

Vorwort

Im Stahlbau-Kalender 2025 sind erneut fundiertes Fachwissen und innovative Perspektiven vereint, um die Entwicklungen und Herausforderungen im Stahl- und Leichtmetallbau sowie im digitalen Planen und Bauen umfassend aufzuzeigen. Damit bietet dieser Band wertvolle Orientierung und praxisnahe Lösungsansätze für Ingenieur:innen, Planer:innen und Wissenschaftler:innen. Ein Schwerpunkt des diesjährigen Kalenders liegt wieder auf den **neuen Normen**. So werden etwa die aktuellen Entwicklungen der Eurocodes, wie sie für die Bemessung von Kranbahnen relevant sind, detailliert erläutert. Zum Schwerpunkt **Leichtmetallbau** gehört neben einem neuen Bemessungsverfahren für kaltgeformte, dünnwandige Stahlquerschnitte die Darstellung des neuen Eurocode 3 Teil 7 zu den Sandwichelementen und eine ausführliche Erläuterung zum neuen Eurocode 9 über Aluminiumkonstruktionen. Die Annahmen zu Wind- und Schneelasten sind eine wichtige Grundlage für die Tragwerksplanung von schlanken Stahlbauwerken. Auch hierzu werden aus erster Hand die neuen Entwicklungen im Rahmen der zweiten Eurocode-Generation dargelegt.

Zum Themenkomplex **digitales Planen und Bauen** wird die Rolle der künstlichen Intelligenz (KI) und der Automatisierung hervorgehoben. Dabei wird die digitale Transformation des Stahlbaus beleuchtet, die vom Einsatz KI-gestützter Modelle für FEM-Berechnungen bis hin zu Robotik und 3D-Druckverfahren reicht. Diese Entwicklungen eröffnen völlig neue Möglichkeiten für die Planung und Fertigung.

Damit bietet der Stahlbau-Kalender 2025 einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand von Normen, Technologien und wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Mit dem erneuten Abdruck der Grundnorm **DIN EN 1993-1-8** zur Bemessung von Anschlüssen und Verbindungen in Stahltragwerken mit vorwiegend ruhenden Beanspruchungen werden für die Anwender neben Bemessungs- und Konstruktionsregeln für elementare Verbindungsmittel wie Schrauben, Nieten, Bolzen und Schweißnähte auch Berechnungsverfahren zur Bemessung von geschweißten und geschraubten Stirnplattenverbindungen sowie für geschweißte Hohlprofilknoten bereitgestellt. In dem vorliegenden Beitrag finden sich neben dem Text der zurzeit noch gültigen Norm und dem Nationalen Anhang für Deutschland ergänzende Anmerkungen und Hinweise der Autoren Dieter Ungermann, TU Dortmund und Stephan Schneider, construct.ING – Büro für Bauwesen, mit aktuellen Ergänzungen von Ulrike Kuhlmann, Universität Stuttgart. Dabei sind auch Erkenntnisse aus der laufenden Bearbeitung der Norm für die zweite Eurocode-Generation eingeflossen.

Karsten Kathage und Christoph Ortmann, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin erläutern in ihrem Beitrag eine auf den Metallbau ausgerichtete Zu-

sammenfassung des Inhalts der **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)** einschließlich einer Übersicht relevanter Normen und Richtlinien. Ferner geben sie einen Überblick über die vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) im Bereich Metallbau erteilten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ), allgemeinen Bauartgenehmigungen (aBG) und Europäischen Technischen Bewertungen (ETA).

Das Potenzial der Stahlleichtbauweise kann aufgrund der Einschränkungen bei der Bemessung nach DIN EN 1993-1-3 bzw. prEN 1993-1-3 nicht ausgeschöpft werden. So werden immer noch Typenprüfungen, abZ oder Bauteilprüfungen für kaltgeformte Stahlbauteile durchgeführt, was zeit- und kostenintensiv ist. Bettina Brune, Tim Lemański und Dieter Ungermann, TU Dortmund, stellen daher im Beitrag **Neue Bemessungskonzepte für den Stahlleichtbau** ein innovatives, eurocodekonformes und anwenderfreundliches Bemessungsverfahren für kaltgeformte, dünnwandige Stahlquerschnitte vor. Im neuen Verfahren wird die Direct Strength Method DSM nach der amerikanischen Norm AISI S100-16 zur Bestimmung der Querschnittsbeanspruchbarkeit dünnwandiger Kaltprofile unter Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens und der Forminstabilität genutzt und in das etablierte Nachweiskonzept für global biegeknick- oder biegedrillknickgefährdete Bauteile der revidierten Fassung von prEN 1993-1-3 implementiert. Das neue Verfahren liefert eine sehr gute Alternative zu den bestehenden Bemessungsverfahren für dünnwandige, kaltgeformte Stahlbauteile.

Die **Bemessung und Konstruktion von Sandwichelementen** soll zukünftig über den neuen Normenteil EN 1993-7 erfolgen, der in diesem Kapitel von Bernd Naujoks, Niklas Ardelmann, Bergische Universität Wuppertal, und Fabian Kischkewitz, S.A.N. Beratende Bauingenieure GmbH, kommentiert wird. Es werden Hinweise zur Anwendung und zu den Hintergründen des Normtextes und eines Teils der Anhänge gegeben. Gegenüber den bisherigen Regeln im Anhang E der DIN EN 14509 sind neue Bemessungsregeln für Sandwichelemente mit Öffnungen, für Punktlasten und für auf Normalkraft beanspruchte Elemente hinzugekommen. Die notwendigen Kennwerte für die Bemessung sollen weiterhin gemäß der Produktnorm EN 14509 ermittelt, statistisch ausgewertet und vom Hersteller in einer Leistungserklärung deklariert werden. Um dem Hersteller aufzuzeigen, welche Kennwerte für die Berechnung und Bemessung erforderlich sind, wurde in EN 1993-7 der Anhang M aufgenommen.

Zur **Bemessung von Kranbahnen** nach den neuen Eurocode-Regeln wird die Anwendung des Normentwurfs E DIN EN 1993-6 von Mathias Euler, Elena Sidorov, Tom Rudolph, BTU Cottbus-Senftenberg, und Ulrike Kuhlmann, Universität Stuttgart, erläutert und an

praktischen Beispielen illustriert. Dabei ist hervorzuheben, dass nicht nur die eigentliche Kranbahnnorm behandelt wird, sondern für die Anwender:innen die Bemessung von Kranbahnen auch in Hinblick auf alle anderen neuen Normenteile der zweiten Eurocode-Generation aufbereitet wird. So wird ausführlich auf die Hintergründe der kranbedingten Einwirkungen nach E DIN EN 1991-3 eingegangen. Bei den Erläuterungen zur Tragwerksberechnung werden die verbesserten Regelungen zu den lokalen Beanspruchungen aus Radlasteinleitung behandelt, deren Anwendungsbereich erweitert wurde. Die unterschiedlichen Möglichkeiten für den Biegedrillknicknachweis von Kranbahnträgern nach E DIN EN 1993-1-1 werden beschrieben. Einen Schwerpunkt des Beitrags bilden die Ermüdungsnachweise. Nach einem Überblick zu den Betriebsbeanspruchungen von Kranen und Kranbahnen werden die neuen Regelungen zu den Schadensäquivalenzbeiwerten für das Nennspannungskonzept vorgestellt. Schließlich wird auch auf die verbesserte Kerbfalleinstufung kranbahnspezifischer Konstruktionsdetails in E DIN EN 1993-1-9 eingegangen.

Die Ingenieurspraxis zeigt, dass nach wie vor viel Unsicherheit bei der Bemessung von Aluminiumkonstruktionen herrscht, da hier zum Teil eine andere Herangehensweise als für Stahl erforderlich ist. Die Haupthürde besteht im Umgang mit den vielen verschiedenen Legierungen und den entsprechend unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften. Dies umfasst auch den Wärmeeinfluss infolge von z. B. Schweißen. Der Beitrag **Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken** des Autorenteam Daniel Pak, Max Spannaus, Max Gündel, Benno Hoffmeister, Christina Radlbeck, Dorina Siebert, Reinhold Gitter und Andreas Fellhauer erläutert die neue Fassung von DIN EN 1999 und widmet sich dabei der Werkstoffwahl sowie der Bemessung von Schweiß-, Schrauben- und Nietverbindungen. Weiterhin werden die Bauteil- und Stabilitätsnachweise erläutert, wobei in einem separaten Abschnitt auf die Querschnittsklassifizierung eingegangen wird. Es werden jeweils die wichtigsten Regeln zusammengefasst, aufbereitet und in Anwendungsbeispielen veranschaulicht. Dabei wird insbesondere auf Neuerungen zur ersten Generation des Eurocode 9 und auf Unterschiede zum Eurocode 3 eingegangen.

Mit der bis voraussichtlich 2028 abgeschlossenen Einführung der zweiten Eurocode-Generation zu den Windeinwirkungen auf Bauwerke werden die Modelle der Windwirkungen und der Ersatzlasten für die Bestimmungen der Bauwerksantworten erheblich erweitert. Der Beitrag **Hintergründe zu den Neuerungen in prEN 1991-1-4:2024 für die Berechnung windinduzierter Reaktionen schlanker Bauwerke** vom Autorenteam Rüdiger Höffer, Norbert Holscher, Susanne Diburg, Francesca Lupi, Ika Kurniawati, Ulf Winkelmann und Cornelia Kalender gibt eine Übersicht über den Entwurf prEN 1991-1-4:2024 „Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: Wind actions“ und diskutiert

wichtige Innovationen für die Berechnung windinduzierter Reaktionen schlanker Bauwerke. Darüber hinaus werden kurze Empfehlungen für den zukünftigen Nationalen Anhang gegeben.

Die Kenntnis der Schneelasten am Boden ist in nationalen und internationalen Normen Voraussetzung für die Bestimmung der Schneelasten auf dem Dach. Diesem Thema widmet sich das Kapitel **Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3 Schneelasten – neue Entwicklungen** von Volker Cornelius, CSZ Ingenieurconsult GmbH & Co KG und Bodo Wichura, Deutscher Wetterdienst, Potsdam. Nach einem Rückblick zur Entwicklung der Schneelastvorschriften in Vergangenheit und Gegenwart werden die Grundlagen zur Schneelastbestimmung dargestellt und die Vorgehensweise bei der Analyse von Schneelasten erläutert. Die Modelle zur Herleitung der Formbeiwerte, die dem Entwurf der EN 1991-1-3:2024-05 zugrunde liegen, werden erläutert und mit der gültigen Schneelastnorm EN 1991-1-3:2003 bzw. DIN EN 1991-1-3:2010-12 verglichen. Die Hintergründe für die Überarbeitung werden aufgezeigt sowie die neuen Lastgrößen und Lastanordnungen für die verschiedenen Dachkonstruktionen erläutert. Der Einfluss von Wind, der die Verwehung des Schnees wesentlich bestimmt und in der Norm durch den Umgebungsbeiwert berücksichtigt wird, wird anhand neuer Analysen diskutiert.

Die rasante Entwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) hat in den letzten Jahren zahlreiche Branchen revolutioniert, darunter auch das Bauwesen und den Stahlbau. In dem Beitrag **Künstliche Intelligenz im Stahlbau** von Andres Müller, Andreas Taras, beide ETH Zürich, und Michael A. Kraus, TU Darmstadt, werden die Grundlagen und aktuellen Trends der KI beleuchtet, wobei ein besonderer Fokus auf deren Anwendung im Stahlbau gelegt wird. Zu Beginn wird ein umfassender Überblick über die verschiedenen Facetten der KI, einschließlich maschinellem Lernen, tiefem Lernen und den Grundarchitekturen neuronaler Netze, gegeben. Zudem werden spezialisierte Bereiche wie die generative KI und physik-informierte neuronale Netze erläutert. An konkreten Anwendungsbeispielen werden die Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit von KI im Stahlbau demonstriert. Dies reicht von der Erweiterung numerischer Berechnungs- und Bemessungsansätze über die bildgestützte Inspektion bis zur Verwendung von Large Language Models für das Erstellen von FEM-Modellen. Schließlich werden die Entwicklungen der KI für den Stahlbau eingeordnet und die Implikationen für künftige Forschung und Praxis mit KI im Stahlbau dargestellt.

Die vollautomatische Fertigung ist in der Stahlbauindustrie angekommen und wird im Beitrag **3D-Druck** von Jörg Lange, TU Darmstadt, und Thilo Feucht, TH Ingolstadt, näher betrachtet. Der kontinuierliche Fortschritt in der Maschinenteknik führt zu einem kontinuierlichen Zuwachs in diesem Bereich. So kann z. B. ein Roboter eine Steife an eine Stütze halten, während der zweite die Schweißnähte fertigt. Schweißbro-

ter können darüber hinaus mithilfe des 3D-Druckverfahrens WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) Details (Steifen), Knotenpunkte, Bauteile (insbesondere mit außergewöhnlichen Geometrien) und ganze Bauwerke herstellen. Der Schweißdraht wird hierbei als Druckwerkstoff eingesetzt, sodass es sich im Prinzip um eine Auftragsschweißung handelt. Hierdurch kann nicht nur die Logistik im Fertigungsbetrieb vereinfacht werden, da Steifen oder andere Anschlusselemente nicht mehr vorab zugeschnitten und an den Zusammenbauplatz geliefert werden müssen. Es können sich auch neue, dem Kraftfluss entsprechende Geometrien ergeben. Dadurch wird ein ganz anderes Konstruieren als bisher ermöglicht. Der vorliegende Beitrag zeigt, neben einem Überblick über das WAAM und seine Besonderheiten, einige Fertigungsbeispiele aus Forschungsprojekten sowie sich aus der Optimierung ergebende neue Lösungen für alte Probleme.

Ganz herzlich möchte ich mich, auch im Namen des Verlags Ernst & Sohn, bei allen Autor:innen für ihre engagierte Mitarbeit bedanken, die in diesen umfassenden und qualitativ hochwertigen Beiträgen resultiert. Den Mitarbeiter:innen des Verlags Ernst & Sohn und im Institut für Konstruktion und Entwurf an der Universität Stuttgart danke ich besonders für ihren großen Einsatz, der das Erscheinen des diesjährigen Stahlbau-Kalenders möglich macht.

Am **Freitag, den 04. Juli 2025** wird der Stahlbau-Kalender-Tag 2025 erneut in der FOLDERHALLE in Leinfelden-Echterdingen stattfinden. Zu den Vorträgen der Autor:innen der diesjährigen Beiträge mit anschließenden Diskussionen möchten wir alle Interessierten ganz herzlich einladen. Die kontinuierlich rege Teilnahme der letzten zwei Jahrzehnte zeigt den Erfolg dieses fachlichen persönlichen Austausches. Daher freuen wir uns auch in diesem Jahr über Ihre Teilnahme.

Stuttgart, Januar 2025
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autor:innenverzeichnis XXIII

1 Stahlbaunormen – DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen 1

Dieter Ungermann, Stephan Schneider, Ulrike Kuhlmann

Anmerkung zum Abdruck von DIN EN 1993-1-8	5	2.5	Annahmen für die Berechnung	15
DIN EN 1993-1-8		2.6	Schubbeanspruchte Anschlüsse mit Stoßbelastung, Belastung mit Schwingungen oder mit Lastumkehr	15
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen	5	2.7	Exzentrizitäten in Knotenpunkten	15
Nationales Vorwort	5	3	Schrauben-, Niet- und Bolzenverbindungen	16
Hintergrund des Eurocode-Programms	5	3.1	Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben	16
Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes	6	3.1.1	Allgemeines	16
Nationale Fassungen der Eurocodes	7	3.1.2	Vorgespannte Schrauben	17
Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (EN und ETAG)	7	3.2	Niete	17
Nationaler Anhang zu EN 1993-1-8	7	3.3	Ankerschrauben	17
1 Allgemeines	7	3.4	Kategorien von Schraubenverbindungen	17
1.1 Anwendungsbereich	7	3.4.1	Scherverbindungen	17
1.2 Normative Verweisungen	7	3.4.2	Zugverbindungen	19
1.2.1 Bezugsnormengruppe 1: Schweißgeeignete Baustähle	7	3.5	Rand- und Lochabstände für Schrauben und Niete	19
1.2.2 Bezugsnormengruppe 2: Toleranzen, Maße und technische Lieferbedingungen	8	3.6	Tragfähigkeiten einzelner Verbindungsmittel	20
1.2.3 Bezugsnormengruppe 3: Hohlprofile	8	3.6.1	Schrauben und Niete	20
1.2.4 Bezugsnormengruppe 4: Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben	8	3.6.2	Injektionsschrauben	25
1.2.5 Bezugsnormengruppe 5: Schweißzusatzmittel und Schweißen	9	3.6.2.1	Allgemeines	25
1.2.6 Bezugsnormengruppe 6: Niete	9	3.6.2.2	Beanspruchbarkeiten	25
1.2.7 Bezugsnormengruppe 7: Bauausführung von Stahlbauten	9	3.7	Gruppen von Verbindungsmitteln	26
1.3 Unterscheidung nach Grundsätzen und Anwendungsregeln	9	3.8	Lange Anschlüsse	27
1.4 Begriffe	9	3.9	Gleitfeste Verbindungen mit hochfesten 8.8 oder 10.9 Schrauben	27
1.4.1 Grundkomponente (eines Anschlusses)	9	3.9.1	Gleitwiderstand	27
1.4.2 Verbindung	9	3.9.2	Kombinierte Scher- und Zugbeanspruchung	28
1.4.3 angeschlossenes Bauteil	9	3.9.3	Hybridverbindungen	28
1.4.4 Anschluss	10	3.10	Lochabminderungen	28
1.4.5 Anschlusskonfiguration	10	3.10.1	Allgemeines	28
1.4.6 Rotationskapazität	10	3.10.2	Blockversagen von Schraubengruppen	28
1.4.7 Rotationssteifigkeit	10	3.10.3	Einseitig angeschlossene Winkel und andere unsymmetrisch angeschlossene Bauteile unter Zugbelastung	29
1.4.8 Kennwerte (eines Anschlusses)	10	3.10.4	Anschlusswinkel für indirekten Anschluss	29
1.4.9 ebener Anschluss	10	3.11	Abstützkräfte	30
1.5 Formelzeichen	10	3.12	Kräfteverteilung auf Verbindungsmittel im Grenzzustand der Tragfähigkeit	30
2 Grundlagen der Tragwerksplanung	14	3.13	Bolzenverbindungen	30
2.1 Annahmen	14	3.13.1	Allgemeines	30
2.2 Allgemeine Anforderungen	14	3.13.2	Bemessung der Bolzen	32
2.3 Schnittgrößen	14			
2.4 Beanspruchbarkeit von Verbindungen	14			

