH



Z-Profile als Pfetten
Quelle: Wiegmann Umformtechnik



C-Profile als Wandriegel
Quelle: Wiegmann Umformtechnik

1. Einführung

Entwicklung der Bemessungsregeln für den Stahlleichtbau im europäischen Kontext

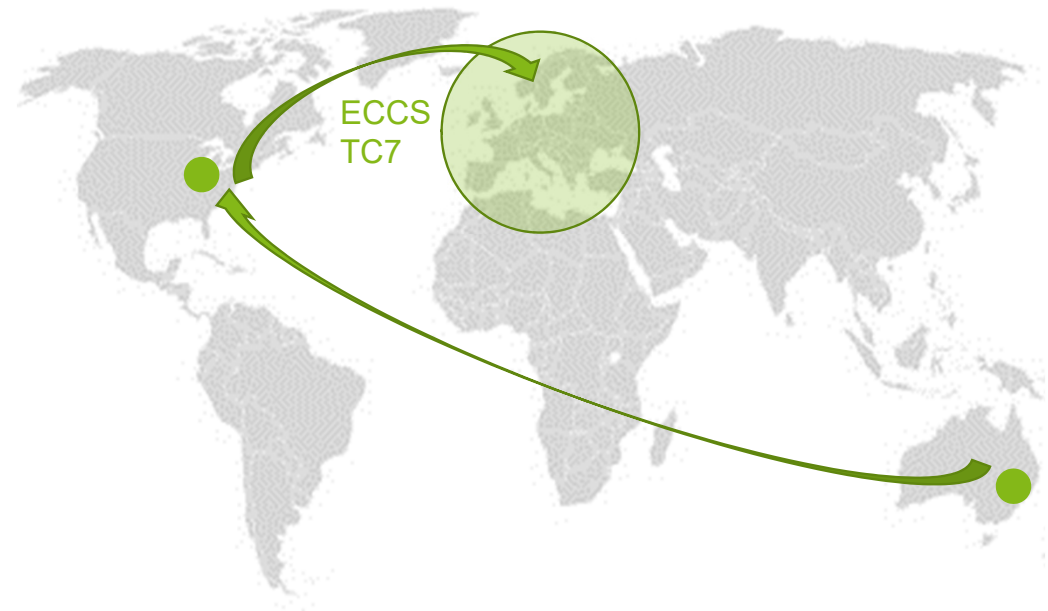
- Deutschland
 - *Handbuch zur Berechnung kaltgeformter Stahlbauteile* Hrg: Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf (1976)
 - DASt-Richtlinie 016 „*Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen*“ (1992)
- Europa
 - *European Recommendation for the design of profiled sheeting and sections* Hrg.: Europäische Konvention für Stahlbau EKS, **TC7** (1980)
 - *European Recommendation for the design of light gauge steel members* Hrg.: Europäische Konvention für Stahlbau EKS, **TC7** (1987)
 - **EN 1993-1-3: Eurocode 3, Teil 1-3 „Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche“ (2010) – Review 2024**



1. Einführung

Entwicklung der Bemessungsregeln für den Stahlleichtbau im globalen Kontext

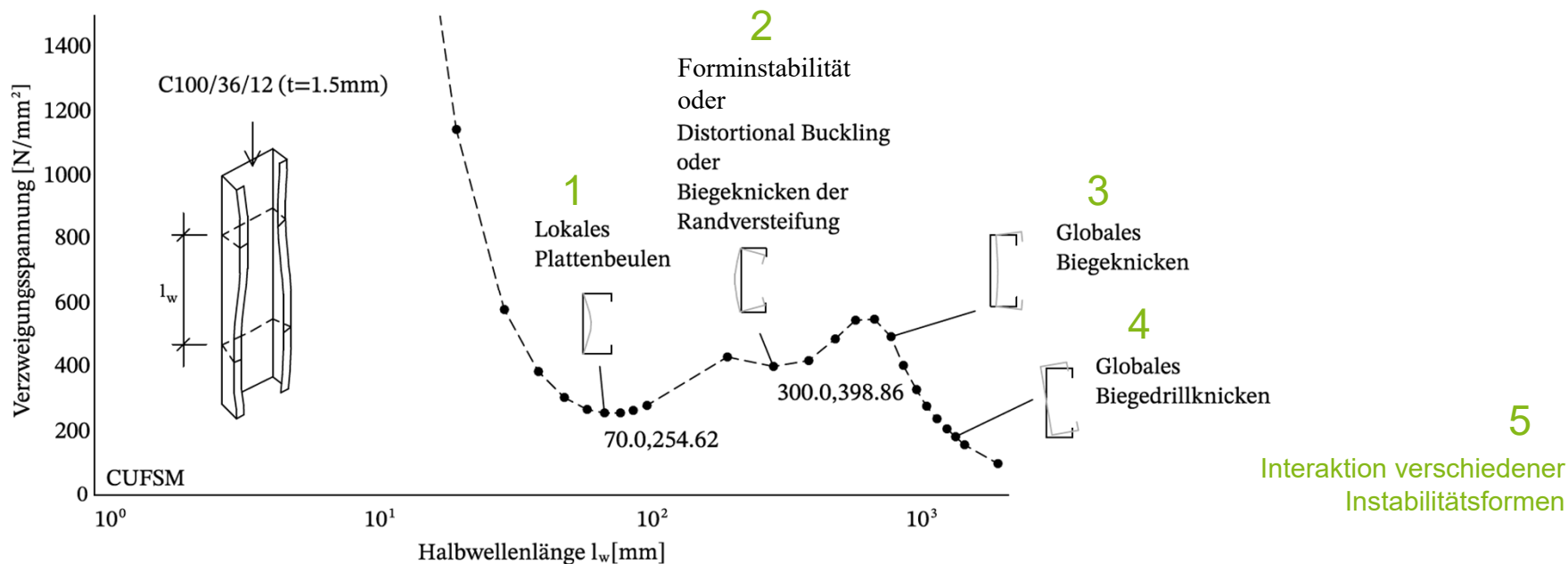
- Amerikanisch/Australische Entwicklungen
 - *AISI Specification for the design of cold-formed steel structural members*. Hrg: American Iron and Steel Institute, Washington D.C. (1968)
 - Entwicklung der *Direct Strength Method DSM*
 - University of Sydney (Hancock et.al.) ab ca. 1992
 - University of Cornell/Baltimore (Schafer, Peköz et.al.), ab ca.1998
 - *AISI Specification for the design of cold-formed steel structural members. Appendix 1. Direct Strength Method*, Washington D.C. (2004)
 - *AISI Direct Strength Method (DSM) Design guide*. Hrg: AISI Washington D.C. (2006)
 - **AISI S100-16: Specification for the design of cold-formed steel structural members**, Washington D.C. (2017)



