

Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 22 (1975)

Artikel: Vorbeulungseinflüsse und Eigenspannungen in der Bewertung der nutzungsgerechten Stahlkonstruktionen

Autor: Steup, Herbert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-19373>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

II

**Vorbeulungseinflüsse und Eigenspannungen in der Bewertung
der nutzungsgerechten Stahlkonstruktionen**

Buckling and Residual Stress in the Evaluation of Steel Structures for User Needs

Voilement et contraintes internes dans l'évaluation de structures en acier concues pour l'usage

Herbert STEUP

a. o. Prof. Dr.-Ing. habil.

Technische Universität Dresden
Dresden/DDR

Der schon seit langer Zeit bekannte stabilitätsmindernde Einfluß von Imperfektionen hinsichtlich Geometrie und Eigenspannungen ist bislang nur für wenige Systeme einer vereinfachten Art in größerer Allgemeingültigkeit theoretisch untersucht worden. Mit den vermeintlich ausreichend hohen Sicherheitszahlen und der Vorgabe werkstattmäßiger Toleranzen schien dieser Problemkreis nur eine sekundäre Bedeutung zu besitzen. Die uns allen bekannten Schadensfälle insbesondere an stählernen Hohlkastenbrücken des In- und Auslandes, wie übrigens auch das derzeitige Verhalten einiger besonders schlanker Stahlbetonkonstruktionen, haben die Notwendigkeit deutlich vor Augen geführt, hier einen breiteren Erfahrungsschatz zu sammeln.

Unsere modernen Berechnungsmethoden, die unter Einsatz elektronischer Hilfsmittel in zunehmendem Maße auch geometrisch und physikalisch kompliziertere Strukturen zu berechnen gestatten, bieten insbesondere bei Stabwerken die Möglichkeit einer hinreichenden Erfassung von Vorkrümmungen der Stäbe, Abweichungen in der Konfiguration der Knotenpunkte u. dergl. Derartige Algorithmen oder gar aufbereitete Ergebnisse sind jedoch bei beulgefährdeten Flächentragwerken noch spärlich vorhanden, so daß die Entwurfs- sowie Standardisierungs-Praxis noch keine befriedigenden Bewertungsmaßstäbe für das imperfekte Verhalten besitzt. Diese Tatsache resultiert daraus, daß der kompliziertere Aufbau des Flächentragwerkes bei Berücksichtigung des elastisch-plastischen Materialverhaltens und einer geometrisch nichtlinearen Verzerrungs-Verschiebungsabhängigkeit eine theoretische Lösung sowohl vom Ansatz her als auch der algorithmischen Durcharbeitung erschwert. Wir können wohl auch nicht damit rechen, daß bei künftiger Bereitstellung eines getesteten Berechnungsprogramms, etwa auf der Methode der finiten Elemente aufbauend, die Bewertung des Imperfektionseinflusses für jeden praktisch auftretenden Konstruktionsfall mit vertretbarem Rechen-