4	Schweißverbindungen	32	6	Anschlüsse mit H- oder I-Querschnitten	52
4.1	Allgemeines	32	6.1	Allgemeines	52
4.2	Schweißzusätze	33	6.1.1	Geltungsbereich	52
4.3	Geometrie und Abmessungen	33	6.1.2	Kenngrößen	52
4.3.1	Schweißnahtarten	33	6.1.2.1	Momenten-Rotations-Charakteristik	52
4.3.2	Kehlnähte	33	6.1.2.2	Momententragfähigkeit	55
4.3.2.1	Allgemeines	33	6.1.2.3	Rotationssteifigkeit	55
4.3.2.2	Unterbrochen geschweißte Kehlnähte	34	6.1.2.4	Rotationskapazität	55
4.3.3	Schlitznähte	34	6.1.3	Grundkomponenten eines Anschlusses	56
4.3.4	Stumpfnähte	35	6.2	Tragfähigkeit	56
4.3.5	Lochschweißungen	35	6.2.1	Schnittgrößen	56
4.3.6	Hohlkehlnähte	35	6.2.2	Querkräfte	56
4.4	Schweißen mit Futterblechen	35	6.2.3	Biegemomente	58
4.5	Beanspruchbarkeit von Kehlnähten	35	6.2.4	Äquivalenter T-Stummel mit Zugbeanspruchung	59
4.5.1	Schweißnahtlänge	35	6.2.4.1	Allgemeines	59
4.5.2	Wirksame Nahtdicke	35	6.2.4.2	Einzelne Schraubenreihen, Schrauben- gruppen und Gruppen von Schrauben- reihen	61
4.5.3	Tragfähigkeit von Kehlnähten	37	6.2.4.3	Verstärkungsbleche	62
4.5.3.1	Allgemeines	37	6.2.5	Äquivalenter T-Stummel mit Druckbeanspruchung	62
4.5.3.2	Richtungsbezogenes Verfahren	37	6.2.6	Tragfähigkeit der Grundkomponenten	65
4.5.3.3	Vereinfachtes Verfahren	38	6.2.6.1	Stützensteg mit Schubbeanspruchung	65
4.6	Tragfähigkeit von Schlitznähten	38	6.2.6.2	Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck	65
4.7	Tragfähigkeit von Stumpfnähten	39	6.2.6.3	Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug	68
4.7.1	Durchgeschweißte Stumpfnähte	39	6.2.6.4	Stützenflansch mit Biegebeanspruchung	69
4.7.2	Nicht durchgeschweißte Stumpfnähte	39	6.2.6.5	Stirnblech mit Biegebeanspruchung	70
4.7.3	T-Stöße	39	6.2.6.6	Flanschwinkel mit Biegebeanspruchung	74
4.8	Tragfähigkeit von Lochschweißungen	39	6.2.6.7	Trägerflansch und -steg mit Druck- beanspruchung	74
4.9	Verteilung der Kräfte	39	6.2.6.8	Trägersteg mit Zugbeanspruchung	75
4.10	Stei fenlose Anschlüsse an Flansche	40	6.2.6.9	Beton oder Mörtel mit Druck- beanspruchung	75
4.11	Lange Anschlüsse	41	6.2.6.10	Fußplatte mit Biegebeanspruchung infolge Druck	75
4.12	Exzentrisch belastete einseitige Kehlnähte oder einseitige nicht durchgeschweißte Stumpfnähte	41	6.2.6.11	Fußplatte mit Biegebeanspruchung infolge Zug	75
4.13	Einschenkli ger Anschluss von Winkelprofilen	41	6.2.6.12	Ankerschrauben mit Zug- beanspruchung	75
4.14	Schweißen in kaltverformten Bereichen	42	6.2.7	Biegetragfähigkeit von Träger-Stützen- anschlüssen und Stößen	76
5	Tragwerksberechnung, Klassifizierung und statische Modelle	43	6.2.7.1	Allgemeines	76
5.1	Tragwerksberechnung	43	6.2.7.2	Träger-Stützenanschlüsse mit geschraubten Stirnblechverbindungen	79
5.1.1	Allgemeines	43	6.2.8	Tragfähigkeit von Stützenfüßen mit Fußplatten	79
5.1.2	Elastische Tragwerksberechnung	43	6.2.8.1	Allgemeines	79
5.1.3	Starr-plastische Tragwerksberechnung	44	6.2.8.2	Stützenfußverbindung unter reiner Normalkraftbeanspruchung	81
5.1.4	Elastisch-plastische Tragwerks- berechnung	45	6.2.8.3	Stützenfußverbindung mit Normalkraft- und Biegebeanspruchung	81
5.1.5	Berechnung von Fachwerkträgern	45	6.3	Rotationssteifigkeit	82
5.2	Klassifizierung von Anschlüssen	47	6.3.1	Grundmodell	82
5.2.1	Allgemeines	47	6.3.2	Steifigkeitskoeffizienten für die Grund- komponenten eines Anschlusses	82
5.2.2	Klassifizierung nach der Steifigkeit	47			
5.2.2.1	Allgemeines	47			
5.2.2.2	Gelenkige Anschlüsse	47			
5.2.2.3	Starre Anschlüsse	47			
5.2.2.4	Verformbare Anschlüsse	47			
5.2.2.5	Grenzkriterien	47			
5.2.3	Klassifizierung nach der Tragfähigkeit	49			
5.2.3.1	Allgemeines	49			
5.2.3.2	Gelenkige Anschlüsse	49			
5.2.3.3	Volltragfähige Anschlüsse	49			
5.2.3.4	Teiltragfähige Anschlüsse	49			
5.3	Statisches Modell für Träger- Stützenanschlüsse	50			

- 6.3.3 Stirnblechanschlüsse mit zwei oder mehr Schraubenreihen mit Zugbeanspruchung 86
- 6.3.3.1 Allgemeines Verfahren 86
- 6.3.3.2 Vereinfachtes Verfahren für überstehende Stirnbleche mit zwei Schraubenreihen mit Zugbeanspruchung 86
- 6.3.4 Stützenfüße 86
- 6.4 Rotationskapazität 87
- 6.4.1 Allgemeines 87
- 6.4.2 Geschraubte Anschlüsse 87
- 6.4.3 Geschweißte Anschlüsse 88
- 7 Anschlüsse mit Hohlprofilen 88
- 7.1 Allgemeines 88
- 7.1.1 Geltungsbereich 88
- 7.1.2 Anwendungsbereich 88
- 7.2 Berechnung und Bemessung 90
- 7.2.1 Allgemeines 90
- 7.2.2 Versagensformen von Anschlüssen mit Hohlprofilen 91
- 7.3 Schweißnähte 91
- 7.3.1 Tragfähigkeit 91
- 7.4 Geschweißte Anschlüsse von KHP-Bauteilen 95
- 7.4.1 Allgemeines 95
- 7.4.2 Ebene Anschlüsse 95
- 7.4.3 Räumliche Anschlüsse 101
- 7.5 Geschweißte Anschlüsse von KHP- oder RHP-Streben an RHP-Gurtstäbe 101
- 7.5.1 Allgemeines 101
- 7.5.2 Ebene Anschlüsse 102
- 7.5.2.1 Unverstärkte Anschlüsse 102
- 7.5.2.2 Verstärkte Anschlüsse 111
- 7.5.3 Räumliche Anschlüsse 113
- 7.6 Geschweißte Anschlüsse von KHP- oder RHP-Streben an I- oder H-Profil Gurtstäbe 113
- 7.7 Geschweißte Anschlüsse von KHP- oder RHP-Streben an U-Profil Gurtstäbe 116
- Anhang NA.A (normativ) 119
- Ergänzende Vorspannverfahren zu DIN EN 1090-2 119
- Anhang NA.B (normativ) 120
- Gussteile, Schmiedeteile und Bauteile aus Vergütungsstählen 120
- Literatur zu den Kommentaren 123
- 2 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Normen und Bescheide im Metallbau 125**
Karsten Kathage, Christoph Ortmann
- 1 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) 127
- 2 Normen und Richtlinien für den Metallbau 179
- 3 Bescheide des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt (Stand: Juli 2024) 184
- 3.1 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen/ allgemeine Bauartgenehmigungen 184
- 3.1.1 Sachgebiet Verbundbau 184
- 3.1.2 Sachgebiet Metallbau – Werkstoffe 186
- 3.1.3 Sachgebiet Metallbau – Metallbauarten 188
- 3.1.4 Sachgebiet Gerüste 218
- 3.2 Europäische Technische Bewertungen 231
- 3 Neue Bemessungskonzepte für den Stahlleichtbau 243**
Bettina Brune, Tim Lemański, Dieter Ungermann
- 1 Einführung 247
- 1.1 Stahlleichtbau 247
- 1.2 Herstellung von kaltgeformten Stahlprofilen für den Stahlleichtbau 248
- 1.2.1 Allgemeines 248
- 1.2.2 Walzprofilierung 248
- 1.2.3 Abkanten 249
- 1.3 Bemessung im Stahlleichtbau 249
- 1.3.1 Zur Beanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlbauteilen 249
- 1.3.1.1 Spezifika und relevante Einflussparameter 249
- 1.3.1.2 Plattenbeulen 251
- 1.3.1.3 Forminstabilität 251
- 1.3.1.4 Globale Instabilitätsformen 252
- 1.3.2 DIN EN 1993-1-3 und prEN 1993-1-3 253
- 1.3.2.1 Einführung 253
- 1.3.2.2 Methode der wirksamen Breiten zur Berücksichtigung des Plattenbeulens 253
- 1.3.2.3 Methode der wirksamen Blechdicken zur Berücksichtigung der Forminstabilität 254
- 1.3.2.4 Beanspruchbarkeit von dünnwandigen Querschnitten unter Berücksichtigung der Interaktion von Plattenbeulen und Forminstabilität 255
- 1.3.2.5 Beanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlbauteilen unter Berücksichtigung von Biegeknicke und Biegedrillknicken 255
- 1.3.2.6 Beurteilung der Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-3 und prEN 1993-1-3 257

1.3.3	AISI – Direct Strength Method	259	2.2.4	Bauteile ohne Perforationen unter Biegebeanspruchung	273
1.3.3.1	Einführung	259	2.2.4.1	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Plattenbeulen (aus AISI S100-16, F3.2)	273
1.3.3.2	Beanspruchbarkeit bei axialer Druckbeanspruchung	260	2.2.4.2	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Plattenbeulen mit Berücksichtigung plastischer Reserven (aus AISI S100-16, F3.2.3)	273
1.3.3.3	Beanspruchbarkeit bei Biegebeanspruchung	262	2.2.4.3	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Forminstabilität (aus AISI S100-16, F4.1)	274
1.3.3.4	Bemessungswerte der Beanspruchbarkeit bei Druck- und/oder Biegebeanspruchung	263	2.2.4.4	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Forminstabilität mit Berücksichtigung plastischer Reserven (aus AISI S100-16, F4.3)	274
1.3.3.5	Sicherheitskonzept der Bemessung nach AISI S100-16	263	2.2.4.5	Biegemomentenbeanspruchbarkeit des Bauteils unter Berücksichtigung von Biegedrillknicken (nach prEN 1993-1-3)	274
1.3.3.6	Beurteilung der Direct Strength Method DSM nach AISI S100-16	265	2.2.4.6	Biegemomentenbeanspruchbarkeit des Bauteils auf Biegedrillknicken mit Berücksichtigung plastischer Reserven (aus AISI S100-16, F2.4.2)	275
1.3.4	Vergleich der Normenkonzepte – DIN EN 1993-1-3 bzw. prEN 1993-1-3 und Direct Strength Method DSM nach AISI S100-16	265	2.2.5	Bauteile mit Perforationen unter Biegebeanspruchung	275
1.4	Forschungen zur Bemessung im Stahlleichtbau	267	2.2.5.1	Biegemomentenbeanspruchbarkeit infolge Plattenbeulen (aus AISI S100-16, F3.2.2)	275
1.5	Forschungsaktivitäten zum Stahlleichtbau im ECCS TC7 TWG7.5	268	2.2.5.2	Biegemomentenbeanspruchbarkeit infolge Forminstabilität (aus AISI S100-16, F4.2)	276
2	Neues, prEN 1993-1-3 und AISI Direct Strength Method DSM kombinierendes, eurocodekonformes Bemessungskonzept für kaltgeformte, dünnwandige Stahlbauteile	269	2.2.5.3	Biegemomentenbeanspruchbarkeit des Bauteils infolge Biegedrillknicken (nach prEN 1993-1-3)	276
2.1	Einführung	269	2.2.6	Bauteile mit kombinierter Beanspruchung aus Druck und Biegung	276
2.2	Neue Stabilitätsnachweise für dünnwandige kaltgeformte Bauteile	270	3	Experimentelle Forschungen zur Druckbeanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlbauteilen	277
2.2.1	Grundlagen des neuen kombinierten Bemessungskonzepts	270	3.1	Zielsetzung	277
2.2.1.1	Allgemeines	270	3.2	Experimentelle Untersuchungen	277
2.2.1.2	Anpassungsfaktoren	270	3.2.1	Versuchsprogramm	277
2.2.1.3	Ausnutzung von (teil)plastischen Querschnittsreserven	271	3.2.1.1	Versuchsserien und Querschnitte	277
2.2.2	Bauteile ohne Perforationen unter axialer Druckbeanspruchung	271	3.2.1.2	Werkstoffprüfungen	279
2.2.2.1	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Plattenbeulen (aus AISI S100-16, E3.2)	271	3.2.1.3	Numerische Voruntersuchung zur Spezifikation von Prüflängen in Abhängigkeit möglicher Instabilitätsformen	281
2.2.2.2	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Forminstabilität (aus AISI S100-16, E4.1)	271	3.2.1.4	Prüflängen in Stützendruckversuchen	282
2.2.2.3	Beanspruchbarkeit des Bauteils unter Berücksichtigung von Biegeknicen und Biegedrillknicken (nach prEN 1993-1-3)	272	3.2.1.5	Versuchsmatrix	283
2.2.3	Bauteile mit Perforationen unter axialer Druckbeanspruchung	272	3.2.2	Versuchsaufbau	283
2.2.3.1	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Plattenbeulen (aus AISI S100-16, E3.2)	272	3.2.3	Messtechnik	284
2.2.3.2	Querschnittsbeanspruchbarkeit infolge Forminstabilität (aus AISI S100-16, E4.2)	273	3.2.4	Messung von geometrischen Imperfektionen	285
2.2.3.3	Beanspruchbarkeit des Bauteils unter Berücksichtigung von Biegeknicen und Biegedrillknicken (nach prEN 1993-1-3)	273	3.2.5	Messung von physikalischen Imperfektionen (Eigenspannungen)	285
			3.2.6	Versuchsdurchführung	286
			3.2.7	Versuchsergebnisse	286
			3.2.7.1	Druckbeanspruchbarkeit von kaltgeformten Bauteilen	286

- 3.2.7.2 Analyse von Instabilitätsformen 286
- 3.2.7.3 Analyse zur Verschiebung der Druckspannungsergebnisse infolge Querschnitts- und Bauteilinstabilitäten 294
- 3.3 Validierung des kombinierten Bemessungsverfahrens 298
 - 3.3.1 Vergleichsrechnungen für die geprüften Bauteile mit axialer Druckbeanspruchung 298
 - 3.3.1.1 Grundlagen 298
 - 3.3.1.2 Bemessung von nicht perforierten Stahlbauteilen 299
 - 3.3.1.3 Bemessung von perforierten Stahlbauteilen 300
 - 3.3.2 Resümee 303
- 4 Experimentelle Forschungen zu kaltgeformten Stahlbauteilen unter Biegebeanspruchung 303
 - 4.1 Zielsetzung 303
 - 4.2 Experimentelle Untersuchungen 304
 - 4.2.1 Versuchsprogramm 304
 - 4.2.2 Versuchsaufbau 305
 - 4.2.2.1 Versuchsaufbau für die Prüfreihen A und E (C-, Z-, Ω -förmige Profile) 306
 - 4.2.2.2 Versuchsaufbau für die Prüfreihen B und C 307
 - 4.2.3 Messtechnik 307
 - 4.2.4 Messung von geometrischen Imperfektionen 308
 - 4.2.5 Messung von physikalischen Imperfektionen (Eigenspannungen) 308
 - 4.2.6 Versuchsdurchführung 309
 - 4.2.7 Experimentelle Kurzstudie zur Lasteinleitung im „Doppelversuch“ 309
 - 4.2.8 Versuchsergebnisse 311
 - 4.2.8.1 Biegemomentenbeanspruchbarkeit 311
 - 4.2.8.2 Exemplarische Stabilitätsanalyse – Biegedrillknicken 314
 - 4.2.8.3 Exemplarische Stabilitätsanalyse – Forminstabilität 315
 - 4.3 Validierung des kombinierten Bemessungsverfahrens 316
 - 4.3.1 Vergleichsrechnung für die geprüften Bauteile bei Biegemomentenbeanspruchung (um die Symmetrieachse) 316
 - 4.3.1.1 Grundlagen 316
 - 4.3.1.2 Bemessung von nicht perforierten Stahlbauteilen 317
 - 4.3.1.3 Bemessung von perforierten Stahlbauteilen 318
 - 4.3.2 Resümee 318
- 5 Experimentelle Forschungen zu kaltgeformten Stahlbauteilen unter Druck- und Biegebeanspruchung 320
 - 5.1 Zielsetzung 320
 - 5.2 Experimentelle Untersuchungen 320
 - 5.2.1 Versuchsprogramm 320
 - 5.2.2 Versuchsaufbau 320
 - 5.2.3 Messtechnik 322
 - 5.2.4 Messung von geometrischen Imperfektionen 322
 - 5.2.5 Messung von physikalischen Imperfektionen (Eigenspannungen) 322
 - 5.2.6 Versuchsdurchführung 322
 - 5.2.7 Versuchsergebnisse 322
 - 5.2.7.1 Druckbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Biegebeanspruchung 322
 - 5.2.7.2 Exemplarische Stabilitätsanalysen 324
 - 5.3 Validierung des kombinierten Bemessungsverfahrens 328
 - 5.3.1 Vergleichsrechnungen für die geprüften Bauteile bei interaktiver Druck- und Biegebeanspruchung 328
 - 5.3.1.1 Grundlagen 328
 - 5.3.1.2 Bemessung von nicht perforierten Stahlbauteilen 329
 - 5.3.1.3 Bemessung von perforierten Stahlbauteilen 330
 - 5.3.2 Resümee 331
- 6 Numerische Simulationen 333
 - 6.1 Zielsetzung 333
 - 6.2 Numerische Simulationen zum Tragverhalten von kaltgeformten Stahlbauteilen unter Druckbeanspruchung 333
 - 6.2.1 FE-Modellierung der Versuchskörper 333
 - 6.2.2 Werkstoffmodell 334
 - 6.2.3 Imperfektionen 335
 - 6.2.3.1 Geometrische Imperfektionen 335
 - 6.2.3.2 Physikalische Imperfektionen 336
 - 6.2.4 Validierung des numerischen Modells 336
 - 6.2.4.1 Allgemeines 336
 - 6.2.4.2 Einfluss der Kaltverfestigung 337
 - 6.2.5 Modellannahmen für FE-Parameterstudien 337
 - 6.2.5.1 Allgemeines 337
 - 6.2.5.2 Geometrische Imperfektionen 338
 - 6.2.5.3 Einfluss unterschiedlicher Imperfektionsansätze 339
 - 6.2.6 FE-Parameterstudien zur Druckbeanspruchbarkeit von C- und Ω -förmigen Stahlbauteilen 340
 - 6.3 Numerische Simulationen zum Tragverhalten von kaltgeformten Stahlbauteilen unter Biegebeanspruchung um die Symmetrieachse 341
 - 6.3.1 Modellierung der Versuchskörper 341
 - 6.3.2 Validierung des numerischen Modells 342
 - 6.3.3 Modellannahmen für numerische Parameterstudien an kaltgeformten Stahlbauteilen unter Biegebeanspruchung 344
 - 6.3.3.1 Allgemeines 344
 - 6.3.3.2 Geometrische Imperfektionen 345
 - 6.3.4 FE-Parameterstudien zur Biegebeanspruchbarkeit von kaltgeformten Profilen 345
 - 6.4 Resümee 347