2. Internationale Bemessungskonzepte für den Stahlleichtbau

Instabilitätsformen dünnwandiger Stahlbauteile

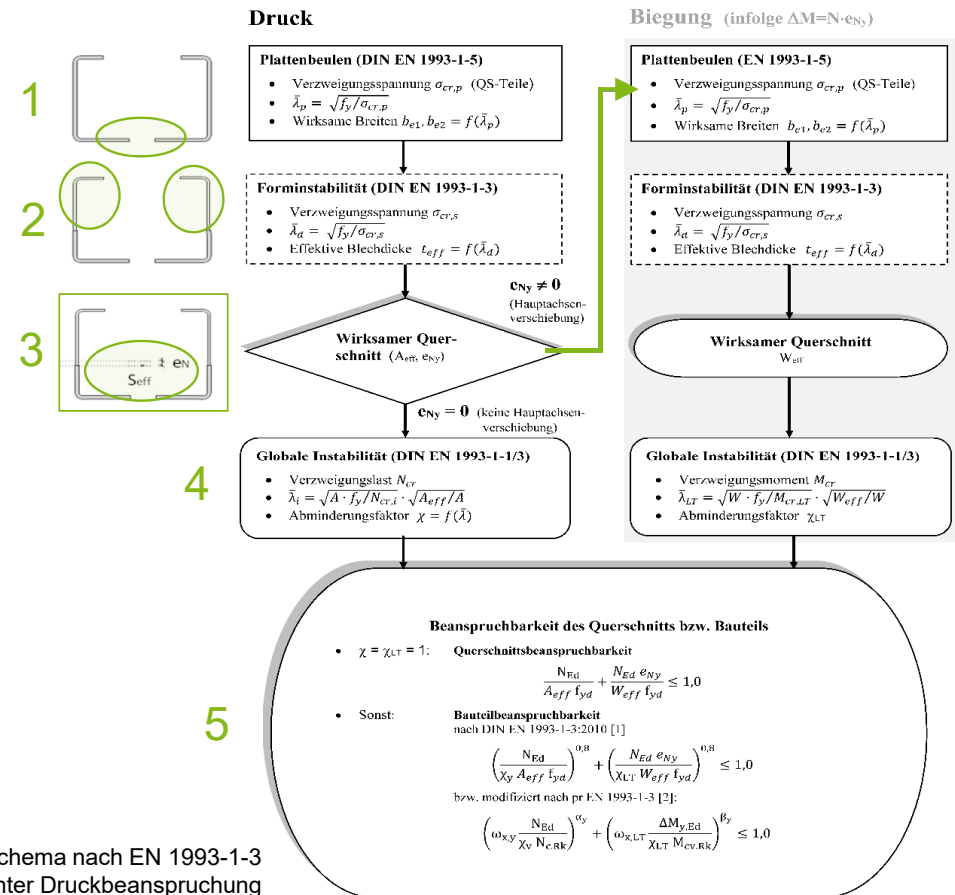
- Instabilitätsformen eines C-förmigen Bauteils unter Druckbeanspruchung (LBA)



CUFSM: Cross-section elastic buckling analysis, Thin-walled Structures Group, Civil and Systems Engineering, Johns Hopkins University, USA. <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>

2. Internationale Bemessungskonzepte EN 1993-1-3 - Methode der wirksamen Breiten

- Wirksamer Querschnitt zur Berücksichtigung lokaler Stabilitätsphänomene
 - Schritt 1:** Plattenbeulen → Wirksame Breiten
 - Schritt 2:** Forminstabilität → Wirksame Dicken
 - Schritt 3:** Wirksamer Querschnitt ggf. mit Schwerpunktverschiebung vom Bruttoquerschnitt
 - Berechnung eines wirksamen Querschnitts unter Biegebeanspruchung
- Schritt 4:** Globaler Stabilitätsnachweis auf Basis des wirksamen Querschnitts
- Schritt 5:** N-M-Interaktion auf der Basis unterschiedlicher wirksamer Querschnitte
 - Die Bemessung nach EN 1993-1-3 ist komplex, zeitaufwendig, fehleranfällig und führt zu konservativen Ergebnissen

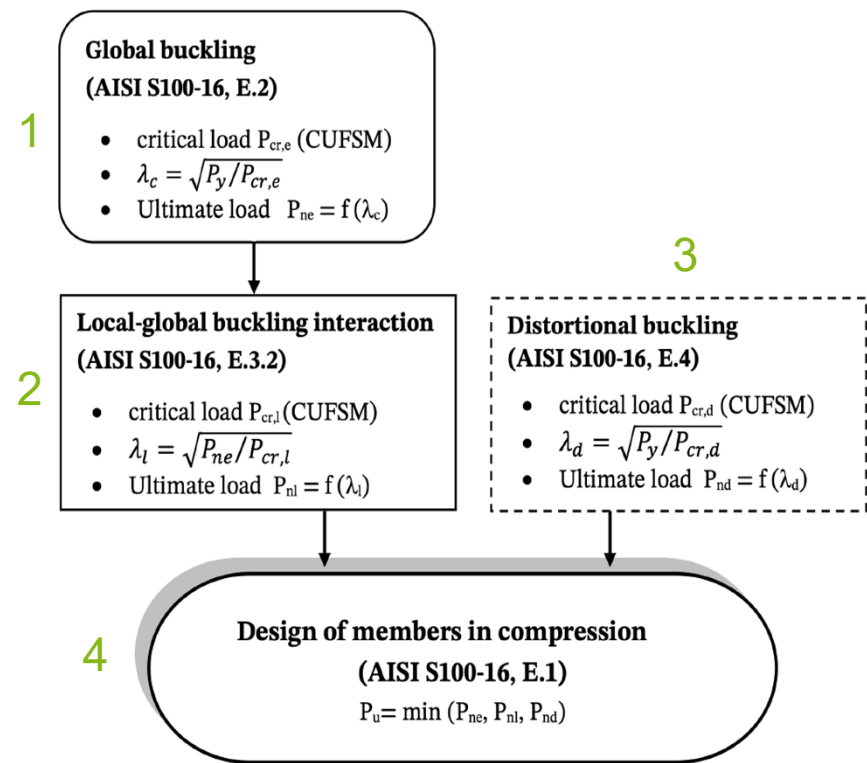


Bemessungsschema nach EN 1993-1-3
C-Profil unter Druckbeanspruchung

2. Internationale Bemessungskonzepte

AISI S100-16 – Direct Strength Method (DSM)