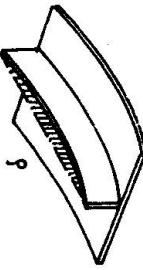
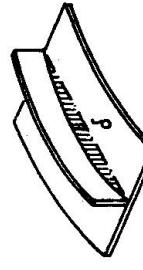
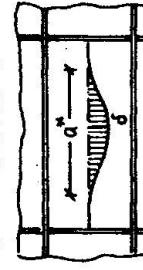
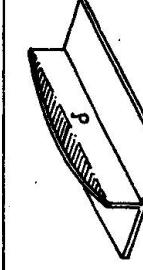
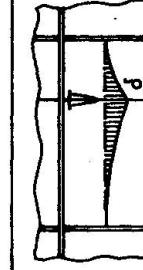
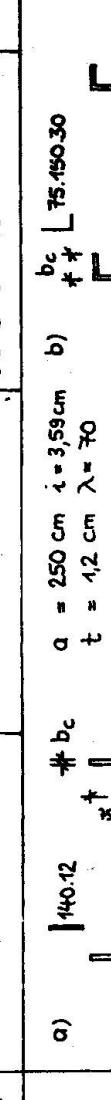
aufwand erfolgen kann. Voraussichtlich dürfte hier die zuverlässige Stützung angenäherter Berechnungsformeln durch theoretisch und auch experimentell gesicherte Einzelfälle vorgenommen werden. Die Absicherung der Funktionsfähigkeit im Zusammenspiel von Berechnung, Konstruktion, Werkstatt- und Baustellenfertigung muß durch ökonomisch ausgewogene Standardisierungsvorschreibungen erfolgen. Da die Fertigungsungenauigkeiten einen differenzierten Einfluß auf das Kurz- oder Langzeitverhalten der jeweiligen Konstruktion besitzen, müssen hier teils zu scharfe Forderungen gemildert werden. Während es beispielsweise erforderlich ist, bei gedrückten schlanken Zylinderschalen den Imperfektionseinfluß so weit als möglich zu reduzieren, erscheinen Lockerungen im Bereich der Biegezugzone bei Vollwandträgern u. ä. möglich.

In den Berechnungsvorschriften der DDR TGL 13 510, betreffend die Herstellung und Abnahme von Stahltragwerken, wird die Einhaltung einer Maximalvorbeulung von $f = 4 \text{ mm}$ bei unversteiften oder versteiften Blechen mit Beanspruchung in deren Ebene gefordert. Darauf hinaus sind mit Grenzwerten der Ausbeulungsimperfektion zur kleinsten Entfernung der Randfesthaltungen mit $i/f = 1000$ bzw. $l/f = 250$ bei Blechfeldern zwischen Gurtungen und Steifen zusätzliche Einengungen geschaffen.

Die Tafel veranschaulicht für einige der hauptsächlich interessierenden geometrischen Imperfektionen Gegenüberstellungen der Fertigungstoleranzen und Rechnungsannahmen nach unseren Standards sowie den MERRISON-Empfehlungen für die Hohlkastenbrücken. Die Unterschiede sind im Fertigungsbereich nicht wesentlich. Eine Differenzierung in den Rechnungsannahmen einschließlich der zu erfassenden Eigenspannungen ist bei uns weniger ausgeprägt. Dafür sind die Beulsicherheitszahlen für Gesamtfeld- wie auch Einzelfeldbeulen höher angesetzt. Der Einfluß von seitlichen Verkrümmungen abstehender Steifenteile auf die Biegedrillknickung bleibt außer Ansatz. Eine Empfehlung wird dahingehend gegeben, die Flachstahlsteifen durch effektivere L-, T- oder Hohlprofile zu ersetzen.

Bei dem Bemühen, übermäßige Vorbeulungen der Bleche samt deren Versteifungen rückgängig zu machen, werden natürlich in das Material teils zusätzliche und schwer kontrollierbare Zwängungs- spannungen eingetragen. Vorbeulungen und Zwängungen beeinflussen sich allerdings gegenseitig, wobei der größere Biegewiderstand gedrungenerer Bleche die Aufspeicherung von Restspannungen begünstigt. Unseres Erachtens wurde eine sehr differenzierte Einstufung von Vorbeulungs- und Eigenspannungseinflüssen auf das Formänderungs- und Grenztragfähigkeitsverhalten von unversteiften und insbesondere versteiften beulgefährdeten Elementen im MERRISON- Report gegeben.