7	Bemessungsbeispiele	347	7.2.5	Querschnittsbeanspruchbarkeit des biegebeanspruchten, kaltgeformten Stahlprofils	353
7.1	Bemessungsbeispiel 1: C-Profil unter axialer Druckbeanspruchung	347	7.2.6	Bauteilbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtinstabilität	353
7.1.1	Einführung	347	7.3	Bemessungsbeispiel 3: C-Profil unter kombinierte Beanspruchung aus Druckkraft und einaxialer Biegung um die Symmetrieachse	354
7.1.2	Eingangsparameter	348	7.3.1	Einführung	354
7.1.3	Querschnittsbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung des Plattenbeulens	351	7.3.2	Grundlagen der Bemessung	354
7.1.4	Querschnittsbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Forminstabilität des Querschnitts	351	7.3.3	Interaktionsparameter für den Bauteilnachweis nach dem kombinierten Bemessungsverfahren bzw. prEN 1993-1-3	354
7.1.5	Querschnittsbeanspruchbarkeit des druckbeanspruchten, kaltgeformten Profils	351	7.3.4	Bauteilbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtinstabilität	355
7.1.6	Bauteilbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtinstabilität	351	8	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	355
7.2	Bemessungsbeispiel 2: C-Profil unter Biegebeanspruchung	352	8.1	Zusammenfassung und Fazit	355
7.2.1	Einführung	352	8.2	Ausblick	356
7.2.2	Bestimmung der Eingangsparameter	352		Literatur	356
7.2.3	Querschnittsbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung des Plattenbeulens	353			
7.2.4	Querschnittsbeanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Forminstabilität des Querschnitts	353			
4	Bemessung und Konstruktion von Sandwichelementen – Kommentare zur prEN 1993-7	361			
	Bernd Naujoks, Niklas Ardelmann, Fabian Kischkewitz				
1	Vorbemerkungen	365	6	Dauerhaftigkeit	371
0.3	Einleitung zu EN 1993-7	365	7	Tragwerksberechnung	371
1.1	Anwendungsbereich von EN 1993-7	365	7.1	Berechnungsverfahren	371
1.2	Annahmen	365	7.1.1	Allgemein	371
2	Normative Verweisungen	366	7.1.2	Tragwerksberechnung nach der Elastizitätstheorie	371
3	Begriffe, Definitionen und Symbole	366	7.1.3	Tragwerksberechnung nach der Plastizitätstheorie	371
3.1	Begriffe und Definitionen	366	7.2	Grundsätze für Sandwichelemente	371
3.1.1	Geometrische Eigenschaften	366	7.2.1	Sandwichelemente mit ebenen oder leicht profilierten Deckschichten	371
4	Grundlagen für die Tragwerksplanung	367	7.2.2	Sandwichelemente mit einer oder zwei profilierten Deckschichten	372
4.1	Anforderungen	367	7.3	Grundsätze für Querschnittsnachweise	372
4.2	Prinzipien der Bemessung nach Grenzzuständen	367	7.3.1	Allgemein	372
4.3	Basisvariablen	367	7.3.2	Spannungen auf Biegung beanspruchter Sandwichelemente	373
4.3.1	Einwirkungen und Umwelteinflüsse	367	7.3.2.1	Sandwichelemente mit ebenen oder leicht profilierten Deckschichten auf beiden Seiten	373
4.3.1.1	Ständige Einwirkungen	367	7.3.2.2	Sandwichelemente mit einer profilierten Deckschicht und einer ebenen oder leicht profilierten Deckschicht	374
4.3.1.2	Veränderliche Einwirkungen	367	7.3.2.3	Sandwichelemente mit zwei profilierten Deckschichten	374
4.3.1.3	Temperatureinwirkungen	367	7.3.3	Schubspannungen in Sandwichelementen	374
4.3.1.4	Erdbebeneinwirkungen	368	7.3.3.1	Schubspannungen im Kern	374
4.4	Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten	368	7.3.3.2	Schubspannung in der Deckschicht oder den Deckschichten	374
4.4.1	Bemessungswerte von Einwirkungen	368	7.3.4	Druckspannung im Kern am Auflager	374
4.4.2	Kombination von Einwirkungen	368			
4.4.3	Bemessungswerte der Werkstoffeigenschaften	369			
5	Materialien	370			
5.1	Allgemeines	370			
5.2	Deckschichtmaterial	370			
5.3	Kernmaterial	370			
5.3.1	Kriechen	370			

- 7.4 Interaktion von Knitterspannung und Auflagerkräften oder Linienlasten senkrecht zur Spannrichtung 374
- 7.5 Elemente mit Öffnungen 375
- 7.6 Axial belastete Elemente 375
- 7.7 Elemente mit Linien- oder Punktlasten 375
- 7.8 Elemente unter Erdbebenbeanspruchung 376
- 7.9 Aussteifende Wirkung von Sandwich-elementen zur Stabilisierung der Unterkonstruktion 376
- 7.10 Elemente unter Torsionsbeanspruchung 376
- 8 Grenzzustand der Tragfähigkeit 377
- 8.1 Allgemein 377
- 8.2 Querschnittswiderstand von Sandwichelementen 377
- 8.2.1 Deckschichten 377
- 8.2.1.1 Fließen 377
- 8.2.1.2 Knittern 377
- 8.2.1.3 Einfluss von Querdruck auf die Knitterspannung 378
- 8.2.1.4 Schubversagen einer profilierten Deckschicht 378
- 8.2.1.5 Widerstand einer profilierten Deckschicht bei zusätzlicher Beanspruchung infolge lokaler Querlast oder Auflagerkraft 378
- 8.2.2 Kern 378
- 8.2.2.1 Schubfestigkeit 378
- 8.2.2.2 Widerstand am Auflager 379
- 8.3 Punkt- und Linienlasten 380
- 8.3.1 Linienlasten senkrecht zur Spannrichtung 380
- 8.3.2 Punktlasten ohne Abminderung der Knitterspannung 380
- 8.3.3 Linien- oder Punktlasten mit Abminderung der Knitterspannung 380
- 8.4 Globales Knicken eines axial belasteten Elements 380
- 8.5 Bemessung der Verbindungsmittel 381
- 9 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 382
- 9.1 Allgemein 382
- 9.2 Querschnittswiderstand von Sandwichelementen 382
- 9.2.1 Deckschichten 382
- 9.2.1.1 Fließen 382
- 9.2.1.2 Knittern 382
- 9.2.1.3 Einfluss von Querdruck auf die Knitterspannung 382
- 9.2.1.4 Schubversagen einer profilierten Deckschicht 383
- 9.2.1.5 Widerstand einer profilierten Deckschicht bei zusätzlicher Beanspruchung infolge lokaler Querlast oder Auflagerkraft 383
- 9.2.2 Kern 383
- 9.2.2.1 Schubfestigkeit 383
- 9.2.2.2 Widerstand am Auflager 384
- 9.3 Punkt- und Linienlasten 384
- 9.3.1 Knittern 384
- 9.3.2 Berechnung der Verformungen 384
- 9.4 Kopfverformung des Verbindungsmittels 384
- 9.5 Begrenzung der Durchbiegung 384
- 10 Anhänge zur DIN EN 1993-7 385
- Anhang B (informativ)
- Elemente mit Punkt- oder Linienlasten 385
- B.1 Zweck dieses Anhangs 385
- B.2 Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen 385
- B.3 Effektive Breite für Punkt- und Längslinienlasten 385
- B.3.1 Allgemein 385
- B.3.2 Effektive Breiten 386
- B.3.3 Reduzierte effektive Breite aufgrund der Nähe zwischen Lasteinleitung und Längsfugen 386
- B.3.4 Mehrere Punktlasten 386
- Anhang C (informativ)
- Elemente mit Öffnungen 389
- C.1 Zweck dieses Anhangs 389
- C.2 Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen 389
- C.3 Bestimmung der Tragfähigkeit eines Sandwichelements mit Öffnung 389
- C.3.1 Sandwichelemente mit ebenen und leicht profilierten Deckschichten 389
- C.3.1.1 Knittern 389
- C.3.1.2 Schubfestigkeit 389
- C.3.2 Sandwichelemente mit profilierten Deckschichten 390
- C.3.2.1 Knittern 390
- C.3.2.2 Schubfestigkeit 390
- Anhang D (informativ)
- Versuchsgestützte Bemessung von Sandwich-elementen und deren Befestigungselementen unter Erdbebenbelastung 391
- D.1 Zweck dieses Anhangs 391
- D.2 Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen 391
- D.3 Bemessung von Sandwichelementen unter Erdbebenbelastung 392
- D.3.1 Allgemein 392
- D.3.2 Bemessung der Verbindungsmittel 392
- D.3.2.1 In der Ebene (Scherkräfte) 392
- D.3.2.2 Senkrecht zur Ebene (Zugkräfte) 392
- D.4 Bestimmung der Erdbeben Tragfähigkeit der Elemente und deren Befestigungselementen mittels Prüfung 393
- D.4.1 Allgemein 393
- D.4.2 In der Ebene 393
- D.4.3 Senkrecht zur Ebene 394
- D.4.4 Anzahl der Prüfungen 395
- D.4.5 Prüfbericht 395

	Anhang M (informativ)	M.4	Verbindungsmittel	396
	Kennwerte für die Bemessung	M.5	Optionale Herstellerangaben	397
M.1	Zweck dieses Anhangs		Literatur [zur prEN 1993-7]	397
M.2	Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen		Literatur	398
M.3	Werkstoffeigenschaften			
5	Bemessung von Kranbahnen nach E DIN EN 1993-6:2024			399
	Mathias Euler, Ulrike Kuhlmann, Elena Sidorov, Tom Rudolph			
1	Einleitung	5	Einwirkungen auf Kranbahnträger	427
1.1	Notwendigkeit für kranbahnspezifische Bemessungsregeln	5.1	Notwendigkeit zur Überarbeitung von DIN EN 1991-3	427
1.2	Bautechnische Bestimmungen für Kranbahnen	5.2	Änderungen im Norm-Entwurf E DIN EN 1991-3	428
1.2.1	Aktuelle Normensituation	5.2.1	Wesentliche Grundzüge der Überarbeitung	428
1.2.2	Nächste Eurocode-Generation	5.2.2	Klassifizierung der Kraneinwirkungen für eine Ermüdungsbemessung der Kranunterstützung – Anhang A	430
1.3	Sicherheitstechnische Bestimmungen für Kranbahnen	5.2.3	Vereinfachte Berechnung der Einwirkungen ausgewählter Brückenkranen – Anhang B	430
1.4	Ziel des Beitrags	5.2.4	Einwirkungen aus Wandlaufkranen – Anhang C	430
1.5	Kranbahnspezifische Begriffe und Definitionen	5.3	Überblick zu den Einwirkungen auf Kranbahnträger	430
1.6	Abgrenzung von Kran und Kranbahn	5.4	Ständige Einwirkungen	431
1.7	Anwendungsbereich von E DIN EN 1993-6	5.5	Veränderliche Einwirkungen aus Kranbetrieb	431
2	Allgemeine Konstruktionsgrundsätze für Kranbahnen	5.5.1	Vorbemerkung	431
2.1	Vorbemerkung	5.5.2	Begriffe	432
2.2	Querschnitte von Kranbahnträgern	5.5.3	Schwingbeiwerte	433
2.2.1	Gewalzte Querschnitte mit und ohne Verstärkung	5.5.4	Vertikale Einwirkungen (Radlasten)	436
2.2.2	Zusammengesetzte Querschnitte	5.5.5	Massenkräfte infolge Beschleunigens und Bremsens beim Kranfahren	438
2.3	Auswahl von Kranschienen	5.5.6	Massenkräfte infolge Beschleunigens und Bremsens beim Katzfahren	440
2.4	Schienenstöße	5.5.7	Horizontalkräfte aus Schräglauf des Krans	441
2.5	Schienenbefestigung	5.5.8	Horizontalkräfte für Einschiene-katzbahnen	445
2.5.1	Überblick	5.5.9	Horizontalkräfte für Kranbahnen von Hängekranen	445
2.5.2	Starre Schienenbefestigung	5.5.10	Prüflasten	445
2.5.3	Halbelastische Schienenbefestigung	5.6	Sonstige veränderliche Einwirkungen	445
2.5.4	Elastische Schienenbefestigung	5.6.1	Nutzlasten	445
2.6	Kranbahnträgerauflager	5.6.2	Temperaturänderungen	446
2.7	Queraussteifung von Kranbahnen	5.6.3	Wind	446
2.8	Längsaussteifung von Kranbahnen	5.6.4	Schnee	447
2.9	Hinweise zu Kranbahnen von Hängekranen und Katzbahnen	5.7	Außergewöhnliche Einwirkungen aus Kranbetrieb	447
3	Sicherheits- und Nachweis-konzept von Eurocode 3	5.7.1	Vorbemerkung	447
3.1	Semi-probabilistisches Sicherheitskonzept	5.7.2	Pufferanprall des Krans	447
3.2	Eingangsgrößen und Nachweisformat	5.7.3	Pufferanprall der Laufkatze	450
3.3	Überleitung zu nachfolgenden Abschnitten	5.7.4	Kippen der Laufkatze	450
4	Werkstoffkennwerte	6	Einwirkungskombinationen	450
4.1	Charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitswerte	6.1	Lastgruppen für den Einzelkran	450
4.2	Anforderungen an Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung	6.1.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	450
4.3	Teilsicherheitsbeiwerte der Beanspruchbarkeit			

- 6.1.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 453
- 6.2 Einwirkungen mehrerer Krane 454
 - 6.2.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit 454
 - 6.2.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 456
- 6.3 Einwirkungskombinationen 456
 - 6.3.1 Vorbemerkung 456
 - 6.3.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit 456
 - 6.3.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 458
- 6.4 Beispiel 459
 - 6.4.1 Vorbemerkung 459
 - 6.4.2 Allgemeine Angaben 459
 - 6.4.3 Schwingbeiwerte 460
 - 6.4.4 Vertikale Einwirkungen aus Kranbetrieb 461
 - 6.4.5 Horizontale Einwirkungen aus Kranbetrieb 462
 - 6.4.6 Pufferanprall des Krans 464
 - 6.4.7 Pufferanprall der Laufkatze 465
 - 6.4.8 Zusammenstellung 465
- 7 Tragwerksberechnung 468
 - 7.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit 468
 - 7.1.1 Ständige und vorübergehende Bemessungssituation 468
 - 7.1.2 Bemessungssituation mit Ermüdung 469
 - 7.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 469
 - 7.3 Annahmen zum statischen System 469
 - 7.3.1 Imperfektionen und Exzentrizitäten 469
 - 7.3.2 Räumliche Tragwerksberechnung 470
 - 7.3.3 Vereinfachte Tragwerksberechnung bei offenen Querschnitten 471
 - 7.3.4 Vereinfachte Tragwerksberechnung bei Kastenquerschnitten 473
 - 7.3.5 Mitwirkung und Abnutzung der Kranschienen 473
 - 7.4 Schnittgrößen und Verformungen aus globaler Biegung und Querkraftschub 474
 - 7.4.1 Vorbemerkung 474
 - 7.4.2 Schnittgrößen von Einfeldträgern 474
 - 7.4.3 Schnittgrößen von Zwei- und Mehrfeldträgern 476
 - 7.4.4 Durchbiegungen 477
 - 7.5 Berücksichtigung lokaler Beanspruchungen infolge der Radlasteinleitung 477
 - 7.6 Lokale Spannungen aus Radlasteinleitung in Trägerstegen von Kranbahnträgern für Laufkrane 478
 - 7.6.1 Überblick zur Berücksichtigung der lokalen Spannungen 478
 - 7.6.2 Zentrische Radlasteinleitung 478
 - 7.6.3 Exzentrische Radlasteinleitung 481
 - 7.7 Lokale Spannungen aus Radlasteinleitung in Unterflanschen von Kranbahnträgern für Hängekrane und Einschienekatzen 484
 - 7.7.1 Überblick zur Berücksichtigung der lokalen Spannungen 484
- 7.7.2 Weit auseinander liegende Räder 484
- 7.7.3 Dicht beieinander liegende Räder 486
- 7.8 Lokale Spannungen in Schienenschweißnähten 487
 - 7.8.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit mit Ausnahme von Ermüdung 487
 - 7.8.2 Bemessungssituation mit Ermüdung 488
- 8 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ohne Ermüdung) 490
 - 8.1 Überblick 490
 - 8.2 Querschnittsnachweise 490
 - 8.2.1 Vorbemerkung 490
 - 8.2.2 Schubspannungen 492
 - 8.2.3 Längsnormalspannungen aus Längskraft, Biegung und Torsion 493
 - 8.2.4 Zusammengesetzte Spannungen 495
 - 8.2.5 Maßgebende Nachweisstellen von I-Querschnitten 495
 - 8.3 Bauteilnachweise gegen Biegedrillknicken 495
 - 8.3.1 Vorbemerkung 495
 - 8.3.2 Vereinfachter Nachweis des Druckgurts als Druckstab 496
 - 8.3.3 Vereinfachter Bauteilnachweis 497
 - 8.3.4 Nachweis nach Theorie II. Ordnung 500
 - 8.4 Beulnachweise des Stegs infolge konzentrierter Lasteinleitung 500
 - 8.4.1 Überblick 500
 - 8.4.2 Methode der wirksamen Breiten 501
 - 8.4.3 Methode der reduzierten Spannungen 503
 - 8.4.4 Flanschinduziertes Stegbeulen 506
 - 8.5 Nachweise für Katzbahnträger und Kranbahnträger von Hängekranen 506
 - 8.5.1 Überblick 506
 - 8.5.2 Plastische Bemessung 506
 - 8.6 Bemessung von geklemmten Kranschienen mit A-Form 507
 - 8.7 Weitere Nachweise 507
 - 8.8 Beispiel 508
 - 8.8.1 Allgemeines 508
 - 8.8.2 Querschnittswerte 508
 - 8.8.3 Beanspruchungen 511
 - 8.8.4 Schnittgrößen 511
 - 8.8.5 Querschnittsklassifizierung 513
 - 8.8.6 Elastischer Nachweis der Schubspannungen 513
 - 8.8.7 Elastischer Nachweis der Längsspannungen 514
 - 8.8.8 Elastischer Nachweis bei zusammengesetzten Spannungen 515
 - 8.8.9 Beulnachweis des Stegs am Auflager 516
 - 8.8.10 Beulnachweis des Stegs infolge konzentrierter Lasteinleitung 517
 - 8.8.11 Alternativer Beulnachweis des Stegs infolge konzentrierter Lasteinleitung 519
 - 8.8.12 Flanschinduziertes Stegbeulen 521
 - 8.8.13 Biegedrillknicknachweis 521
 - 8.8.14 Zusammenfassung 526