- Bemessung am **Bruttoquerschnitt**
 - Stabilitätsanalysen mittels Finite-Streifen-Methode (FSM) (Software CUFSM in AISI S100-16 referiert)
 - **Schritt 1:** Bauteilbeanspruchbarkeit auf globale Instabilität
 - **Schritt 2:** Bauteilbeanspruchbarkeit infolge der Interaktion von Plattenbeulen und globaler Instabilität
 - **Schritt 3:** Bauteilbeanspruchbarkeit auf Forminstabilität
 - **Schritt 4:** Minimum aus Schritt 2 oder 3 definiert die finale Bauteilbeanspruchbarkeit
- **Aber:** Nichtlineare Spannungsverteilung am Querschnitt infolge Plattenbeulen/Forminstabilität wird negiert
- **Aber:** Keine Interaktion Forminstabilität-Biege(drill)knicken



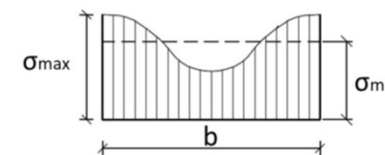
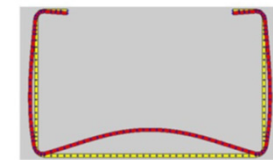
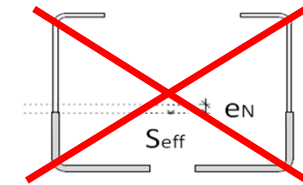
Bemessung nach AISI S100-16 DSM : C-Profil unter Druckbeanspruchung

□ CUFSM: Cross-section elastic buckling analysis, Thin-walled Structures Group, Civil and Systems Engineering, Johns Hopkins University. USA. <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>

3. Das Beste aus zwei Welten: Das kombinierte Bemessungskonzept

Idee und Zielsetzung

- Verwendung der **Direct Strength Method** nach **AISI S100-16** zur Ermittlung der **Querschnittsbeanspruchbarkeit** infolge **Plattenbeulen und Forminstabilität am Bruttoquerschnitt**
 - Eliminierung der Methode der wirksamen Breiten (Ease of Use)
- Ansonsten: Kompatibilität mit EN 1993-1-3 bzw. EN 1993-1-1
 - Implementierung der Querschnittsbeanspruchbarkeit in die globalen Stabilitätsnachweise für Bauteile nach EN 1993-1-3 bzw. EN 1993-1-1
- Modellierung aller relevanten Stabilitätseinflüsse
 - Verschiebung der Druckspannungsergebnisse (durch nichtlineare Druckspannungsverteilungen) infolge Plattenbeulen und Forminstabilität
 - Interaktion Forminstabilität – Biege(drill)knicken