Angesichts der eingangs erwähnten analytischen Schwierigkeiten einer exakteren Erfassung von Vordeformationen und Zwängungsspannungen, wie auch der Kompliziertheit einer Klassifikation unterschiedlicher Eigenspannungsverteilungen ist die Orientierung auf den unvermeidlich vorgekrümmten Druckstab samt mitwirkendem Plattenstreifen unter Einbezug von Vorbeulungen und Zwängungsspannungen ein sicheres Vorgehen, welches im weiteren noch Anpassungen an das zweidimensionale Tragverhalten ermöglicht. Mit Rücksicht auf eine solche Gesamttragwirkung erscheint es ausreichend, die gegenüber den MERRISON-Empfehlungen etwas

| SYSTEM | JN DER FERTIGUNG ZULÄSS. TOLERANZ DDR MERRISON - EMPF. | JMPERFEKTION FÜR BERECHNUNG DDR MERRISON - EMPF. | |
|--|---|---|---|
|  | STAHLBAU DRUCKGURT ALLGEMEIN >1 LÄNGSST. $d_{zul} = \frac{l}{1000}$ $d_{zul} = \frac{l}{500}$ $d_{zul} < 4 \text{ mm}$ $\leq 4 \text{ mm}; \delta < 0.9$ BSP. $d_{zul} = 2,5 \text{ mm}$ $d_{zul} = 4 \text{ mm}$ | $d_{zul} = \frac{l}{1200}$ NICHT UNTER 2mm ERFORDERL. BSP. $d_{zul} = 2,1 \text{ mm}$ | NACH OMEGA - VERFAHREN $\delta = m \cdot i^2 / \text{maxe } i = \sqrt{f/F}$ $m = \delta/k = 0,4 \cdot \lambda / 100$ BSP. $\delta = 2,0 \text{ mm}$ a) $\delta = 3,0 \text{ mm}$ b) BSP. $\delta = 4,2 \text{ mm}$ |
|  | STAHLBAU DRUCKGURTS. ALLGEMEIN >1 LÄNGSST. $d_{zul} = \frac{l}{1000}$ $d_{zul} = \frac{l}{300}$ $d_{zul} < 4 \text{ mm}$ $\leq 8 \text{ mm}; \delta < 0.9$ BSP. $d_{zul} = 2,5 \text{ mm}$ $d_{zul} = 8 \text{ mm}$ | $d_{zul} = \frac{l}{900}$ NICHT UNTER 2mm ERFORDERL. BSP. $d_{zul} = 2,8 \text{ mm}$ | NACH OMEGA - VERFAHREN $\delta = m \cdot i^2 / \text{maxe } i = \sqrt{f/F}$ $m = \delta/k = 0,4 \cdot \lambda / 100$ BSP. $\delta = 2,0 \text{ mm}$ a) $\delta = 3,0 \text{ mm}$ b) BSP. $\delta = 6,3 \text{ mm}$ |
|  | STAHLBAU DRUCKGURTGS. ALLGEMEIN >1 LÄNGSST. $d_{zul} = \frac{l_{min}}{250}$ $d_{zul} = b_1/250$ $d_{zul} < 4 \text{ mm}$ $\leq 4 \text{ mm}$ BSP. $d_{zul} = 4 \text{ mm}$ $d_{zul} = 4 \text{ mm}$ | $d_{zul} = \frac{a^*}{300t} \left(1 + \frac{b_1}{500}\right)$ NICHT UNTER 1MM ERFORDERL. IN FLANSCHEN, QUERWÄNDEN UND UNVERSTEIFTEN STEBEN B DRUCK IN ANDER STEBENBERECHNEN 3 MM BSP. $d_{zul} = 1,9 \text{ mm}$ ($3,0 \text{ mm}$) | JMPERFEKTION DURCH HOHERE BEULSICHERHEITS- ZAHL ARGEDECKT SOWIE BEI GURT FAULKNEE - FORM. BSP. $n = 6$ (GESAMTZAHL DER AUSSTEFUNGEN) $\delta' = 3,3 \text{ mm}$ |
|  | KEINE STANDARDISIERGS. VORSCHREIBUNGEN - FESTLEGUNGEN IN SPEZ. WERKSTATT RICHTLINIEN | $d_{zul} = \frac{k_1}{b_c} \left(\frac{b_1}{K_2} \right)^2$ bzw. $\frac{k_1}{b_c} \left(\frac{h_{st}}{K_2} \right)^2$ NICHT UNTER 15 mm ERFORDEL. (werte nach TABLE 23.1 MEHR.) $d_{zul} = 1,6 \text{ mm}$ $\sqcup d_{zul} = 1,5 \text{ mm}$ | JMPERFEKTION KANN 2.8 ÜBER MITTRAGENDE BREITE BEI BEULUNG MIT KRÄFTE- FREIEM RAND GEF. WERDEN |
|  | $d_{zul} = \lambda_{min}/250$ BSP. $d_{zul} = 2,4 \text{ mm}$ | $d_{zul} = 2 + \frac{t}{6} (\text{mm})$ NICHT MEHR ALS $t/3$ ERFORDEL. BSP. $d_{zul} = 4,0 \text{ mm}$ | JMPERFEKTION DURCH HOHERE BEULSICHERHEITS- ZAHL ARGEDECKT SOWIE BEI GURT FAULKNEE - FORM. |
| ABMESSUNGEN BEISPIELE | a)  b)  | $a = 250 \text{ cm}$ $i = 3,59 \text{ cm}$ $t = 1,2 \text{ cm}$ $\lambda = 70$ $F_{eff} = 81,6 \text{ cm}^2$ $J_{eff} = 1053 \text{ cm}^4$ | $a = 250 \text{ cm}$ $i = 4,35 \text{ cm}$ $t = 1,2 \text{ cm}$ $\lambda = 58$ $F_{eff} = 84,4 \text{ cm}^2$ $J_{eff} = 1605 \text{ cm}^4$ $b_1 = 60 \text{ cm}$ |