- 9 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 527
 - 9.1 Schutzziele 527
 - 9.2 Einwirkungskombination 527
 - 9.3 Begrenzung der Verformungen und Verschiebungen 527
 - 9.3.1 Vertikale Verformungen 527
 - 9.3.2 Horizontale Verformungen 528
 - 9.4 Gewährleistung elastischen Verhaltens 531
 - 9.4.1 Vorbemerkung 531
 - 9.4.2 Allgemeiner Fall 532
 - 9.4.3 Kranbahnen von Brückenlaufkranen 533
 - 9.4.4 Katzbahnen und Kranbahnen von Hängekranen 533
 - 9.5 Begrenzung des Stegatmens 534
 - 9.6 Schwingungen des Unterflanschs 534
 - 9.7 Beispiel 535
 - 9.7.1 Allgemeines 535
 - 9.7.2 Begrenzung der Verformungen 535
 - 9.7.3 Nachweis elastischen Verhaltens 535
 - 9.7.4 Begrenzung des Stegatmens 535
 - 9.7.5 Schwingungen des Unterflanschs 536
 - 9.7.6 Zusammenfassung 536
- 10 Bemessung bei Ermüdung 537
 - 10.1 Einführung 537
 - 10.2 Ermüdung metallischer Werkstoffe 537
 - 10.3 Überblick über Bemessungskonzepte 538
 - 10.4 Ermüdungswiderstand für das Nennspannungskonzept 540
 - 10.4.1 Einflussgrößen des Ermüdungswiderstands 540
 - 10.4.2 Beschreibung und Ermittlung der Wöhlerkurve 545
 - 10.4.3 Konzept der normierten Wöhlerkurven 546
 - 10.5 Betriebsfestigkeitsnachweis 547
 - 10.6 Schädigungshypothese 548
 - 10.6.1 Hypothese der linearen Schadensakkumulation 548
 - 10.6.2 Modifizierte Hypothese der linearen Schadensakkumulation 548
 - 10.6.3 Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite 549
 - 10.7 Betriebsbeanspruchung von Kranen und Kranbahnen 550
 - 10.7.1 Vorbemerkung 550
 - 10.7.2 Beanspruchungskollektive von Kranen 551
 - 10.7.3 Einstufung von Kranen nach DIN EN 13001-3-1 553
 - 10.7.4 Bisherige Einstufung von Kranbahnen 554
 - 10.7.5 Neue Einstufung von Kranbahnen 555
 - 10.8 Ermüdungsnachweis 560
 - 10.8.1 Vorbemerkung 560
 - 10.8.2 Anwendungsbereich 560
 - 10.8.3 Bemessungsphilosophien 560
 - 10.8.4 Ermüdungseinwirkungen 561
 - 10.8.5 Ermittlung der Nennspannungen 562
 - 10.8.6 Nennspannungserhöhung durch makrogeometrische Einflüsse 564
 - 10.8.7 Nennspannungserhöhung infolge Radlasteinleitung 565
 - 10.8.8 Nennspannungsschwingbreiten 566
 - 10.8.9 Schadensäquivalenzbeiwert 567
 - 10.8.10 Voraussetzungen des Ermüdungsnachweises 569
 - 10.8.11 Ermüdungsnachweis für die einzelnen Beanspruchungen infolge eines Einzelkrans 571
 - 10.8.12 Ermüdungsnachweis der kombinierten Beanspruchung infolge eines Einzelkrans 572
 - 10.8.13 Ermüdungsnachweis bei zwei oder mehreren Kranen 573
 - 10.9 Kerbfalleinstufung kranbahn-spezifischer Konstruktionsdetails in E DIN EN 1993-1-9 574
 - 10.10 Berechnungsbeispiel 577
 - 10.10.1 Vorbemerkung 577
 - 10.10.2 Ermüdungseinwirkung 577
 - 10.10.3 Teilsicherheitsbeiwerte 577
 - 10.10.4 Vereinfachtes Ermüdungslastmodell 577
 - 10.10.5 Ermüdungsnachweis für Schienenbefestigung mittels Klemmplatten 577
 - 10.10.6 Ermüdungsnachweis der Oberflansch-Steg-Verbindung 579
 - 10.11 Zusätzliches Berechnungsbeispiel zu aufgeschweißten Flachschienen 584
 - 10.11.1 Vorgaben 584
 - 10.11.2 Vereinfachtes Ermüdungslastmodell 584
 - 10.11.3 Ermittlung der lokalen Druckspannungen aus Radlasteinleitung 584
 - 10.11.4 Schadensäquivalente Schwingbreite der lokalen Druckspannungen 584
 - 10.11.5 Ermittlung der lokalen Schubspannungen aus Radlasteinleitung 585
 - 10.11.6 Ermittlung der globalen Schubspannungen aus Trägerbiegung 585
 - 10.11.7 Schadenäquivalente Schwingbreiten der Schubspannungen 585
 - 10.11.8 Ermüdungsnachweis 585
- 11 Zusammenfassung 586
 - Literatur 586

6	Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken	597
	Daniel Pak, Max Spannaus, Max Gündel, Benno Hoffmeister, Christina Radlbeck, Dorina Siebert, Andreas Fellhauer, Reinhold Gitter	
1	Einleitung	601
2	Werkstoffwahl	602
2.1	Einführung	602
2.2	Mechanismen zur Festigkeitssteigerung	603
2.2.1	Allgemeines	603
2.2.2	Legierungsverfestigung	603
2.2.3	Kaltverfestigung/Verformungsverfestigung	604
2.2.4	Aushärtung/Ausscheidungshärtung	604
2.3	Legierungen	605
2.3.1	Hauptlegierungselemente	605
2.3.2	Bezeichnung von Knetlegierungen	605
2.3.3	Bezeichnung von Gusslegierungen	606
2.3.4	Nomenklatur in europäischen Aluminiumnormen	606
2.4	Zustände	607
2.4.1	Zustände von kaltverfestigten Legierungen (Hxx, O, F)	607
2.4.2	Zustände von aushärtbaren Legierungen (Txx)	607
2.4.3	Sonstige Zustände (F, W)	608
2.5	Werkstoffe in DIN EN 1999	608
2.5.1	Auswahl von Legierungen und Zuständen	608
2.5.2	Festigkeitsbereiche	609
2.5.3	Werkstoffe für den konstruktiven Ingenieurbau	610
2.6	Erläuterungen zu werkstofflichen Regelungen in DIN EN 1999	610
2.6.1	Allgemeines	610
2.6.2	Knetlegierungen	610
2.6.3	Gusslegierungen	613
2.6.4	Inhalt der Werkstofftabellen nach DIN EN 1999-1-1 – exemplarisch für Blechmaterial	615
2.7	Materialwahl	616
2.7.1	Bleche, Platten	616
2.7.2	Strangpressprofile	617
2.7.3	Guss- und -Schmiedestücke	620
2.8	Entwurfsbeeinflussende physikalische Eigenschaften	621
2.8.1	Allgemein wichtige Eigenschaften	621
2.8.2	Einfluss von Wärme	621
2.9	Nachhaltigkeit des Werkstoffs Aluminium	622
2.10	Fazit zur Werkstoffwahl	623
3	Querschnittsklassifizierung	623
3.1	Vorgehen nach DIN EN 1999-1-1	623
3.1.1	Überblick	623
3.1.2	Querschnittsklassen	623
3.1.3	Schlankheitsparameter β	625
3.1.4	Zuteilung der Querschnittsklassen	628
3.1.5	Wirksamer Querschnitt	629
3.1.6	Bedeutung und Folgen der Klassifizierung	630
3.2	Beispiel: ausgesteifter Kastenquerschnitt	630
3.2.1	Einführung zum Beispiel	630
3.2.2	Querschnitt und Werkstoffkennwerte	631
3.2.3	Querschnittsklassifizierung für Normalkraft N	632
3.2.4	Querschnittsklassifizierung für Biegemoment M_y	634
3.2.5	Wirksame Querschnitte	636
3.3	Fazit	636
4	Bauteilnachweise und Stabilitätsnachweise	637
4.1	Bauteilnachweise	637
4.2	Stabilitätsnachweise	638
4.3	Weitere Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	638
4.4	Gegenüberstellung DIN EN 1999-1-1 und DIN EN 1993-1-1	638
4.4.1	Grundlagen	638
4.4.2	Bauteilnachweise	639
4.4.3	Stabilitätsnachweise	646
4.5	Beispiel: Bauteilnachweis und Stabilitätsnachweis Hohlprofil	653
4.5.1	Bauteilnachweise	653
4.5.2	Stabilitätsnachweise	658
5	Verbindungen	662
5.1	Geschweißte Verbindungen	662
5.1.1	Allgemeines	662
5.1.2	Schweißverbindungen nach Eurocode 9	663
5.1.2.1	Allgemeines	663
5.1.2.2	Bemessung von Stumpfnähten	665
5.1.2.3	Bemessung von Kehlnähten	666
5.1.2.4	Tragfähigkeitsnachweis für die WEZ	668
5.1.2.5	Beispiel: Kehlnahtanschluss	670
5.1.2.6	Biegung um die Schweißnahtachse von einseitigen Kehl- und Stumpfnähten	672

5.1.2.7	Bemessung von Rührreißschweißungen	672	5.2.4	Bemessung von Verbindungen mit Vollnieten	681
5.1.2.8	Schweißbolzen, die mittels Lichtbogenbolzenschweißung mit Spitzenzündung angeschlossen werden	673	5.2.5	Spezielle Verbindungen	681
5.2	Schrauben- und Nietverbindungen	674	5.2.6	Bemessung von Verbindungen mit gewindeformenden Schrauben	684
5.2.1	Allgemeines	674	5.2.7	Bemessung von Verbindungen mit Blindnieten	685
5.2.2	Werkstoffe, Durchmesser und Abstände	674		Literatur	686
5.2.3	Bemessung von Verbindungen mit Schrauben	676			
7	Hintergründe zu den Neuerungen in prEN 1991-1-4:2024 für die Berechnung windinduzierter Reaktionen schlanker Bauwerke 691				
	Rüdiger Höffer, Norbert Holscher, Susanne Diburg, Francesca Lupi, Ika Kurniawati, Ulf Winkelmann, Cornelia Kalender				
1	Gesichtspunkte der Fortschreibung und Inhalte der prEN 1991-1-4:2024	693	4	Windinduzierte Quer- oder Torsionsanregung von Bauwerken	707
2	Windmodelle	694	4.1	Allgemeines	707
2.1	Charakteristische Windgeschwindigkeiten – Extremwertanalyse mit ProGumbel	694	4.2	Querwindbelastung von Schornsteinen durch Windturbulenz	707
2.2	Windprofile	699	4.3	Regelungen für die Wirbelerregung	708
3	Windlasten bei böigem Wind	701	4.4	Verfahren 1 in EN 1991-1-4/NA:2010-12	708
3.1	Davenport's Konzept der äquivalenten statischen Windlast	701	4.5	Fortschreibung zum Wirbelerregungsmodell gem. prEN 1991-1-4:2024 mit Nutzung der NDP	710
3.2	Böengeschwindigkeitsdruck	702	4.6	Vergleich der Verfahren 1 und 2 von EN 1991-1-4:2005	715
3.3	Vergleich der Festlegungen des Böengeschwindigkeitsdrucks in der DIN EN 1991-1-4:2010-12 mit NA und der prEN 1991-1-4:2024	704	4.7	Anwendung der neuen aerodynamischen Kurve	719
3.4	Experimentelle Verifizierung des linearisierten Ansatzes	704	5	Einsatz und Anwendungen von numerischen Simulationen für schlanke Tragwerke	721
3.5	Windlastparameter für Windkräfte an Schornsteinen	706	6	Empfehlungen für den zukünftigen Nationalen Anhang	725
			7	Danksagung	726
				Literatur	726
8	Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3 Schneelasten – neue Entwicklungen 729				
	Volker Cornelius, Bodo Wichura				
1	Entwicklung der Schneelastvorschriften	731	2.2.2	Modellierung der Schneedecke	739
2	Schneelast auf dem Boden	731	2.2.2.1	Empirische Regressionsmodelle	739
2.1	Meteorologische Grundlagen zur Schneelast	731	2.2.2.2	Das semi-empirische Multi-Ebenen-Modell Δ .Snow	740
2.1.1	Definitionen der Schneelast	731	2.2.3	Auswahl geeigneter Modelle für die Analyse von charakteristischen Werten der Schneelast am Boden	740
2.1.2	Schneedeckeneigenschaften und ihre messtechnische Erfassung	732	2.2.4	Interpolation der Schneemessdaten mit dem Modell SNOW4	741
2.1.3	Verfügbarkeit von Schneemessdaten	734	2.2.5	Extremwertanalysen	741
2.2	Analyse von charakteristischen Werten der Schneelast am Boden	736	2.3	Raster der charakteristischen Werte der Schneelast am Boden	744
2.2.1	Flächendeckende Bestimmung von Schneehöhen und Wasseräquivalenten	736			

- 3 Schneelast auf dem Dach 746
- 3.1 Was ist neu an der FprEN 1991-1-3:2024-05 – Zusammenfassung 746
- 3.2 Lastanordnung nach FprEN 1991-1-3:2024-05 747
- 3.3 Bestimmung von Schneelasten nach FprEN 1991-1-3:2024-05 747
- 3.4 Umgebungsbeiwert C_e nach FprEN 1991-1-3:2024-05 748
- 3.5 Temperaturbeiwert C_t nach FprEN 1991-1-3:2024-05 753
- 3.6 Formbeiwerte für Schneelasten nach FprEN 1991-1-3:2024-05 753
 - 3.6.1 Anwendungsgebiet 753
 - 3.6.2 Flache Dächer nach FprEN 1991-1-3:2024-05 753
 - 3.6.3 Geneigte Dächer nach FprEN 1991-1-3:2024-05 756
 - 3.6.4 Scheddächer nach FprEN 1991-1-3:2024-05 763
 - 3.6.5 Tonnendächer nach FprEN 1991-1-3:2024-05 765
- 9 Künstliche Intelligenz im Stahlbau 781**
Andreas Müller, Andreas Taras, Michael A. Kraus
 - 1 Einleitung: Motivation und Aufbau des Beitrags 783
 - 2 Künstliche Intelligenz – Einführung, aktuelle Trends und Entwicklungen 783
 - 2.1 Überblick und Einführung in die künstliche Intelligenz 783
 - 2.2 Maschinelles Lernen/Machine Learning 787
 - 2.3 Tiefes Lernen/Deep Learning 787
 - 2.4 Grundarchitekturen neuronaler Netze: Feed Forward NN und Convolutional NN 788
 - 2.5 Generative künstliche Intelligenz und conditional Variational Autoencoder 790
 - 2.6 Physik-informierte/Domänen-informierte künstliche Intelligenz 791
 - 2.7 Aktuelle Trends im Bauwesen und Stahlbau 792
 - 3 Anwendungsbeispiele zum Einsatz von künstlicher Intelligenz im Stahlbau 792
 - 3.1 Deep Neural Networks für die Vorhersage von Profil-Bauteilwiderständen 792
 - 3.2 Conditional Variational Autoencoder für den Entwurf von Hohlprofilkonstruktionen 795
 - 3.3 Materialparameteridentifikation via physik-informierte neuronale Netze für eine Lochscheibe mit von-Mises-Plastizität 797
 - 3.4 LLMs für die baustatische Modellierung in Dlubal RFEM 797
 - 3.5 Erkennung von Ermüdungsrissen in Knotenblechen mittels Convolutional Neural Networks 799
 - 3.6 Deep Learning: Konkretes Anwendungsbeispiel aus aktuellen Forschungsergebnissen 802
 - 3.6.1 Konzeptionelle Idee 802
 - 3.6.2 Datengrundlage 802
 - 3.6.3 Implementierung 804
 - 3.6.4 Verifizierung auf Querschnitts- und Bauteilebene 808
 - 3.6.5 Zusammenfassung 813
 - 4 Resümee und Ausblick 814
Literatur 814

10	3D-Druck 817	
	Jörg Lange, Thilo Feucht	
1	Einleitung 819	
2	WAAM 821	
2.1	Additive Fertigung allgemein 821	
2.2	MSG-Schweißen 821	
2.3	Aufbau einer WAAM-Anlage 822	
2.4	Materialeigenschaften 823	
2.5	Slicing 827	
2.6	Touchsensing 827	
2.7	Fertigungsstrategien 828	
2.8	Schweißsimulation 829	
3	Anwendungsgebiete/Beispiele im Bauwesen 831	
3.1	MX3D-Brücke, Amsterdam 831	
3.2	AM Bridge, Darmstadt 831	
3.3	Optimierungsprozess für Anschlusselemente 832	
3.3.1	Ermittlung der Randbedingungen 832	
3.3.2	Designraum 832	
3.3.3	Numerische Topologieoptimierung 832	
3.3.4	Traglastanalyse 833	
3.3.5	Bewertung und Auswahl 833	
3.3.6	Nachbildung, Vereinfachung, Parametrisierung 834	
3.3.7	Parameterstudie 835	
3.3.8	Fazit 835	
3.4	WAAM auf dünnen Blechen 835	
3.5	Knoten für Raumtragwerke 837	
3.6	Stützen mit außergewöhnlichen Geometrien 838	
3.7	Takenaka/MX3D-Knoten 840	
3.8	Rohre nach Ariza 840	
3.9	Querkraftanschluss nach Holzinger 840	
3.10	Modulare WAAM-Brücke 841	
4	Besonderheiten des WAAM 842	
4.1	Eingangsparameter 842	
4.1.1	Drahtelektrode 842	
4.1.2	Drahtdurchmesser 843	
4.1.3	Schutzgas 843	
4.1.4	Gasdurchflussmenge 845	
4.1.5	Geometrie der Gasdüse 845	
4.1.6	Schweißgerät 845	
4.1.7	Schweißbrennerführende Maschine 845	
4.2	Prozessparameter 845	
4.2.1	Stromstärke/Drahtvorschub 845	
4.2.2	Spannung/Lichtbogenlänge 846	
4.2.3	Schweißprozessregelung 846	
4.2.4	Schweißgeschwindigkeit 847	
4.3	Thermische Randbedingungen 847	
4.3.1	Zwischenlagentemperatur 847	
4.3.2	Kühlung 847	
4.3.3	Streckenenergie 849	
4.4	Geometrische Randbedingungen 849	
4.4.1	Orientierung des Schweißbrenners 850	
4.4.2	Schweißposition und Schweißrichtung 851	
4.4.3	Freies Drahtelektrodenende bzw. Stickout 853	
4.4.4	Schweißnahtanfang, -mitte, -ende 854	
4.5	Thermisch-induzierte Eigenspannungen und Verformungen 855	
4.5.1	Thermisch-induzierte Eigenspannungen 855	
4.5.2	Thermisch-induzierte Verformungen 855	
4.5.3	Zusammenfassende Schlüsse 855	
5	Zusammenfassung 855	
	Literatur 856	
	Stichwortverzeichnis 859	

6 Numerische Simulationen

6.1 Zielsetzung

Im Forschungsvorhaben FOSTA P1328/IGF 19964 [17] wurden parallel zu den in den Abschnitten 3 bis 5 vorgestellten Bauteilversuchen Finite-Elemente-Simulationen zur erweiterten Analyse des Trag- und Stabilitätsverhaltens von Stützen und Trägern mit kaltgeformten Stahlprofilen durchgeführt. Numerische Simulationen bieten den Vorteil, einzelne Parameter gezielt variieren zu können und somit kostengünstig und schnell eine Vielzahl von Ergebnissen zu generieren.

Das Ziel der numerischen Simulation in [17] war die Erweiterung der Versuchsmatrizen für kaltgeformte Stahlprofile unter axialer Druck- und reiner Biegebeanspruchung um die starke Querschnittsachse. Durch die numerischen Parameterstudien steht final nun ein größerer Datensatz zur Verfügung. Die Streubreite der Ergebnisse, insbesondere abhängig von unterschiedlichen Imperfektionsgrößen und -formen, kann abgeschätzt werden. Mithilfe der numerischen Simulationen in [17] wurde das neue kombinierte Bemessungsverfahren (Abschnitt 2) grundlegend validiert.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten [17] wurden die numerischen Modelle mit der kommerziellen Finite-Elemente-Software ANSYS, Version 2020 R2, in der Variante ANSYS Classic [60] erzeugt. Um aussagekräftige, zuverlässige Ergebnisse mithilfe der numerischen Parameterstudien zu erzielen, wurden die entwickelten FE-Modelle anhand der Bauteilversuche (Abschnitte 3 bis 5) [17] validiert.

Im folgenden Abschnitt 6.2 werden die Entwicklung und die Grundlagen des FE-Modells für kaltgeformte Bauteile unter axialer Druckbeanspruchung vorge-

stellt. Es folgt eine umfangreiche FE-Parameterstudie mit der Variation relevanter Parameter. Abschließend werden die numerischen Ergebnisse mit den Vergleichsrechnungen nach dem neuen kombinierten Bemessungsverfahren gegenübergestellt, um dessen Eignung für eine große Zahl von kaltgeformten Stahlprofilen zu bestätigen oder ggf. zu modifizieren. Im Abschnitt 6.3 wird die entsprechende FE-Modellierung und die erweiterte Parameterstudie zur Beanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlbauteilen unter Biegebeanspruchung um die Symmetrieachse des Querschnitts präsentiert.