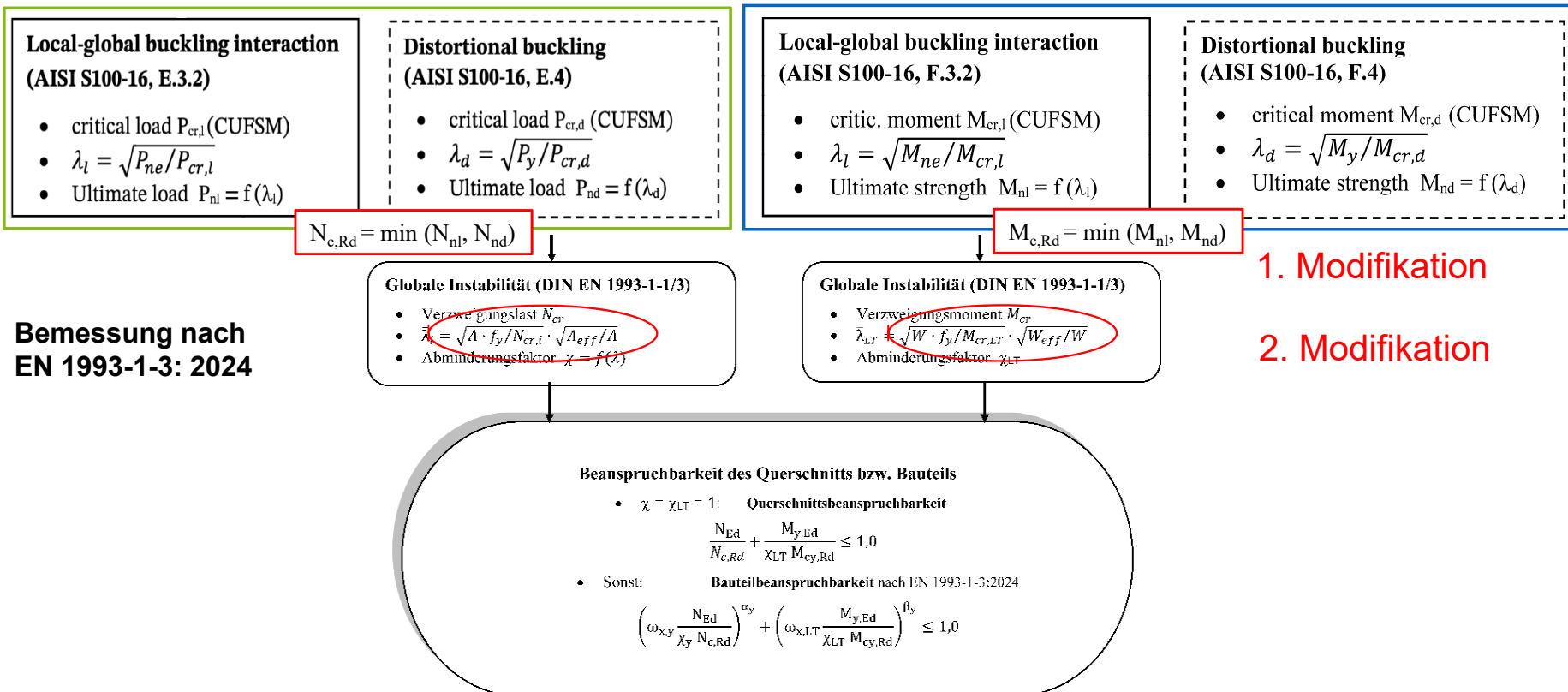


3. Das Beste aus zwei Welten: Das kombinierte Bemessungskonzept Bemessungsschema des kombinierten Ansatzes

DSM nach AISI S100-16

Druckbeanspruchung

Biegebeanspruchung



3. Das Beste aus zwei Welten: Das kombinierte Bemessungskonzept

Formale Modifikation – Druckbeanspruchbarkeit

- Definition eines **Q-Faktors** als Ausnutzungsgrad der Querschnittsbeanspruchbarkeit

$$Q_A = \min \begin{cases} Q_{A,l} = \frac{N_{Rk,l}}{N_{pl}} \\ Q_{A,d} = \frac{N_{Rk,d}}{N_{pl}} \end{cases} \quad \text{mit:}$$

$N_{Rk,l}$: Beanspruchbarkeit auf Plattenbeulen nach AISI S100-16 DSM
 $N_{Rk,d}$: Beanspruchbarkeit auf Forminstabilität nach AISI S100-16 DSM

- Modifizierter bezogener Schlankheitsgrades für globale Instabilität

$$\lambda_g = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} \cdot f_y}{N_{cr,g}}} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} \cdot f_y \cdot A}{N_{cr,g} \cdot A}} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,g}}} \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{eff}}}{A}} = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,g}}} \cdot \sqrt{Q_A}$$

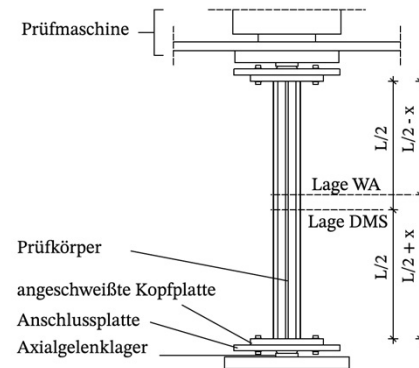
- **Offene Fragestellung:** Beanspruchbarkeit infolge der nichtlinearen Spannungsverteilung durch Plattenbeulen/Forminstabilität reduziert
- Validierung des kombinierten Bemessungsansatzes durch experimentelle und numerische Untersuchungen



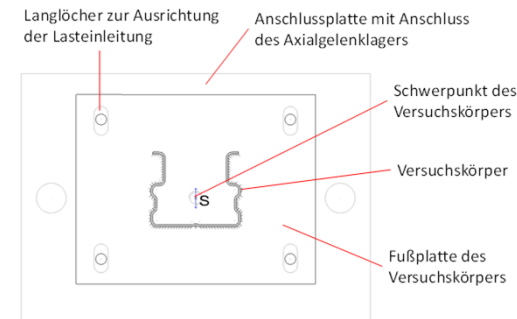
4. Experimentelle Forschung zur Druckbeanspruchbarkeit

Versuchsaufbau

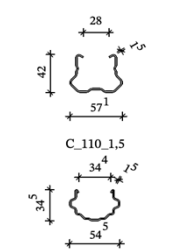
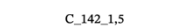
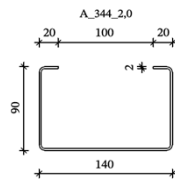
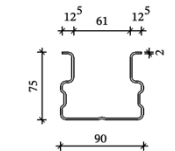
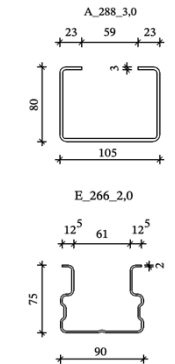
- Stützendruckversuche nach DIN EN 1993-1-3, A.3.2
 - angeschweißte Kopfplatten
 - gelenkige Lagerung (global)
- Lasteinleitung über Anschlussplatte mit Langlöchern zur Variation der Lasteinleitungsposition
- Untersuchungen an verschiedenen C- und Ω -förmigen sowie freigeformten Profilen
 - unperforiert/perforiert
- Versuchskörper in unterschiedlichen Längen zur Untersuchung verschiedener Stabilitätsphänomene
 - kurz: Plattenbeulen ($L=5 \cdot \text{Breite}$)
 - mittellang: Forminstabilität (Natürliche Halbwellenlänge)
 - lang: Biegeknicken/Biegedrillknicken und Interaktion



Versuchsaufbau für Stützendruckversuche - DIN EN 1993-1-3, A.3



Anschlussplatte mit Langlöchern zur Variation der Lasteinleitung

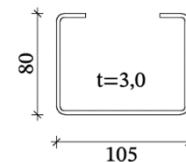


Versuchsmatrix

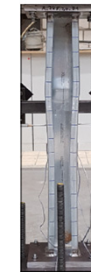
4. Experimentelle Forschung zur Druckbeanspruchbarkeit

Kurzfassung der Ergebnisse - C-förmige Profile

- Verschiedene Instabilitätsformen bei unterschiedlichen Bauteillängen
 - Plattenbeulen, Forminstabilität, Biegedrillknicken singularär
 - Interaktion von Forminstabilität und Biegedrillknicken bei baupraktischen Längen
- Signifikante Verschiebungen der Spannungsergebnisse infolge Plattenbeulen und Forminstabilität
 - nichtlineare Spannungsverteilung bei kurzen/mittleren Bauteillängen mit Versatz der Druckspannungsergebnisse
 - mit zunehmender Bauteillänge und dominanter globaler Instabilität nimmt der Effekt der nichtlinearen Druckspannungsverteilung am Querschnitt ab