6.2 Numerische Simulationen zum Tragverhalten von kaltgeformten Stahlbauteilen unter Druckbeanspruchung

6.2.1 FE-Modellierung der Versuchskörper

Zur numerischen Simulation der dünnwandigen, kaltgeformten Stahlbauteile der Bauteilversuche unter axialer und exzentrischer Druckbeanspruchung wurde ein Modell aus Schalenelementen des Typs Shell 181 entwickelt; gebildet aus vier Knoten mit jeweils sechs Freiheitsgraden (3 Translation, 3 Rotation). Die Versuchskörper wurden, wie im Bauteilversuch realisiert, einschließlich der angeschweißten Kopfplatten modelliert. Die Knoten der Kopfplatte und des Versuchskörpers wurden verschmolzen, um die einspannende Wirkung der Kopfplatte auf lokale Verformungen des Profils abbilden zu können. Die Geometrie des FE-Modells wurde an den Achsmaßen der Profile ausgerichtet. In Bild 88 wird exemplarisch das FE-Modell eines nicht perforierten Ω -Profils der Versuchsreihe E (s. Abschnitt 3.2.1.5) dargestellt.

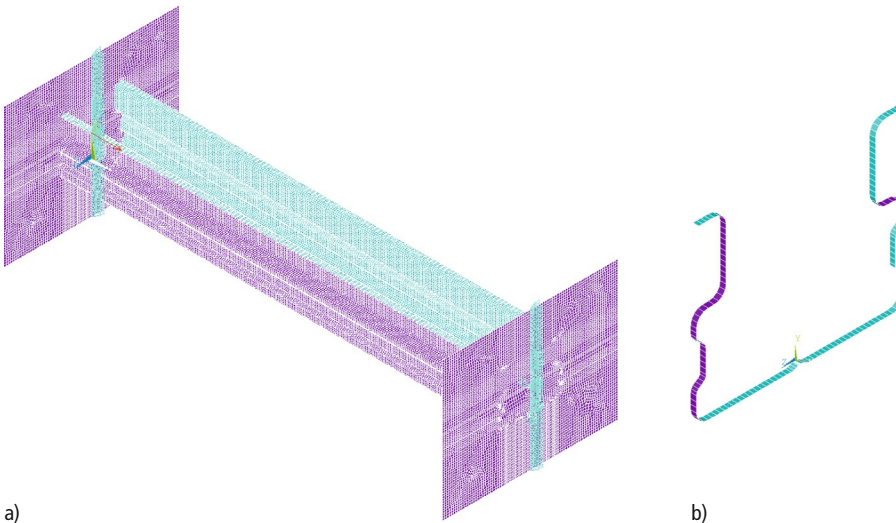


Bild 88. Numerische Simulation der Druckversuche; a) vernetztes Modell des Profils der Versuchsreihe E_266_20, b) Querschnitt des Profils

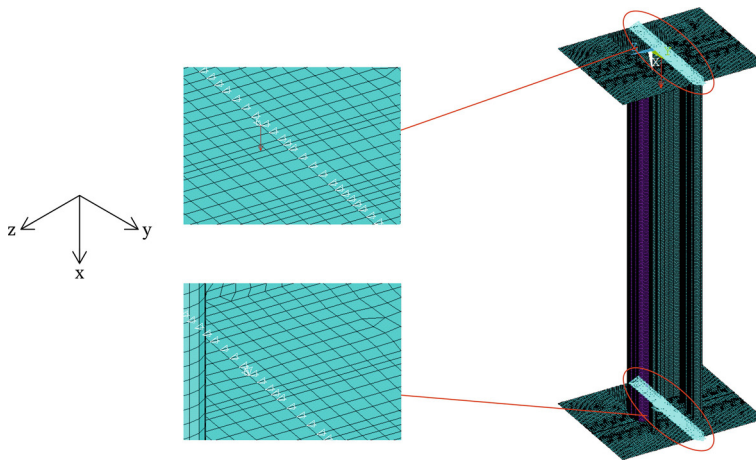


Bild 89. Stützendruckversuche – Lagerungsbedingungen an den Kopf- und Fußplatten

Zur näherungsweise Modellierung der Druckstütze im Versuchsaufbau inklusive der gelenkigen Lagerung des Bauteils und der Anbindung der Stütze mittels Kopf- und Fußplatten wurde die Symmetrieachse des Profils an Kopf- und Fußplatte in z-Richtung kontinuierlich gelagert. Die axiale Druckkraft wurde auf Höhe des Profilschwerpunkts in x-Richtung (Profillängsrichtung) in das Profil eingeleitet, an dieser Stelle wurde die Verschiebung in y-Richtung gesperrt. Am Fußpunkt wurde der korrespondierende Knoten der Kopfplatte sowohl in x- als auch in y-Richtung unverschieblich gelagert (Bild 89). Mit dieser Modellierung konnte der um beide Hauptachsen gelenkig gelagerte Druckstab simuliert werden. Die Rotation des Bauteils um die Längsachse wurde an den Bauteilenden jedoch ausgeschlossen, um das FE-Modell hinsichtlich seiner Freiheitsgrade kinematisch bestimmt auszubilden.

Als Materialmodell wurde vereinfacht eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung angesetzt (linear elastisch – ideal plastisch), da aufgrund der in den Versuchen detektierten lokalen und globalen Instabilitäten ein überwiegend elastisches Verhalten prognostiziert wurde. Dies ist ein vereinfacht reduzier-

ter, aber prinzipiell zulässiger Materialansatz nach prEN 1993-1-14 [16], die zur FE-Simulation von kaltgeformten Stahlbauteilen optional ein quad-lineares Materialmodell oder das Ramberg-Osgood-Modell zulässt. Explizit wird das bilineare Materialmodell in prEN 1993-1-14 für dominant global instabilitätsgefährdete kaltgeformte Stahlquerschnitte vorgegeben. Als Lösungsverfahren wurde das Newton-Raphson-Verfahren gewählt, das eine Simulation bis zum Erreichen der maximalen Beanspruchbarkeit ermöglicht. Dieses Verfahren wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten [17] als ausreichend erachtet, da eine Validierung des FE-Modells anhand der in den Bauteilversuchen identifizierten maximalen Beanspruchbarkeit der Bauteile und anhand der dominierenden Instabilitätsform erfolgen sollte. Eine Betrachtung des Nachtraglastbereichs war nicht erforderlich.

6.2.2 Werkstoffmodell

Da nach den Werkstoffanalysen in [17] (s. Abschnitt 3.2.1.2) geschlussfolgert wurde, dass die Kaltverfestigung mit zunehmendem Umformgrad des Pro-

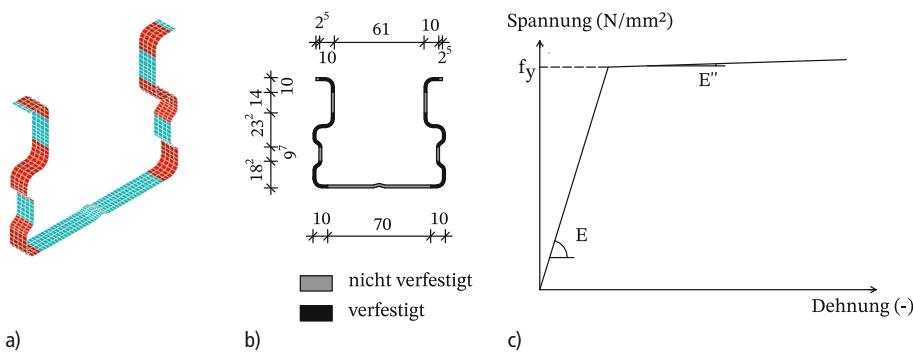


Bild 90. Ansatz der Werkstoffparameter; a) FE-Modell, b) Querschnittsgeometrie, c) Materialmodell im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Tabelle 15. Werkstoffparameter zur FE-Simulation der Ω -Profile unter Druckbeanspruchung

Material	Streckgrenze [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]
unverfestigt	369	185 000
verfestigt	435	211 000

files einen relevanten, nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften von kaltgeformten Stahlbauteilen hat, wurden im FE-Modell auch die lokalen Kaltverfestigungen in den umgeformten Profilbereichen implementiert, um ein möglichst realitätsnahes Tragverhalten abbilden zu können.

In Bild 90 wird exemplarisch die Modellierung eines Ω -Profils der Versuchsreihe E dargestellt. Dabei wurde das Profil näherungsweise in verfestigte und nicht verfestigte Werkstoffbereiche differenziert, dies auf der Basis der Werkstoffuntersuchungen (Abschnitt 3.2.1.2). Die Werkstoffkennwerte in den ebenen, nicht umgeformten Bereichen wurden entsprechend den Werkstoffprüfzeugnissen des Coils angesetzt, während in den kaltverformten, verfestigten Bereichen in Anlehnung an die Ergebnisse aus Abschnitt 3.2.1.2 eine erhöhte Streckgrenze und ein erhöhter E-Modul vorausgesetzt wurden (Tabelle 15).

6.2.3 Imperfektionen

6.2.3.1 Geometrische Imperfektionen

Bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen ist der Einfluss von geometrischen und werkstofflichen Imperfektionen auf das Tragverhalten relevant. Wie in Ab-

schnitt 3.2.4 erläutert, wurden die Versuchskörper im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in [17] zunächst vermessen, sowohl globale Vorkrümmungen der Versuchskörper als auch die Abweichung des Öffnungsmaßes bei den kaltgeformten, offenen Profilen wurden dokumentiert. Die gemessenen Imperfektionen wurden in das numerische GMNIA-Modell implementiert, wie im Folgenden erläutert.

Da bei den Imperfektionsmessungen der Bauteilversuche in [17] keine großen lokalen, beuleigenform-affinen Imperfektionen von Querschnittsteilen gemessen wurden, wurde die entsprechende geometrische Imperfektion aus der Beulform nach einer linear elastischen Eigenwertanalyse (LBA) abgeleitet. Die maximale Amplitude wurde auf 1/200 der größten Querschnittsabmessung nach DIN EN 1993-1-5 [57] bzw. prEN 1993-1-14 [16] skaliert. Globale Vorkrümmungen der Stützen wurden vereinfacht als Sinus-Halbwellen über die Stablänge mit dem gemessenen, maximalen Stich der Bauteilimperfektion (aus Abschnitt 3.2.4) erzeugt (Bild 91). Zur Modellierung des imperfekten Profilöffnungsmaßes wurde die Position der Profillippen mit einer Sinus-Halbwellen approximiert, die maximale Imperfektionsgröße wurde auch hier den Imperfektionsmessungen (s. Abschnitt 3.2.4) entnommen (Bild 92).

Die so generierten Imperfektionsformen wurden in eine modifizierte, imperfekte Stab- und Querschnittsgeometrie des GMNIA-Modells transferiert. Dazu wurden die Koordinaten aller Knoten entsprechend den Ergebnissen der linearen Imperfektionssimulationen überschrieben. Spannungen und Dehnungen wurden nicht übergeben.

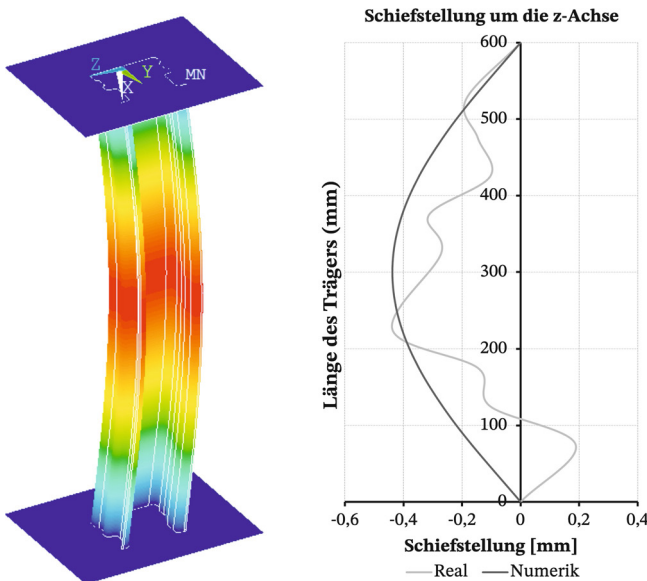


Bild 91. Induzierung der globalen Vorkrümmung im FE-Modell am Beispiel des Versuchskörpers E_266_20_D3 in y-Richtung

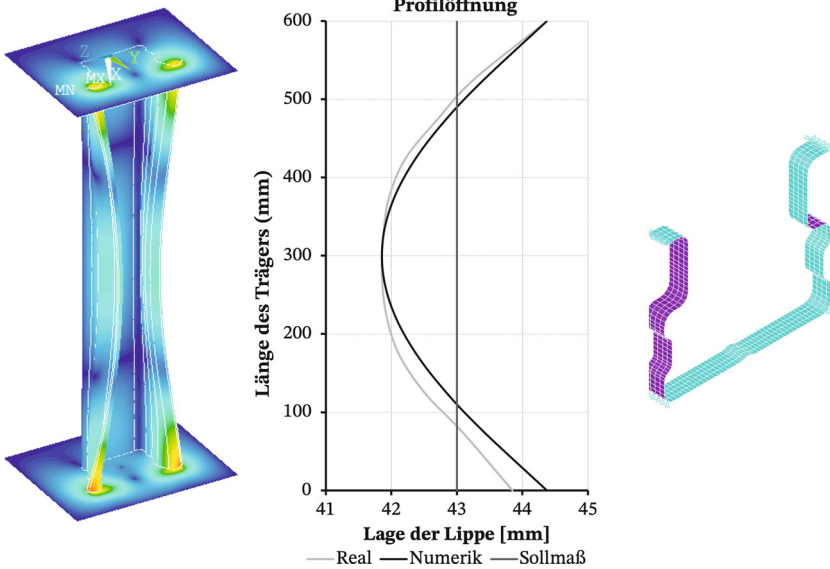


Bild 92. Induzierung der formstabilitäts-affinen Imperfektion im FE-Modell am Beispiel des Versuchskörpers E_266_20_D3

6.2.3.2 Physikalische Imperfektionen

Wie in Abschnitt 3.2.5 auf der Basis aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse spezifiziert, wurden im Rahmen des Forschungsprojekts FOSTA P1328/IGF 19964 [17] keine Eigenspannungsmessungen an den geprüften, kaltgeformten Stahlbauteilen durchgeführt. Eigenspannungen sind auch in FE-Simulationen für kaltgeformte Bauteile nach prEN 1993-1-14 [16] nicht anzusetzen. Demzufolge wurden auch im Rahmen des Forschungsvorhabens keine FE-Simulationen für die geprüften Stahlbauteile unter Berücksichtigung von Eigenspannungen durchgeführt.

6.2.4 Validierung des numerischen Modells

6.2.4.1 Allgemeines

Mit den zuvor erläuterten Modellannahmen wurden die Druckversuche an C- und Ω -Profilen der Versuchsreihe A und E (perforierte und nicht perforierte Konfiguration) mittels FE-Simulationen numerisch berechnet. In Bild 93 werden die Ergebnisse von FE-Simulation und Bauteilprüfung am Beispiel des Versuchskörpers E_266_20_P_D1 gegenübergestellt. Exemplarisch kann anhand von Bild 93 bestätigt werden, dass mithilfe des entwickelten FE-Modells sowohl die maximale Beanspruchbarkeit als auch die lokalen und globalen Verformungen des Versuchskörpers über den Versuchsverlauf abgebildet werden können. Die

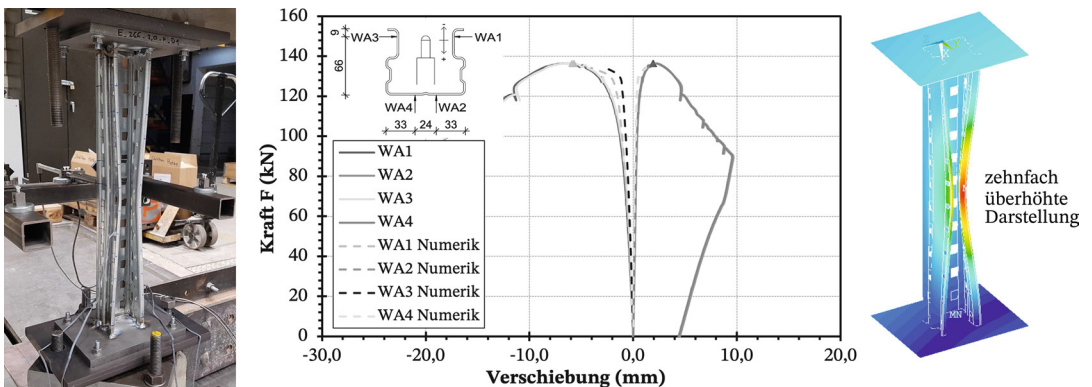


Bild 93. Vergleich der Verformungen im Bauteilversuch und nach FE-Simulation am Beispiel des Versuchskörpers E_266_20_P_D1

Tabelle 16. Vergleich der Beanspruchbarkeit im Bauteilversuch mit FE-Simulation für die Versuchsserie E_266_20 (Druckbeanspruchung)

Versuchskörper	Ausmitte in y-Richtung [mm]	Beanspruchbarkeit N Versuch [kN]	Beanspruchbarkeit N ANSYS [kN]	Abweichung [%]
E_266_20_D1	0	174,5	171,9	1,5
E_266_20_D2	-2	177,5	180,1	1,4
E_266_20_D3	-4	185,3	183,9	0,8
E_266_20_D4	4	143,6	141,9	1,2
E_266_20_D5	-3	181,7	183,7	1,1
E_266_20_D6	-4	189,4	186,1	1,8
E_266_20_D7	-5	184,6	179,0	3,1
E_266_20_G1200_1	0	160,0	146,4	9,3
E_266_20_G1200_2	0	158,0	148,5	6,4
E_266_20_G1200_3	0	161,0	154,3	4,3
E_266_20_G1450_1	0	150,7	134,7	11,9
E_266_20_G1450_2	0	149,6	138,7	7,9
E_266_20_G1450_3	0	145,9	142,0	2,7

maßgebende Forminstabilitätsform des Profils im Stützendruckversuch kann mittels FE-Simulation erzeugt werden. Die gute Übereinstimmung der FE-Simulationen für Ω -Profile mit den Bauteilprüfungen kann für die gesamte Versuchsreihe E_266_20 anhand der Tabelle 16 belegt werden.

Nach der statistischen Auswertung der Resultate aller Bauteilversuche für Stützen unter axialer oder exzentrischer Druckbeanspruchung im Vergleich zu den FE-Simulationen betrug die mittlere Abweichung zwischen den Druckbeanspruchbarkeiten der experimentellen und numerischen Untersuchungen nur 4% [17]. So konnte das entwickelte FE-Modell als ausreichend validiert eingestuft und für weitere Parameterstudien verwendet werden.