L = 320 mm
 $\lambda_l = 0,54$
 $\lambda_d = 0,64$
 $\lambda_g = 0,18$



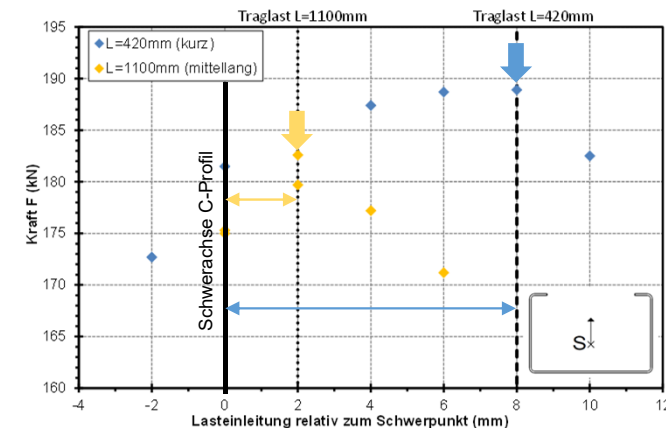
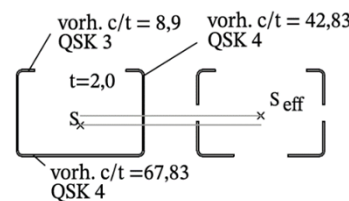
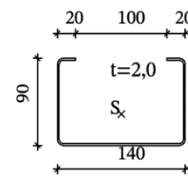
L = 850 mm
 $\lambda_l = 0,54$
 $\lambda_d = 0,71$
 $\lambda_g = 0,44$



L = 1550 mm
 $\lambda_l = 0,54$
 $\lambda_d = 0,76$
 $\lambda_g = 0,78$



L = 1850 mm
 $\lambda_l = 0,54$
 $\lambda_d = 0,76$
 $\lambda_g = 0,92$



5. Experimentelle Forschung zur Biegebeanspruchbarkeit

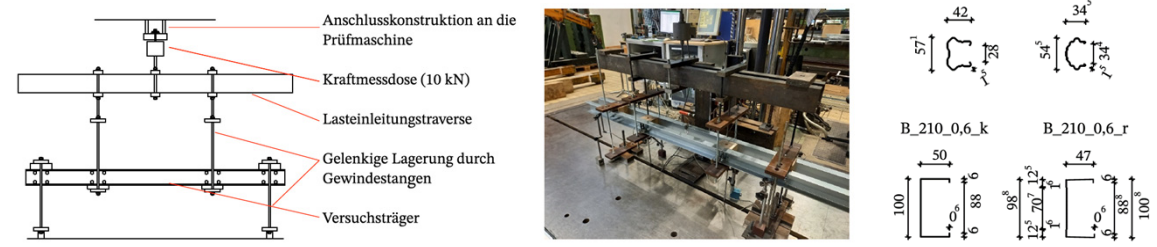
Versuchsaufbau

- Vierpunktbiegeversuche nach DIN EN 1993-1-3, A.3.3
 - Doppelter Versuchsaufbau mit Lasteinleitung im Schubmittelpunkt
 - Mindestlänge des Versuchskörpers: 15-fach (bzw. 30-fach) x Steghöhe

- C-, Ω- und freigeformte Profile
 - Lasteinleitung über Maschinendruck bei Versuchskörpern mit hoher Biegemomentenbeanspruchbarkeit
 - C-Profile (Industriebau)
 - Ω-Profile (Regalbau)
 - alternativ über Maschinenzug
 - C-Profile (Ständerwandbau)
 - Freigeformte Profile (Weinanbau)



Vierpunktbiegeversuche nach DIN EN 1993-1-3, A.3.3 für Versuchskörper mit hoher Beanspruchbarkeit



Vierpunktbiegeversuche nach DIN EN 1993-1-3, A.3.3 für Versuchskörper mit niedriger Beanspruchbarkeit

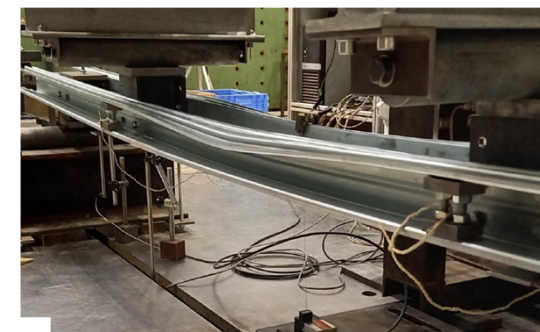
5. Experimentelle Forschung zur Biegebeanspruchbarkeit

Kurzfassung der experimentellen Ergebnisse

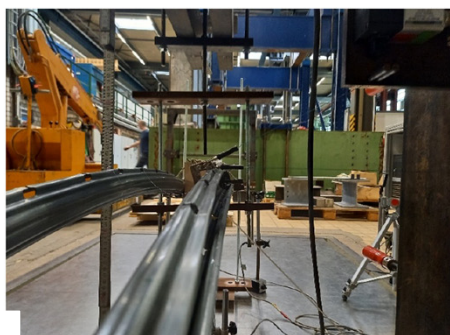
- Verschiedene Instabilitätsformen bei unterschiedlichen Bauteillängen
 - Forminstabilität bei kurzen Bauteillängen
 - Biegedrillknicken bei großen Bauteillängen
 - Interaktion von Forminstabilität und Biegedrillknicken nur selten identifiziert
 - Nichtlineare Spannungsverteilung im Biegedruckbereich durch DMS bestätigt



a) Ω -Profile: a) Große Länge: Forminstabilität



b) Mittlere Länge: Forminstabilität



a) Freie Profilform: a) Gr. Länge: Biegedrillknicken



b) Mittlere Länge Forminstabilität



a) C-Profile: a) Große Länge: Forminstabilität

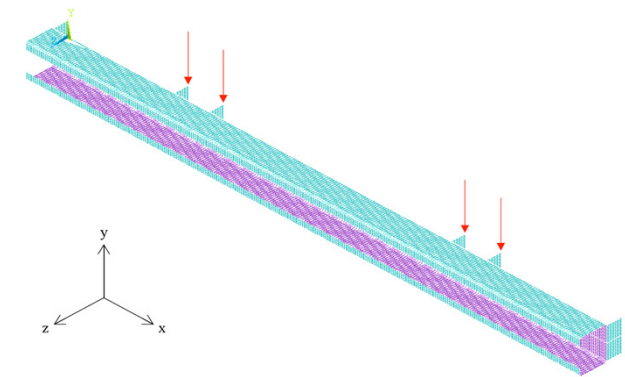


b) Mittlere Länge: Forminstabilität

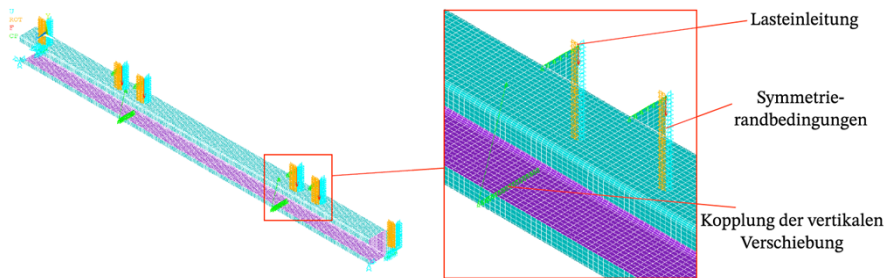
6. Numerische Simulationen

Validierung der numerischen Modelle - Biegeversuche

- Numerische Modelle mit ANSYS (2020 R2)
 - Modellierung von Versuchskörper mit Distanzstücken
- Ausnutzung von Symmetriebedingungen an den Distanzstücken
- Materialverfestigung aus Zugversuchen
- Ansatz von gemessenen Imperfektionen
- Gute Übereinstimmung zwischen numerischer Simulation und Bauteilversuch



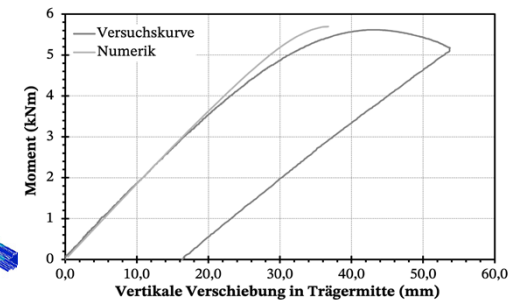
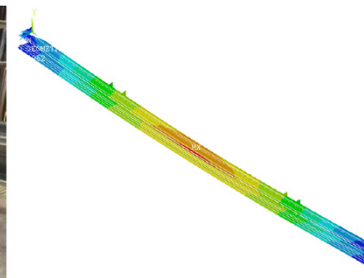
Numerisches Modell der Vierpunktbiegeversuche



Modellierung der Randbedingungen



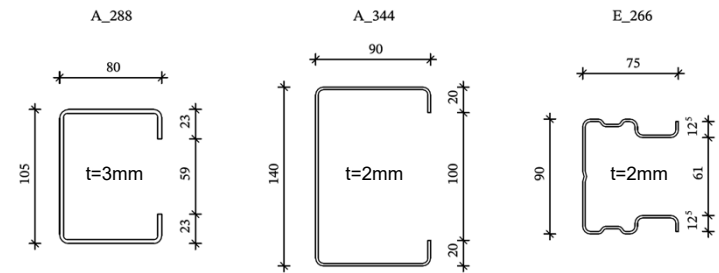
Vergleich der numerischen Simulation mit Bauteilversuchen



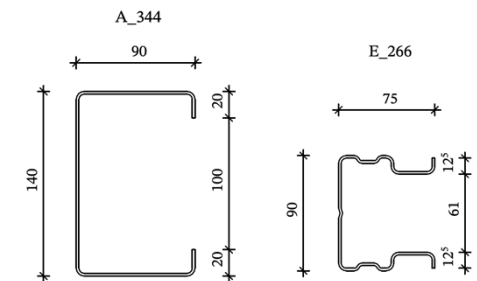
6. Numerische Simulationen

Parameterstudien

- Variation der Profiltypen mit Druck und/oder Biegung
- Variation der Querschnitts- und Bauteilgeometrie
 - Querschnittsdicke $t=1,0-3,0$ mm
 - Länge $L=400-4000$ mm (Druck), $L=500-4000$ mm (Biegung)
 - Stahlgüte S250GD+Z - S450GD+Z
- Werkstoffparameter mit/ohne Verfestigung nach DIN EN 1993-1-3, 3.2.2
- Imperfektionen in Anlehnung an DIN EN 1993-1-5 bzw. DIN EN 1993-1-1/NA
 - Plattenbeulen: Blechbreite/200 (Eigenform)
 - Globale Vorkrümmung: $L/350$ (Sinus-Halbwellen)
 - Forminstabilität nach Walker: $0,3 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,d}}}$ (Eigenform)
 mit $\sigma_{cr,d}$ = Verzweigungsspannung für Forminstabilität
 - Überlagerung einer Leitimperfektion (100%) mit zwei begleitenden Imperfektionen (70%)