6.2.4.2 Einfluss der Kaltverfestigung

Um den Einfluss der Kaltverfestigung auf die Bauteilbeanspruchbarkeit ausgeprägt kaltumgeformter Stahlbauteile, z. B. Ω -förmiger Profile, analysieren zu können, wurden Materialmodelle inklusive und ohne Ansatz der Kaltverfestigung entwickelt (s. Abschnitt 6.2.2). Nach vergleichenden Studien mittels FE-Simulationen kann die Modellannahme am Beispiel der Versuchsreihe E_266_20 weitgehend bestätigt werden (Bild 94). Das FE-Modell, das die durch Kaltverfestigung erhöhte Streckgrenze und den E-Modul in den umgeformten Profildbereichen berücksichtigt, kann das Trag- und Stabilitätsverhalten der Kaltprofile realitätsnah simulieren. In [17] wurden über Modifizierungen des FE-Modells nichtkonservative Ergebnisse eliminiert. Dagegen lassen sich mit dem FE-Modell der prEN 1993-1-14 [16], das zum Ausgleich der nicht implementierten (geringen) Eigenspannungen auf den

Ansatz der Kaltverfestigung im Materialmodell verzichtet, nur überwiegend konservative Ergebnisse generieren.

6.2.5 Modellannahmen für FE-Parameterstudien

6.2.5.1 Allgemeines

Auf der Basis des in Abschnitt 6.2.1 bis 6.2.4 entwickelten, anhand der Ergebnisse der Bauteilprüfungen validierten Finite-Elemente-Modells wurden nachfolgend allgemeine Parameterstudien mittels FE-Simulationen durchgeführt. Diese konzentrierten sich auf drei anwendungstypische, marktübliche, vielfach verwendete kaltgeformte Profile, deren Trag- und Stabilitätsverhalten unter Druckbeanspruchung grundlegend analysiert wurden (Bild 95).

Im Rahmen der Parameterstudien wurden die geometrischen Profilformen, wie in Bild 94 dargestellt, fixiert. Als Variationsparameter wurden die Stahlorte, die Bauteillänge und die Blechdicke definiert (Tabellen 17 und 18).

Es wurde ein bilineares Werkstoffmodell gewählt, wie schon in Abschnitt 6.2.2 begründet. Die Kaltverfestigung wurde berücksichtigt, indem die erhöhte, mittlere Streckgrenze f_{ya} nach prEN 1993-1-3 [2], 5.2.2, lokal im Bereich der umgeformten Profildbereiche implementiert wurde. Nach Auswertung der Werkstoffprüfungen an stark umgeformten Kleinteilproben (Abschnitt 3.2.1.2) wurde belegt, dass dieser Ansatz eine gute, konservative Approximation darstellt. Gleichmaßen wurde ein in den Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1 [98] im Mittel näherungsweise bestätigter, reduzierter Elastizitätsmodul von 200 000 N/mm² für das Gesamtprofil angesetzt.

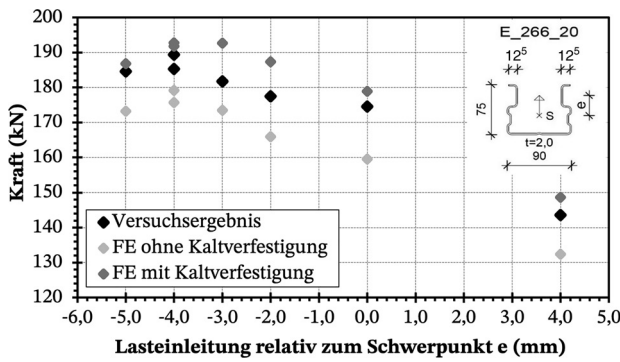


Bild 94. Vergleich der Versuchsergebnisse E_266_20 mit FE-Simulationen mit und ohne Berücksichtigung von Kaltverfestigung

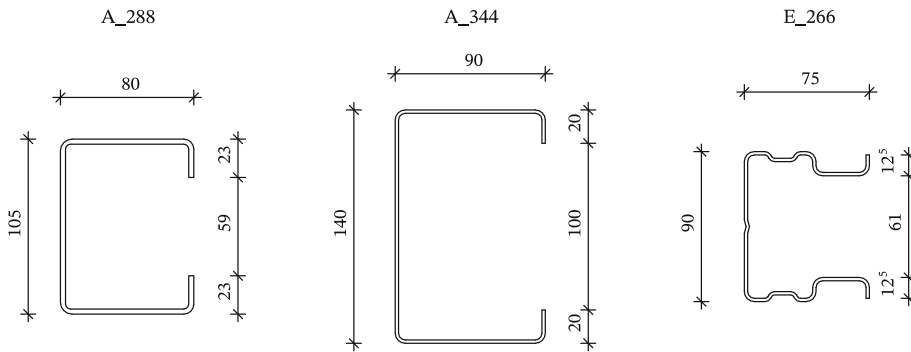


Bild 95. Kaltgeformte Profilquerschnitte für Parameterstudien (Druckbeanspruchung)

Tabelle 17. Stahlsorten für Parameterstudien

Material	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
S220GD+Z	220	300
S250GD+Z	250	330
S280GD+Z	280	360
S320GD+z	320	390
S350GD+Z	350	420
S390GD+Z	390	460
S420GD+Z	420	480
S450GD+Z	450	510

Tabelle 18. Profile, Blechdicken und Bauteillängen in Parameterstudien

Profil	Blechdicke [mm]	Länge [mm]
A_288	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	600; 1200; 1800; 2400
A_344	1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0	400; 500; 800; 1100; 1500; 2000; 3000; 4000
E_266	1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0	600; 800; 1000; 1200; 1600; 2000; 2400

6.2.5.2 Geometrische Imperfektionen

Aus der Validierung des FE-Modells anhand der Bauteilversuche in Abschnitt 6.2.4 wurden für die allgemeinen Parameterstudien folgende Modellannahmen zur Berücksichtigung von geometrischen Imperfektionen getroffen:

1. Für FE-Simulationen von stabilitätsgefährdeten Stahlbauteilen sind geometrische Imperfektionen zu berücksichtigen, die i. d. R. affin zu den prognostizierten lokalen und globalen Instabilitätsformen (Plattenbeulen, Forminstabilität, Biegeknicke, Biegedrillknicken) angesetzt werden oder die jeweiligen Instabilitätsformen triggern. In der Dissertation von *Lemański* (in Vorbereitung) wurden im Rahmen der allgemeinen Parameterstudien, bei denen allgemeine Imperfektionsansätze gewählt und nicht auf die Ergebnisse der Imperfektionsmessungen an Bauteilprüfungen zurückgegriffen werden sollte, die Imperfektionsgrößen und -formen nach unterschiedlichen normativen Ansätzen implementiert, um die Streubreite der Ergebnisse und den Effekt von geometrischen Imperfektionen mithilfe der FE-Simulationen abschätzen zu können. In [17] wurden zunächst die Imperfektionsansätze der DIN EN 1993-1-5 [57] mit Verweis auf den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-1 [56] in verschiedensten Kombinationen gewählt, die im Folgenden spezifiziert werden.

2. Die globale Vorkrümmung wurde mit einer Amplitude von maximal $L/350$ angesetzt, da die zu untersuchenden, kaltgeformten C- und Ω -Profile der europäischen Knickspannungslinie b zugeordnet sind. Im Vergleich zu den Imperfektionsmessungen an den getesteten Kaltprofilen [17] ist dieser Ansatz konservativ zu bewerten, da bei den Versuchskörpern meist deutlich geringere Vorverformungen gemessen wurden (Abschnitt 4.2.4). Analog zur FE-Simulation der Versuchskörper in Abschnitt 6.2.4 wurde die Vorkrümmung als Sinus-Halbwellen aufgebracht.
 3. Die beulaffine, lokale Imperfektion von Querschnittsteilen der Kaltprofile wurde mit einer maximalen Amplitude von $a/200$ (mit Blechbreite a) berücksichtigt.
 4. Für den Ansatz der Imperfektion korrespondierend zur Forminstabilität wurde die Imperfektionsgröße mit dem Ansatz von Walker [100] nach Gl. (62) bestimmt, der in die prEN 1993-1-14 [16] aufgenommen wurde.
- $$S_{0d} = 0,3 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,d}}} \quad (62)$$
- mit
 f_{yb} Streckgrenze
 $\sigma_{cr,d}$ kritische Verzweigungsspannung für Forminstabilität
 t Querschnittsdicke
5. Die Imperfektionsformen korrespondierend zum Plattenbeulen und zur Forminstabilität wurden jeweils eigenformaffin in das FE-Geometriemodell implementiert. Die Eigenform wurde zuvor über eine linear-elastische Beulanalyse (LBA) bestimmt.
 6. DIN EN 1993-1-5 sieht vor, verschiedene Imperfektionsansätze vielfältig zu kombinieren, um die Beanspruchbarkeit des Stahlbauteils konservativ bestimmen zu können. Hierzu ist eine maßgebende Leitim-

perfektion zu 100 % zu wählen, während die begleitenden Imperfektionen auf 70 % reduziert werden können. Bei Variation der Leitimperfektion ergab sich eine Vielzahl von Imperfektionskombinationen, insbesondere unter Berücksichtigung verschiedener Imperfektionsrichtungen.

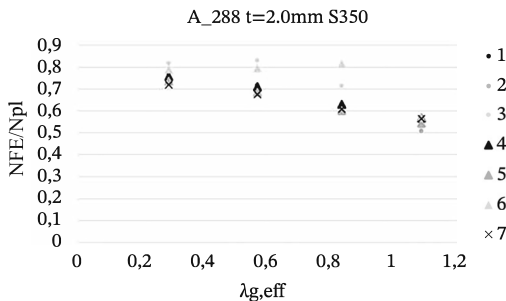
7. Vergleichend zu den in Punkt 2 bis 4 und 6 gelisteten Ansätzen wurden Parameterstudien mit den neuen Imperfektionsansätzen der prEN 1993-1-14 [16] durchgeführt.

6.2.5.3 Einfluss unterschiedlicher Imperfektionsansätze

Die Modellannahmen, die für die Parameterstudien im Rahmen des Forschungsvorhabens [17] getroffen wurden, weichen von den Vorgaben der mittlerweile verfügbaren prEN1993-1-14 [16] ab. Diese sieht zwar ebenfalls grundsätzlich eine Kombination der Imperfektionsansätze korrespondierend zum Plattenbeulen ($a/200$), zur Forminstabilität (nach Gl. (59)) und zur globalen Vorkrümmung vor. Jedoch werden diese drei Ansätze in den Imperfektionskombinationen jeweils vereinfacht zu 100 % angesetzt, eine Leitimperfektion, wie in DIN EN 1993-1-5 [57] vorgegeben, wird nach prEN 1993-1-14 [16] nicht definiert. Im Gegenzug wird der maximale Stich der globalen Vorkrümmung für kaltgeformte Stahlprofile grundsätzlich mit $L/1000$ deutlich reduziert.

Bild 96 zeigt exemplarisch die Streubreite der Ergebnisse von FE-Simulationen bei Ansatz verschiedener Imperfektionsmodelle für das C-Profil A_288.

Mit dem Bild 96 wird deutlich, dass die Ergebnisse der FE-Simulationen bei vorwiegend plattenbeul- und forminstabilitätsgefährdeten, druckbeanspruchten Stahlprofilen in mittleren Bauteillängen ($\lambda_g \leq 0,9$) mit dem ungünstigen Imperfektionsansatz nach DIN EN 1993-1-5 [57] (aus [17]) näherungsweise mit denen des Imperfektionsansatzes nach



- 1 Imperfektionen: 70% Plattenbeulen, 70% Forminstabilität, 100% $wz=L/350$, mit Verfestigung
- 2 Imperfektionen: 70% Plattenbeulen, 70% Forminstabilität, 100% $wy=L/350$, mit Verfestigung
- 3 Imperfektionen: 70% Plattenbeulen, 70% Forminstabilität, 100% $wy=L/350$, mit Verfestigung
- 4 Imperfektionen: 70% Plattenbeulen, 100% Forminstabilität, 70% $wz=L/350$, mit Verfestigung
- 5 Imperfektionen: 70% Plattenbeulen, 100% Forminstabilität, 70% $wy=L/350$, mit Verfestigung
- 6 Imperfektionen: 70% Plattenbeulen, 100% Forminstabilität, 70% $wy=L/350$, mit Verfestigung
- 7 prEN 1993-1-14 (100% Plattenbeulen, 100% Forminstabilität, Minimum globaler Vorkrümmungen $L/1000$), ohne Verfestigung

Bild 96. Streubreite der FE-Simulationsergebnisse für das druckbeanspruchte C-Profil A_288 unter Berücksichtigung verschiedener Imperfektionsansätze

prEN 1993-1-14 [16] übereinstimmen. Bei langen Stützen unter Druckbeanspruchung ($\lambda_g > 0,9$) sind die Ansätze nach DIN EN 1993-1-5 im Vergleich zur prEN 1993-1-14 eher konservativ zu bewerten. Die in der Dissertation von *Lemański* (in Vorbereitung) ebenfalls durchgeführte Imperfektionsstudie belegt, dass die europäischen Knickspannungslinien, auf deren Basis auch die Druckbeanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlprofilen nach prEN 1993-1-3 [1] zu bestimmen sind, nur mithilfe der Imperfektionsansätze nach DIN EN 1993-1-5 validiert werden können.

Da im Zuge des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens zum Nachweis der globalen Bauteilstabilität auf die Nachweisformate der prEN 1993-1-3 [2] und die europäischen Knickspannungslinien zurückgegriffen wird, werden im Folgenden die Ergebnisse der FE-Simulationen mit den Imperfektionsansätzen nach DIN EN 1993-1-5 [57] in Bezug genommen.

Zur Anwendung der prEN 1993-1-14 [16] bei FE-Simulationen von kaltgeformten Profilen wird auf den Artikel der Autoren [101] verwiesen.

6.2.6 FE-Parameterstudien zur Druckbeanspruchbarkeit von C- und Ω -förmigen Stahlbauteilen

Die Parameterstudien auf der Basis von FE-Simulationen nach Abschnitt 6.2.5 dienten einerseits zur Erweiterung der Datenbasis aus Bauteilprüfungen mit dem Ziel einer intensiven Analyse des Stabilitätsverhaltens und der Beanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlprofilen unter Druckbeanspruchung. Andererseits wurden die Ergebnisse der Parameterstudien zur umfassenderen, allgemeinen Validierung des neuen kombinierten Bemessungsverfahrens aus Abschnitt 2.2 herangezogen.

Demzufolge wurden alle numerischen Ergebnisse der FE-Parameterstudien den theoretischen Ergebnissen

einer Bemessung nach dem neuen, kombinierten Bemessungsverfahren in Abschnitt 2.2 gegenübergestellt. In einer stufenweisen Validierung wurde die Qualität des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens zunächst ohne Berücksichtigung des Anpassungsfaktors χ_{eN} nach Gl. (39) analysiert. So war es möglich, den in den Bauteilversuchen qualitativ identifizierten Einfluss des nichtlinearen Spannungsverlaufs infolge Plattenbeulen und Forminstabilität auf die Beanspruchbarkeit des Bauteils zu analysieren und zu quantifizieren. Wie in Abschnitt 4.3 bereits ausgeführt, wurden im Rahmen des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens die relevanten Verzeigungslasten mithilfe der Software CUFSM [58] bestimmt.

Im Bild 97 wird der Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Parameterstudie mit denen nach dem kombinierten Bemessungsverfahren grafisch aufbereitet, dies zunächst ohne Ansatz des Anpassungsfaktors χ_{eN} nach Gl. (39). Der Wert auf der Ordinate definiert das Verhältnis des rechnerischen Bemessungswerts (Ausnutzungsgrad des theoretischen Nachweises) zum jeweiligen Ergebnis der FE-Simulation. Auf der Abszisse wird das Verhältnis des Abminderungsfaktors Q_A (infolge Plattenbeulen/Forminstabilität) zum Abminderungsfaktor χ (infolge globaler Instabilität) aufgetragen, beide Faktoren wurden ebenfalls nach dem neuen kombinierten Bemessungsverfahren bestimmt.

Mit Bild 97 wird deutlich, dass ein Großteil der nicht konservativen Berechnungsergebnisse (mit der Ausnutzung > 1) dann dokumentiert ist, wenn der Wert Q_A , der die bezogene, rechnerisch reduzierte Beanspruchbarkeit infolge Plattenbeulen bzw. Forminstabilität darstellt, kleiner ist als der Abminderungsfaktor χ infolge globaler Instabilitäten, also immer dann, wenn die Beanspruchbarkeit des kaltgeformten Stahlbauteils maßgeblich durch Plattenbeulen und Forminstabilität dominiert wird. In diesem Fall ist der Span-

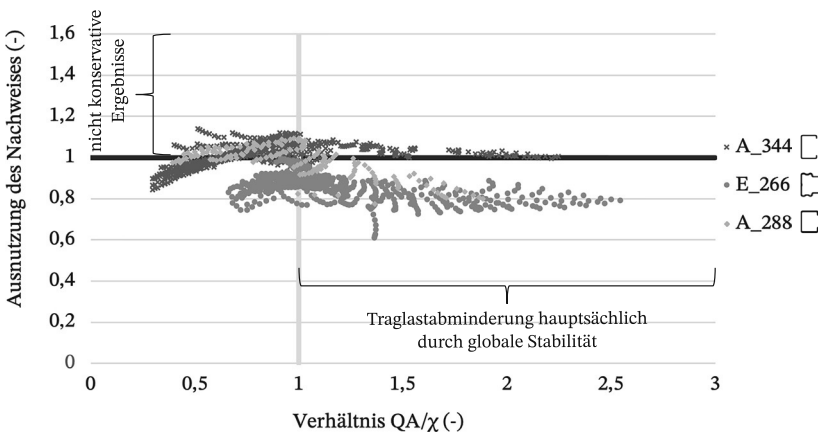


Bild 97. Auswertung der Parameterstudie für Kaltprofile unter Druckbeanspruchung. Vergleich der Ergebnisse von FE-Simulation und Bemessung nach dem kombinierten Bemessungsverfahren in Abhängigkeit des Verhältnisses Q_A/χ bei Berechnung *ohne* Verwendung des Anpassungsfaktors χ_{eN}

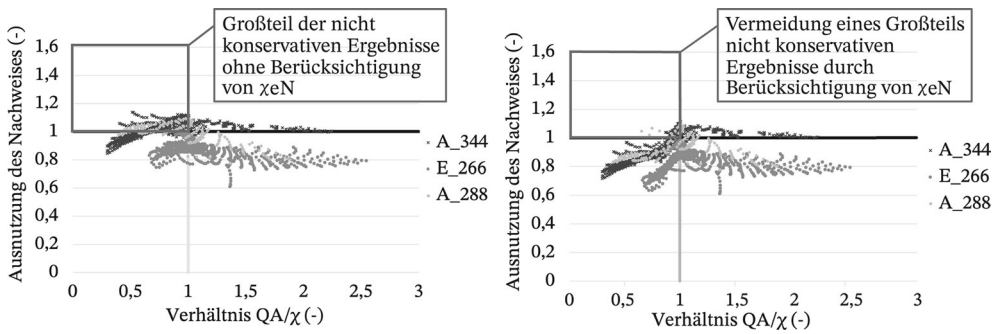


Bild 98. Auswertung der Parameterstudie für Kaltprofile unter Druckbeanspruchung, Vergleich von FE-Simulation und Bemessung nach dem kombinierten Bemessungsverfahren in Abhängigkeit des Verhältnisses Q_A/χ bei Berechnung mit Verwendung des Anpassungsfaktors χ_{eN} nach Gl. (39)

nungsverlauf aufgrund der lokalen Instabilitäten über den Querschnitt stark nichtlinear, was bei den originären Bemessungsverfahren der Direct Strength Method bzw. der Methode der reduzierten Spannungen naturgemäß nicht berücksichtigt wird und demzufolge – wie in Bild 97 belegt – zu einer unsicheren Bemessung führen kann.