Querschnitte für Parameterstudien bei Druckbeanspruchung

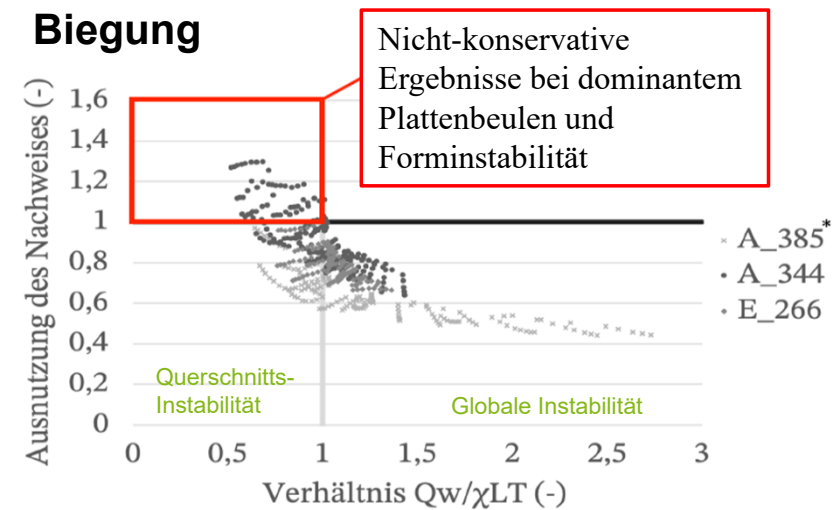
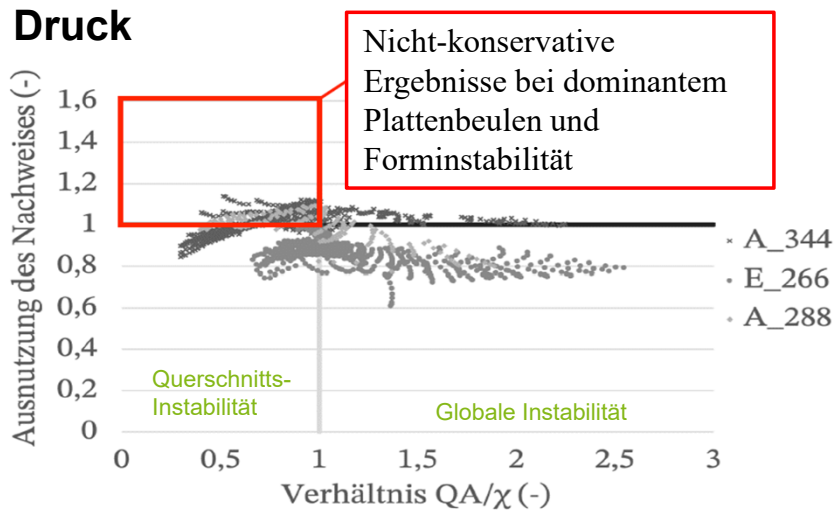


Querschnitte für Parameterstudien bei Biegebeanspruchung

6. Numerische Simulationen

Vergleich der Ergebnisse von Parameterstudie und kombiniertem Bemessungsansatz

- Weitgehend gute Ergebnisse mit dem kombinierten Ansatz AISI S100-16 DSM - EN 1993-1-3
- **Aber:** Nicht-konservative Ergebnisse bei Profilen in geringerer Bauteillänge
- **3. Modifizierung** des Bemessungsansatzes zur Berücksichtigung der Effekte aus der nichtlinearen Spannungsverteilung bei Plattenbeulen und Forminstabilität erforderlich



Gegenüberstellung: Ergebnisse der numerischen Simulationen und des kombinierten Bemessungsansatzes AISI S100-16 DSM - EN 1993-1-3

6. Numerische Simulationen

Finale Modifikationen des kombinierten Bemessungskonzepts

- Einführung eines **Anpassungsfaktors** zur Berücksichtigung der Effekte aus nichtlinearer Spannungsverteilung am Querschnitt infolge Plattenbeulen und Forminstabilität, e.g. für Profile unter Druckbeanspruchung

$$\chi_{eN} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \chi + Q_A \\ 0,85 \end{array} \right. \leq 1,0 \quad \text{mit:} \quad Q_A = \min \left\{ \begin{array}{l} Q_{A,l} = \frac{N_{Rk,l}}{N_{pl}} \quad (\text{Plattenbeulen - DSM}) \\ Q_{A,d} = \frac{N_{Rk,d}}{N_{pl}} \quad (\text{Forminstabilität -DSM}) \end{array} \right.$$

χ Abminderungsfaktor für Biege(drill)knicken nach den Europäischen Knickspannungslinien

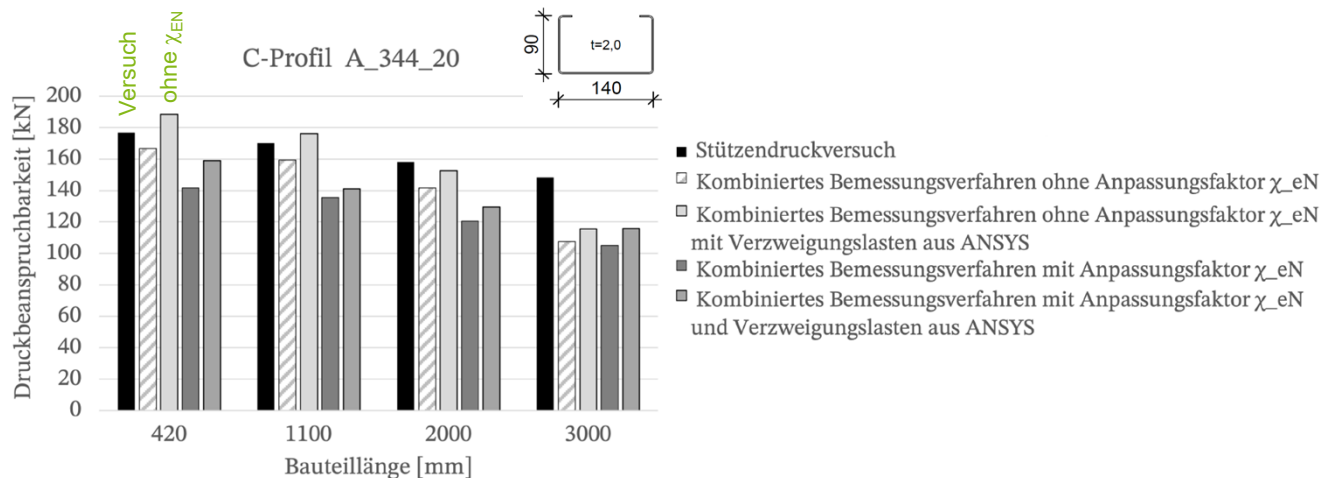
- Modifizierte Druckbeanspruchbarkeit** nach kombinierter Bemessung AISI S100-16 DSM – EN 1993-1-3

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \chi_{eN} \cdot Q_A \cdot N_{pl,Rd}$$

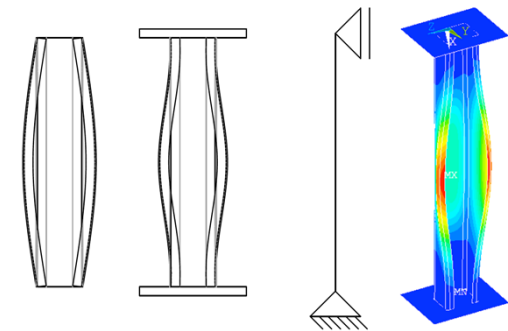
6. Numerische Simulationen - Bauteilversuche

Validierung des kombinierten Bemessungskonzepts AISI S100-16 DSM – EN 1993-1-3

- Exemplarisch: C-Profil A_344_20 unter Druckbeanspruchung
 - Sichere Bemessung mit dem modifizierten Ansatz inkl. Implementierung des Anpassungsfaktor χ_{eN}
 - Ansatz von gelenkigen Randlagerungen am Bauteilende zur Ermittlung der Verzweigungslasten (z.B. mit FS-Methoden) mitunter zu konservativ
 - konservative Bemessung EN 1993-1-3 bei großen Bauteillängen (auf der Basis der Europäischen Knickspannungslinien)



Vergleich Bauteilversuche – Beanspruchbarkeit nach kombiniertem Bemessungskonzept AISI S100-16 DSM – EN 1993-1-3

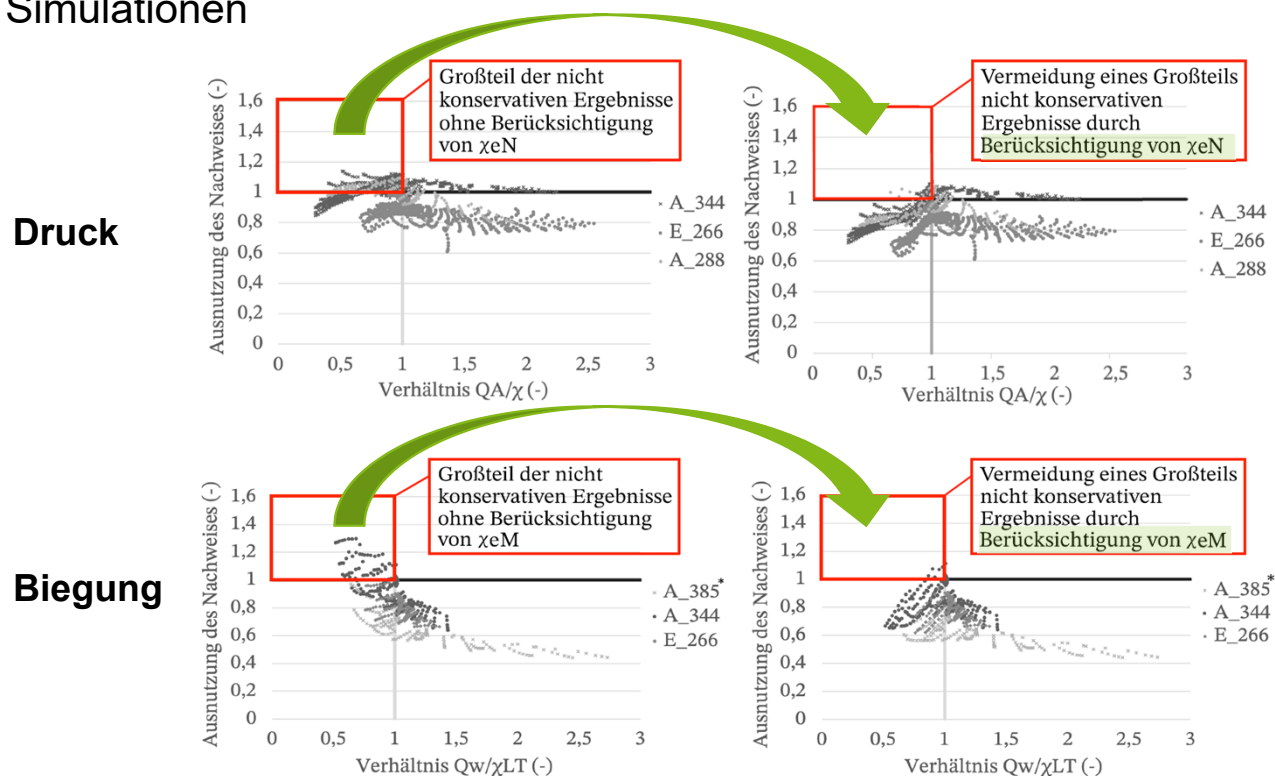


Einfluss der Kopfplatte auf die Forminstabilität

6. Numerische Simulationen

Validierung des kombinierten Bemessungskonzepts AISI S100-16 DSM – EN 1993-1-3

- Gegenüberstellung der Ergebnisse des modifizierten, kombinierten Bemessungskonzepts und der numerischen Simulationen



7. Fazit und Ausblick

Eurocode im globalen Kontext - Bemessungskonzept AISI S100-16 DSM – EN 1993-1-3

- Sicheres Bemessungskonzept für dünnwandige Stahlbauteile mit typischen, auch individuellen Profilformen des Stahlleichtbaus mit/ohne Perforationen
- Ermittlung der Querschnittsbeanspruchbarkeit nach AISI S100-16 DSM am Bruttoquerschnitt - Methode der wirksamen Breiten nach EN 1993-1-3 wird obsolet
- Nachweis der Bauteilstabilität nach EN 1993-1-3 bzw. EN 1993-1-1
- **anwenderfreundliche, zeitsparende, effiziente** und sehr gute Alternative zur EN 1993-1-3
- Implementation in EN 1993-1-3 möglich
- Nutzung zur Neuentwicklungen von Profilen und Strukturen
- Erweiterung/Anpassung zur allgemeinen Bemessung von dünnwandigen Stahlbauteilen (Klasse 4-Querschnitte) denkbar



Danksagung

Das IGF-Vorhaben „Zukunftsfähigkeit kaltgeformter Stahlprofile im Bauwesen“, IGF-Projekt Nr. 19964 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Den vorgenannten Einrichtungen sei für die Betreuung und Förderung an dieser Stelle sehr herzlich gedankt. Ein besonderer Dank gilt auch den beteiligten Industriepartnern für ihre Unterstützung durch intensive Beratung als auch durch Sachspenden.