Bei einer nachfolgenden Vergleichsstudie wurden die Ergebnisse aus der FE-Parameterstudie denen des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens nach Abschnitt 2.2 unter Berücksichtigung des neu eingeführten Anpassungsfaktors χ_{eN} nach Gl. (39) gegenübergestellt. Wie Bild 98 belegt, wird der Großteil der nicht konservativen Ergebnisse in Bild 97 eliminiert. Zwar ergeben sich im Bereich von $Q_A/\chi \approx 1,0$, d. h., wenn lokale und globale Instabilitäten gleichermaßen ausgeprägt sind, weiterhin leicht nicht konservative Bemessungsergebnisse im Vergleich zu den FE-Simulationen. Allerdings sind in diesen Fällen die FE-Simulationsergebnisse ihrerseits als eher konservativ im Vergleich zu denen der durchgeführten Bauteilprüfungen zu bewerten (Abschnitt 4). Daher kann das in [17] neu entwickelte, kombinierte Bemessungskonzept nach Abschnitt 2.2 über einen weiten Parameterbereich hinreichend bestätigt und für kaltgeformte Stahlbauteile zur Anwendung empfohlen werden.

Eine detailliertere Auswertung der numerischen Parameterstudie kann dem Forschungsbericht [17], Abschnitt 8.3, entnommen werden.

6.3 Numerische Simulationen zum Tragverhalten von kaltgeformten Stahlbauteilen unter Biegebeanspruchung um die Symmetrieachse

6.3.1 Modellierung der Versuchskörper

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 6.2 wurde ein Finite-Elemente-Modell für Kaltprofile unter Biegebeanspruchung um die Symmetrieachse entwickelt und anhand der Bauteilversuche (Abschnitt 4) validiert. Das Finite-Elemente-Modell wurde in ANSYS, Ver-

sion 2020 R2, mithilfe von Schalenelementen Shell 181 generiert.

Zur Reduzierung der Berechnungszeit wurde die Symmetrie des gedoppelten Versuchsaufbaus, der in Abschnitt 4.2.2 erläutert wurde, ausgenutzt und nur ein Probekörper mit den halben Distanzstücken im Bereich der Lasteinleitung modelliert. Die Distanzstücke wurden vereinfacht als Blechstreifen mit großer Biegesteifigkeit generiert und an sechs Stellen jeweils in den Auflagerachsen und Lasteinleitungspunkten (Schraubenreihe) entsprechend Bild 99 diskret angesetzt. Alle Blechstreifen wurden biegesteif mit dem Versuchskörper verbunden.

Zudem wurden Randbedingungen zur Generierung der Symmetrie definiert (Sperrung von Rotation um x-Achse und Verschiebung in z-Richtung). Die vertikale Verschiebung (y-Richtung) wurde an beiden Enden des Probekörpers verhindert, um die Lagerung auf den Stahlrollen zu modellieren. Zusätzlich wurde die Längsverschiebung eines Trägerendes in x-Richtung gesperrt, um das numerische Modell kinematisch bestimmt zu modellieren.

Um den Effekt der im Versuch an der Lasteinleitung eingebauten Spreizen (Abschnitt 4.2.2) berücksichtigen zu können, wurde punktuell die vertikale Verschiebung zwischen einem Knoten des Obergurts und allen Knoten des Untergurts gekoppelt. Dementsprechend blieb das Öffnungsmaß der Profile im Bereich der Lasteinleitung im numerischen Modell unverändert. Die Spezifizierung der komplexen Randbedingungen im FE-Modell ist für die Biegeträger in Bild 100 dargestellt.

Bei FE-Simulation der Vierpunktbiegeversuche wurde, wie bei der Simulation der Stützdruckversuche, ein bilineares Materialmodell angesetzt. Als Approximationsalgorithmus wurde das Newton-Raphson-Verfahren verwendet, sodass die numerische Simulation mit Erreichen der maximal aufnehmbaren Biegebeanspruchung des Trägers beendet wurde. Das Nachtraglastverhalten konnte nicht simuliert werden.

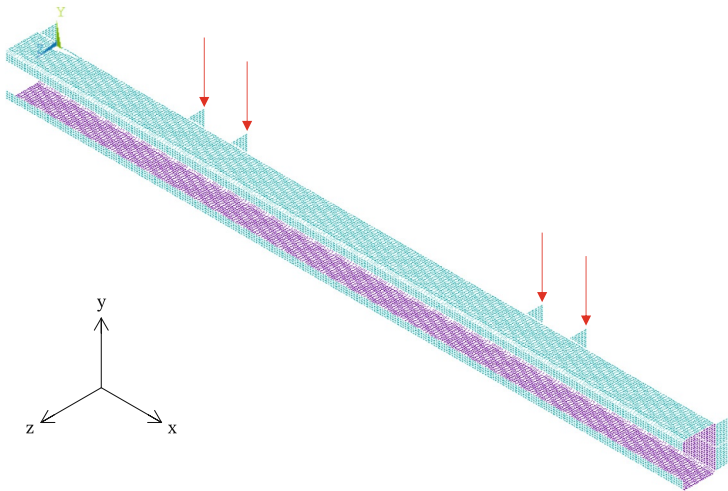


Bild 99. Vernetzte Geometrie des numerischen Modells für die Vierpunktbiegeversuche am Beispiel des Versuchskörpers A_344_20_B4200

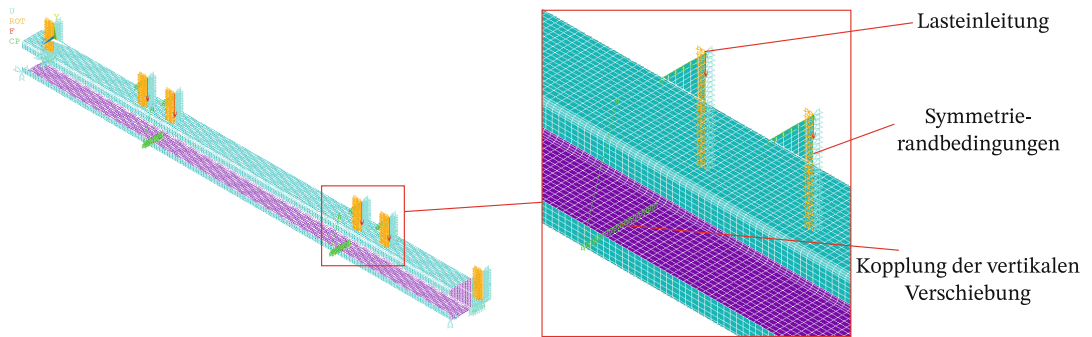


Bild 100. Randbedingungen zur numerischen Simulation der Vierpunktbiegeversuche

6.3.2 Validierung des numerischen Modells

Bei der Simulation der Vierpunktbiegeversuche wurde auf die Erkenntnisse aus der Validierung der Druckversuche in Abschnitt 6.2.4 zurückgegriffen. Die vor der Versuchsdurchführung gemessene Imperfektion des Öffnungsmaßes und die globale Vorkrümmung wurden jeweils über Sinus-Halbwellen in eine imperfekte Geometrie des numerischen Modells transferiert. Die lokale Imperfektion einzelner Querschnittsteile kor-

respondierend zum Plattenbeulen wurde eigenformaffin, skaliert auf 1/200 der maßgebenden Gurtbreite, aufgebracht. Hierzu wurde vorab eine linear-elastische Beulanalyse (LBA) durchgeführt und die erste Eigenform, die eindeutig dem Instabilitätsphänomen Plattenbeulen zugeordnet werden konnte, als grundlegende Imperfektionsform ausgewählt. Exemplarisch zeigt Bild 101 die erste Beul-Eigenform des Versuchskörpers A_344_20_B4500 unter Biegebeanspruchung im Vierpunktbiegeversuch.

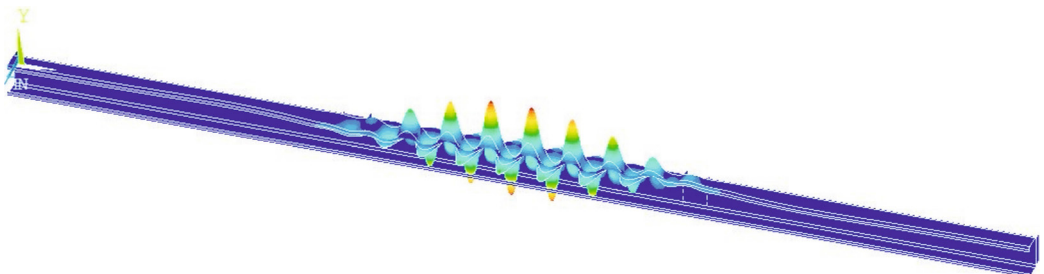


Bild 101. Eigenform des Plattenbeulens am Versuchskörper A_344_20_B4500

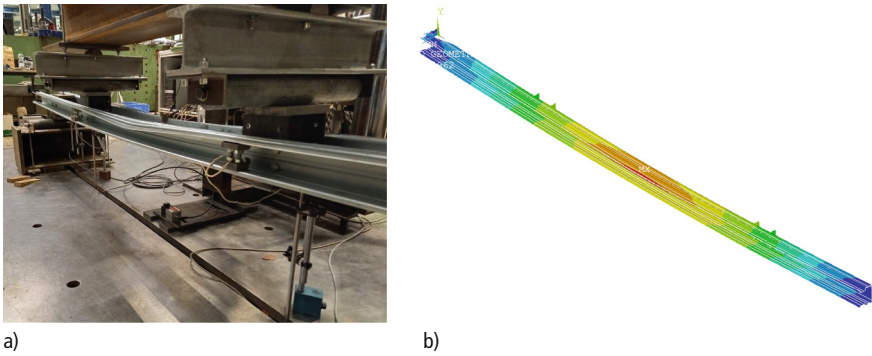


Bild 102. Vergleich der Versagensformen beim Versuch E_266_20_B2700; a) Versuch nach Erreichen der Traglast, b) Ergebnis der FE-Simulation

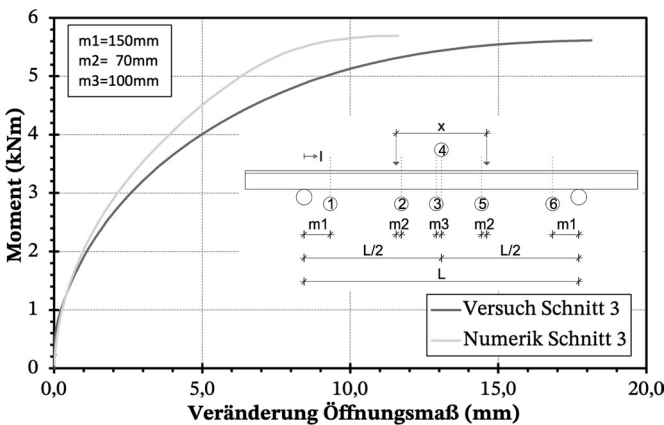


Bild 103. Öffnungsmaß im Versuch E_266_20_B2700 und in der FE-Simulation

Analog zu dem FE-Modell der druckbeanspruchten Kaltprofile wurden die Profilquerschnitte in unverformte und kaltverformte Bereiche ohne und mit Verfestigung des Werkstoffs differenziert. In den unverformten Bereichen (ohne Verfestigung) wurden die Werkstoffeigenschaften für das Coil aus den Prüfzeugnissen angesetzt, während in den kaltverfestigten Bereichen erhöhte Werkstoffparameter, wie in Abschnitt 6.2.4 erläutert, eingeführt wurden.

In Bild 102 werden exemplarisch die Verformungsfiguren des Versuchskörpers E_266_20_B2700 nach dem Vierpunktbiegeversuch und nach der FE-Simulation (GMNIA) bei Erreichen der maximalen Biegebeanspruchbarkeit gegenübergestellt. Einen Vergleich der Veränderung des Öffnungsmaßes bei zunehmender Biegebeanspruchung, aufgezeichnet in Versuchskörpermitte, kann Bild 103 entnommen werden. In Bild 104 wird zudem die Durchbiegung des Biegeträgers in Feldmitte in Abhängigkeit der Biegemomentenbeanspruchung dargestellt.

Anhand von Bild 102 bis Bild 104 kann die gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus den Vierpunktbiegeversuchen und der FE-Simulationen bestätigt werden. Dies gilt sowohl für die maßgebenden Verformungen

und Instabilitätsformen als auch für die Größe der maximalen Biegemomentenbeanspruchbarkeit.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [17] wurden alle Vierpunktbiegeversuche der Reihen A (C- und Z-Profile), B (dünnwandige C-Profile des Ständerwandbaus) und E (Ω -Profile des Regalbaus) mittels FE-Methoden numerisch simuliert. Die mittlere Abweichung der erreichten Biegemomentenbeanspruchbarkeit nach FE-Simulationen und den Bauteilprüfungen (s. Abschnitt 5.2) betrug weniger als 5%, das numerische Modell konnte als hinreichend validiert betrachtet werden.

Der Tabelle 19 ist exemplarisch der Vergleich von Versuchsergebnisse und der FE-Simulationen für die Biegeversuche in den Versuchsreihen E_266_20 und E_266_20_P zu entnehmen.

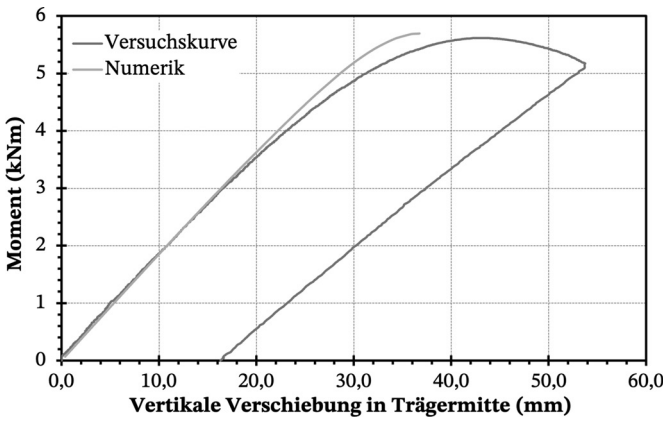


Bild 104. Momenten-Verformungs-Diagramm im Versuch E_266_20_B2700 und in der FE-Simulation

Tabelle 19. Vergleich der Biegemomentenbeanspruchung von Ω -Profilen des Regalbaus nach Bauteilversuchen und FE-Simulation

Versuchskörper	Mittlere Biegemomentenbeanspruchbarkeit Versuch $M_{k,test}$ [kNm]	Mittlere Biegemomentenbeanspruchbarkeit FE-Simulation $M_{k,test}$ [kNm]	Abweichung [%]
E_266_20_1350	5,88	5,50	7,0
E_266_20_2700	5,57	5,69	2,2
E_266_20_P_1350	4,49	4,36	3,1
E_266_20_P_2700	4,07	4,15	2,0

6.3.3 Modellannahmen für numerische Parameterstudien an kaltgeformten Stahlbauteilen unter Biegebeanspruchung

6.3.3.1 Allgemeines

Die Parameterstudien mittels FE-Simulationen wurden an C- und Ω -förmigen Kaltprofilen unter Biegebeanspruchung um ihre Symmetrieachse sowie an Z-Pro-

filen mit Biegung um die starke Achse, wie in Bild 105 dargestellt, durchgeführt.

Im Rahmen der Parameterstudien wurden die geometrischen Profilformen, wie in Bild 103 dargestellt, fixiert. Als Variationsparameter wurden die Stahlsorte, die Bauteillänge und die Blechdicke definiert (Tabellen 20 und 21).

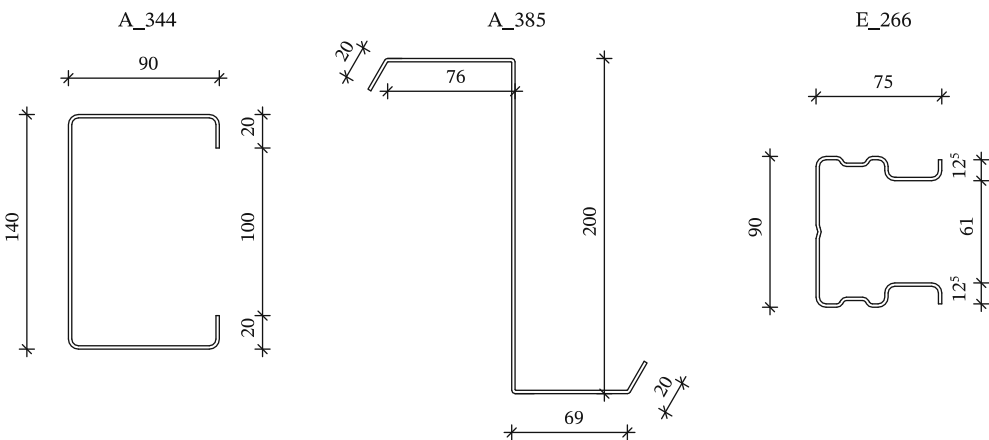


Bild 105. Querschnitte für Parameterstudien bei Biegebeanspruchung um die Symmetrieachse (C-, Ω -Profil) bzw. um die starke Hauptachse (Z-Profil)

Tabelle 20. Variation der Stahlsorten in den FE-Parameterstudien zur Biegebeanspruchbarkeit von Stahlprofilen

Material	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
S220GD+Z	220	300
S250GD+Z	250	330
S280GD+Z	280	360
S320GD+z	320	390
S350GD+Z	350	420
S390GD+Z	390	460
S420GD+Z	420	480
S450GD+Z	450	510

Tabelle 21. Variation der Blechdicken und Bauteillängen in den FE-Parameterstudien zur Biegebeanspruchbarkeit von Stahlprofilen

Profil	Untersuchte Dicken [mm]	Untersuchte Länge [mm]
A_385	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	1000; 2000; 3000; 4000
A_344	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	500; 1000; 1500; 2000; 2500; 3000
E_266	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	1000; 1500; 2000

Es wurde ein bilineares Werkstoffmodell gewählt, wie schon in Abschnitt 6.2.2 begründet. Die Kaltverfestigung wurde berücksichtigt, indem die erhöhte, mittlere Streckgrenze f_{ya} nach prEN 1993-1-3 [2], 5.2.2, lokal im Bereich der umgeformten Profilbereiche implementiert wurde. Nach Auswertung der Werkstoffprüfungen an stark umgeformten Kleinteilproben (Abschnitt 3.2.1.2) wurde belegt, dass dieser Ansatz eine gute, konservative Approximation darstellt. Gleichmaßen wurde ein in den Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1 [98] bestätigter, reduzierter Elastizitätsmodul von 200 000 N/mm² für das Gesamtprofil angesetzt.

6.3.3.2 Geometrische Imperfektionen

Aus der Validierung des FE-Modells anhand der Bauteilversuche in Abschnitt 6.3.3 wurden für die allgemeinen Parameterstudien folgende Modellannahmen zur Berücksichtigung von geometrischen Imperfektionen getroffen, die sich im Wesentlichen an der Spezifizierung der Modellierung für druckbeanspruchte Stahlprofilen orientiert (Abschnitt 6.2.5.2):

1. Über linear-elastische Eigenwertanalysen (LBA) wurden die Eigenformen für Plattenbeulen und Forminstabilität des Querschnitts bestimmt und als Imperfektionsformen in das FE-Modell integriert. Die maximale Amplitude der Beulimperfektion wurde mit 1/200 der größten Blechbreite des

Querschnitts angesetzt. Die Amplitude der Imperfektion korrespondierend zur Forminstabilität wurde nach Gl. (59) bestimmt.

2. Eine globale Vorkrümmung der Träger wurde entsprechend den Vorgaben der DIN EN 1993-1-1 [56] mit L/350 für Stahlprofile der KSL b berücksichtigt und als Sinus-Halbwellen angesetzt.
3. Interaktionen von lokalen und globalen Imperfektionen wurden berücksichtigt; die nachfolgend in den Simulationen erzielte, geringste Biegetragfähigkeit wurde als maximal zulässige Biegemomentenbeanspruchbarkeit der Stahlträger definiert. Zur Simulation wurde die maßgebende Leitimperfektion mit 100 % angesetzt, während die Amplituden der jeweils begleitenden Imperfektionen auf 70 % reduziert wurden. Dieser Kombinationsansatz von Imperfektionen nach DIN EN 1993-1-5 [57] wurde für kaltgeformte Stahlprofile in prEN 1993-1-14 [16] nicht übernommen. Er wurde jedoch im Rahmen der eigenen Forschungsarbeiten als vergleichender Imperfektionsansatz analysiert.

6.3.4 FE-Parameterstudien zur Biegebeanspruchbarkeit von kaltgeformten Profilen

Die Parameterstudien auf der Basis von FE-Simulationen nach Abschnitt 6.3.3 dienen einerseits zur Erweiterung der Datenbasis aus Bauteilprüfungen mit dem Ziel einer intensiven Analyse des Stabilitätsverhaltens und der Beanspruchbarkeit von kaltgeformten Stahlprofilen unter Biegebeanspruchung. Andererseits wurden die Ergebnisse der Parameterstudien zur umfassenderen, allgemeinen Validierung des neuen kombinierten Bemessungsverfahrens aus Abschnitt 2.2 herangezogen.

Demzufolge wurden alle numerischen Ergebnisse der FE-Parameterstudien den theoretischen Ergebnissen einer Bemessung nach dem neuen, kombinierten Bemessungsverfahren in Abschnitt 2.2 gegenübergestellt. In einer stufenweisen Validierung wurde die Qualität des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens zunächst ohne Berücksichtigung des Anpassungsfaktors χ_{eM} nach Gl. (52) analysiert. So war es möglich, den in den Bauteilversuchen qualitativ identifizierten Einfluss des nichtlinearen Spannungsverlaufs infolge Plattenbeulen und Forminstabilität auf die Beanspruchbarkeit des Bauteils zu analysieren und zu quantifizieren. Wie in Abschnitt 5.3 bereits ausgeführt, wurden im Rahmen des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens die relevanten Verzweigungslasten mithilfe der Software CUFMS [58] bestimmt.

Im Bild 106 wird der Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Parameterstudie mit denen nach dem kombinierten Bemessungsverfahren grafisch aufbereitet, dies zunächst ohne Ansatz des Anpassungsfaktors χ_{eM} nach Gl. (52). Der Wert auf der Ordinate definiert das Verhältnis des rechnerischen Bemessungswerts (Ausnutzungsgrad des theoretischen Nachweises) zum jeweiligen Ergebnis der FE-Simulation. Auf der Abszisse

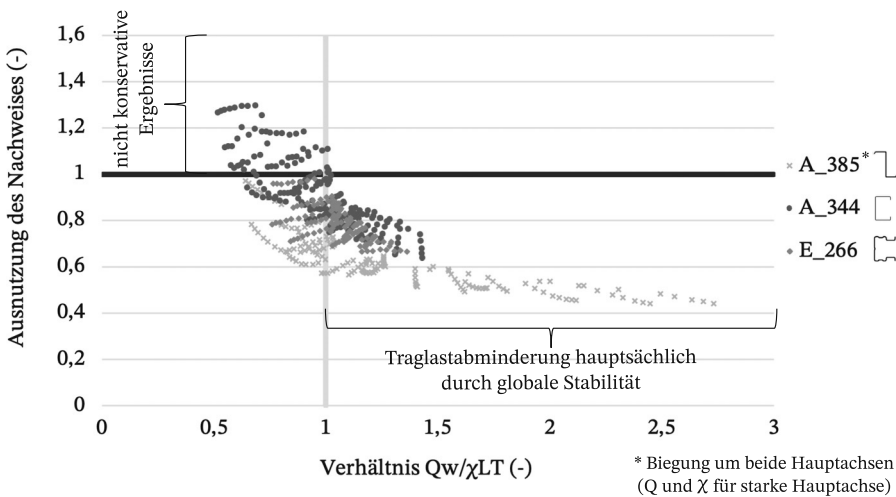


Bild 106. Ergebnisse der FE-Parameterstudie bei Biegebeanspruchung. Vergleich der Ergebnisse von FE-Simulationen und nach dem neuen Bemessungsverfahren in Abhängigkeit des Verhältnisses Q_w/χ_{LT} ohne Verwendung des Abminderungsfaktors χ_{eM}

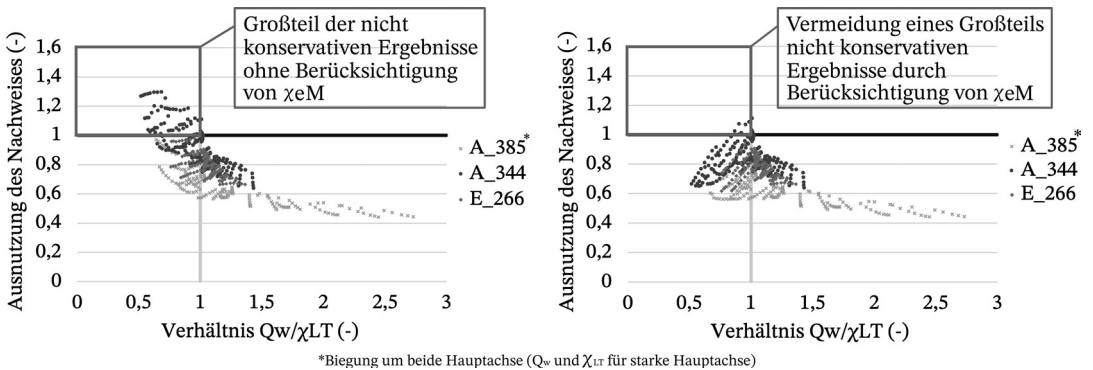


Bild 107. Ergebnisse der FE-Parameterstudie bei Biegebeanspruchung. Vergleich der Ergebnisse von FE-Simulationen und nach dem neuen Bemessungsverfahren in Abhängigkeit des Verhältnisses Q_w/χ_{LT} mit Verwendung des Abminderungsfaktors χ_{eM}

wird das Verhältnis des Abminderungsfaktors Q_w (infolge Plattenbeulen/Forminstabilität) zum Abminderungsfaktor χ_{LT} (infolge Biegedrillknicken) aufgetragen, beide Faktoren wurden ebenfalls nach dem neuen kombinierten Bemessungsverfahren bestimmt.

Mit Bild 106 wird deutlich, dass ein Großteil der nicht konservativen Berechnungsergebnisse (mit der Ausnutzung > 1) dann dokumentiert ist, wenn der Faktor Q_w , der die bezogene, rechnerisch reduzierte Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts infolge Plattenbeulen bzw. Forminstabilität darstellt, kleiner ist als der Abminderungsfaktor χ_{LT} infolge Biegedrillknicken, also immer dann, wenn die Beanspruchbarkeit des kaltgeformten Stahlbauteils maßgeblich durch Plattenbeulen und Forminstabilität dominiert wird. In diesem Fall ist der Spannungsverlauf aufgrund der lokalen Instabilitäten über den Querschnitt stark nichtlinear, was bei den originären Bemessungsverfahren der AISI Di-

rect Strength Method bzw. der Methode der reduzierten Spannungen naturgemäß nicht berücksichtigt wird und demzufolge – wie in Bild 106 belegt – zu einer unsicheren Bemessung führen kann.

Bei einer nachfolgenden Vergleichsstudie wurden die Ergebnisse aus der FE-Parameterstudie denen des neuen, kombinierten Bemessungsverfahrens nach Abschnitt 2.2 unter Berücksichtigung des neu eingeführten Anpassungsfaktors χ_{eM} nach Gl. (52) gegenübergestellt. Wie Bild 107 eindrücklich belegt, werden nahezu alle nicht konservativen Ergebnisse eliminiert. Zwar ergeben sich im Bereich von $Q_w/\chi_{LT} \approx 1,0$, d. h., wenn lokale und globale Instabilitäten gleichermaßen ausgeprägt sind, weiterhin geringfügig nicht konservative Bemessungsergebnisse im Vergleich zu den FE-Simulationen. Allerdings sind in diesen Fällen die FE-Simulationsergebnisse ihrerseits als eher konservativ im Vergleich zu denen der durchgeführten Bauteilprü-

fungen zu bewerten (Abschnitt 5). Daher kann das in [17] neu entwickelte, kombinierte Bemessungskonzept nach Abschnitt 2.2 über einen weiten Parameterbereich hinreichend bestätigt und für kaltgeformte Stahlbauteile unter Biegebeanspruchung zur Anwendung empfohlen werden.

Eine detailliertere Auswertung der numerischen Parameterstudie kann dem Forschungsbericht [17] entnommen werden.

6.4 Resümee

Für kaltgeformte, C-, Ω - und Z-förmige, dünnwandige Stahlbauteile unter Druck- und Biegebeanspruchung wurden Finite-Elemente-Modelle in der Software ANSYS R2020 entwickelt und in GMNIA-Analysen anhand der Bauteilversuche (Abschnitt 3.2, 4.2, 5.2) validiert. In Parameterstudien wurden über FE-Simulationen (GMNIA) Bauteillängen, Querschnittsparameter, Werkstoffe sowie lokale und globale Imperfektionen variiert, um den Einfluss der Eingangsparameter auf die Bauteilbeanspruchbarkeit zu analysieren und die Streubreite von FE-Simulationsergebnissen realitätsnah abbilden zu können.

Der Vergleich der Ergebnisse von FE-Simulationen und einer Bemessung nach dem neu entwickelten, kombinierten Bemessungsverfahren für kaltgeformte Bauteile nach Abschnitt 2.2 bestätigte, dass das neue Verfahren für kaltgeformte Stahlquerschnitte mit unterschiedlichen Querschnittsformen sowohl unter einer axialen Druck- als auch unter Biegebeanspruchung um die starke Querschnittsachsachse zuverlässige Ergebnisse liefert. Die Notwendigkeit der Erweiterung des Bemessungskonzepts um die neuen Anpassungsfaktoren χ_{eN} und χ_{eM} nach Gl. (39) und Gl. (52) zur Berücksichtigung der nichtlinearen Spannungen und der Verschiebung der Spannungsergebnisse infolge Plattenbeulen und Forminstabilität wurde für Stützen und Träger, die weniger global als lokal instabilitätsgefährdet sind, belegt. Auf der anderen Seite war eindeutig, dass die Anpassungsfaktoren bei Bauteilen, die maßgeblich durch globale Instabilitäten beeinflusst werden, nicht erforderlich sind. Der neu eingeführte, bemessungsrelevante Grenzwert $Q/\chi < 1,0$, der das Verhältnis der Reduktionsfaktoren infolge Plattenbeulen/Forminstabilität zur Abminderung infolge globaler Instabilität beschreibt, erwies sich als guter Näherungsansatz zur Berücksichtigung bzw. Nicht-Berücksichtigung der neuen Anpassungsfaktoren.

Sehr konservative, theoretische Bemessungsergebnisse nach dem neuen, kombinierten Bemessungsverfahren ergaben sich in [17] insbesondere bei biegebeanspruchten, kaltgeformten Z-Profilen, die aufgrund ihrer Hauptachsenneigung bezüglich der vertikalen Lasteinleitungssachse zweiachsiges Biegeverhalten zeigen. Nach eingehenden Analysen in [17] konnte gezeigt werden, dass die konservativen Berechnungsergebnisse für Z-Profile eher auf die konservativen Interaktionsbedingungen für Bauteile unter zweiachsiger Biege-

beanspruchung nach prEN 1993-1-3 [2] zurückzuführen sind und damit keine Schwäche des neuen, kombinierten im Vergleich zu anderen Bemessungsverfahren darstellen.

Für detailliertere Angaben zur Auswertung der Parameterstudien wird auf den Forschungsbericht [17] verwiesen.

7 Bemessungsbeispiele

7.1 Bemessungsbeispiel 1: C-Profil unter axialer Druckbeanspruchung

7.1.1 Einführung

Um die Anwendung des kombinierten Bemessungsverfahrens aus Abschnitt 2.2 zu demonstrieren, wird im Beispiel 1 exemplarisch ein C-Profil des Typs A_344_20 aus S390GD+Z unter zentrischer Druckbeanspruchung bemessen. Bild 108 zeigt die wesentlichen Profilabmessungen und das gewählte statische System einer Pendelstütze, die durch eine axiale Druckkraft beansprucht ist.

Im Gegensatz zu den im Forschungsprojekt [17] durchgeführten Stützendruckversuchen, bei denen die Stützen mit angeschweißten Kopf- und Fußplatten zur Lasteinleitung der Druckkraft versehen waren, wird in diesem Beispiel vereinfacht von idealisierten, gelenkigen Lagerungen der Stützenenden ausgegangen. Im Abschnitt 7 dieses Beitrags liegt der Fokus nunmehr auf der reinen Anwendung des kombinierten Bemessungsverfahrens, unabhängig und ohne Validierung anhand von den durchgeführten, experimentellen Untersuchungen (Abschnitte 4 bis 6).

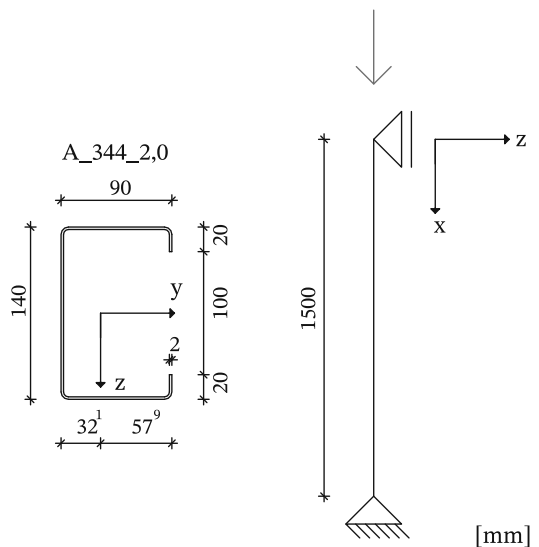


Bild 108. Querschnitt und statisches System der Beispielberechnung 1

7.1.2 Eingangsparameter

Die nominalen Werkstoffkenngrößen für die Stahlsorte S390GD+Z werden prEN 1993-1-3 [2] entnommen. Die Querschnittswerte des Profils können wahlweise händisch oder über eine etablierte, bautechnische Software bestimmt werden: So ergeben sich für den in Bild 108 dargestellten C-förmigen Stahlquerschnitt die folgenden Eingangsparameter:

$$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$$

$$G = 81\,000\text{ N/mm}^2$$

$$f_{yb} = 390\text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0,3$$

$$A = 684\text{ mm}^2$$

$$N_{pl} = A \cdot f_{yb} = 684 \cdot 390 \cdot 10^{-3} = 266,8\text{ kN}$$

Zur Stabilitätsanalyse des dünnwandigen Stahlquerschnitts (LBA) und zur Ermittlung der kritischen Verzweigungslasten σ_{cr} im Rahmen der Bemessung wird die freiverfügbare, etablierte Finite-Streifen-Software CUFSM [58] verwendet. Diese basiert auf den Werkstoff- und Querschnittsdaten und setzt als Finite-Streifen-Methode eine über die Bauteillänge konstante Beanspruchung voraus (Bild 109). Im Beispiel 1 wurde eine konstante Druckspannung, die eine axiale Druckbeanspruchung von 1000 N am Profil erzeugt, als Belastung aufgebracht. Die Spannung kann in CUFSM optional entweder tabellarisch direkt über die Knoten spezifiziert oder über den implementierten Spannungsgenerator mittels Eingabe der resultierenden Kraftgröße generiert werden. Bei der zweiten Option rekalkuliert CUFSM die Knotenspannungen programmieren aus der vorgegebenen Druckkraft. In der Software CUFSM wird die Verzweigungsgröße nach Eigenwertanalyse als Lastmultiplikator in Abhängigkeit der aufgebrachten Beanspruchungsgröße spezifiziert. Je nach Eingabe ist das Ergebnis der Eigenwertanalyse in CUFSM als Last- oder Spannungsgröße zu interpretieren.

Zur Eigenwertanalyse müssen neben den Querschnittsdaten auch die Längen und Lagerungsbedingungen der zu untersuchenden Bauteile im statischen System definiert werden. Auf der Basis dieser Eingangsparameter werden die Verzweigungsgrößen in CUFSM unter Berücksichtigung von lokalen und globalen Instabilitätsformen ermittelt bzw. eine längenabhängige Girlandenkurve für die unterschiedlichen Instabilitätsformen bestimmt (Bild 110). Da die Halbwellenlängen der lokalen Instabilitätsformen in der Regel deutlich kleiner sind als die Bauteillänge, ist zur umfassenden lokalen Stabilitätsanalyse des Querschnitts eine Vielzahl von möglichen Halbwellenlängen zu untersuchen. Für eine allgemeine Stabilitätsanalyse werden in der Regel konservative Randbedingungen für Bauteil und Profil in Form einer gelenkigen Lagerung modelliert, um einerseits global den für Pendelstäbe konservativen Eulerfall 2 abzubilden und andererseits eine nichtkonservative Sperrung von Freiheitsgraden für die Instabilitätsformen Plattenbeulen und Forminstabilität zu vermeiden. Zum Abgleich von Prüfergebnissen ist dies im Einzelfall jedoch im Detail zu analysieren, da eine globale Einspannung des Bauteils oft nur einen untergeordneten Einfluss auf die kritische Verzweigungslast für Plattenbeulen hat, insbesondere dann, wenn die Profilmessungen deutlich geringer sind als die Systemlänge des Bauteils.

Mit diesen Eingabeparametern wurde mit CUFSM für jeden kaltgeformten Querschnitt unter der spezifischen Beanspruchung eine Girlandenkurve ermittelt, auf deren Basis längenabhängig die relevanten Verzweigungsspannungen und die zugehörigen Instabilitätsformen bestimmt werden können (Bild 111). Sowohl nach prEN 1993-1-3 [2] als auch nach der AISI Direct Strength Method [35] werden die Verzweigungslasten für Plattenbeulen und Forminstabilität in der Regel aus den Tiefpunkten der Girlandenkurven bei

Eingabe der Materialparameter

Eingabe der Profilknoten und der Spannungsverteilung

Eingabe der Elemente und Zuweisung der Blechdicke

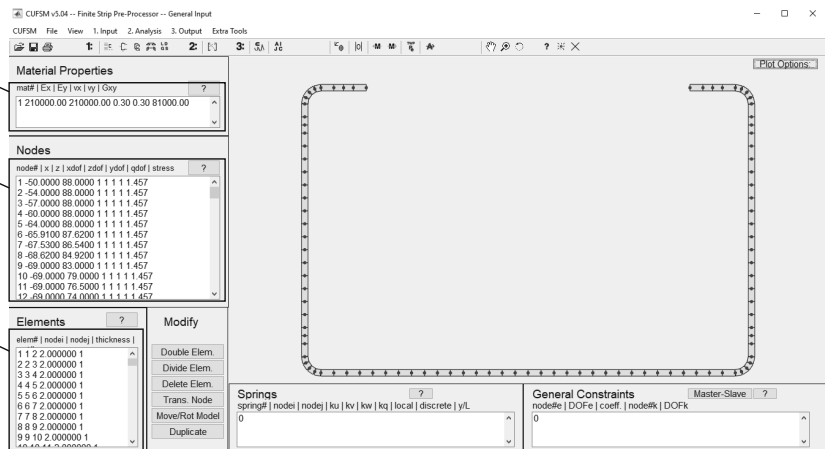


Bild 109. Querschnitts- und Werkstoffdaten in der Eingabemaske nach CUFSM [58]