geringeren geometrischen Imperfektionen nach dem bei uns auf Spannungstheorie II. Ordnung aufbauenden Omega-Verfahren zugrunde zu legen.

Die Berücksichtigung der Restdruckspannungen auf das Beulverhalten oder die mitwirkende Breite des anteiligen Plattenstreifens kann dabei zweckmäßigerweise über eine "effektive" Vorbeulung nach dem Vorschlag von FALCONER und CHAPMAN erfolgen. Nachrechnungen an verstieften Druckgurtungen haben jedoch gezeigt, daß die gleichzeitige Berücksichtigung etwa den MERRISON-Empfehlungen entsprechender Imperfektionen mit Steifenvorkrümmung, Plattenvordeformation und Zwängungseinfluß zu relativ aufwendigen Dimensionierungen führt.

Eine Möglichkeit, die Druckstab analogie in Richtung auf die von der Längs- und Quersteifigkeit abhängige Flächentragwirkung zu beziehen, bestünde darin, die Systeme des imperfektionsfreien isolierten Druckstabes mit zugehörigem Plattenanteil mit dem nicht vordeformierten zweiachsig wirkenden Gesamtsystem (diskrete oder verschmierte Erfassung der Steifen) in Beziehung zu setzen. Die Imperfektionsempfindlichkeit des stellvertretenden Druckstabes kann dabei zum Maßstab der Tragfähigkeitsminderung des Gesamtsystems gemacht werden. Berücksichtigt man den Umstand, daß der in der Interaktionsbeziehung isoliert zu betrachtende Schubfall, speziell bei überkritischer Ausbildung eines Zugfeldes weniger imperfektionsgefährdet ist, so könnte im ökonomischen Sinne hier noch eine Wichtung der Einflüsse vorgenommen werden.

Es eröffnet sich auch die Möglichkeit, die Druckstab analogie für anderweitige Belastungskombinationen im Sinne der MERRISON-Empfehlungen nutzbar zu machen, wobei eine Koppelung der Randspannung des vorgekrümmten Druckstabes mit der ertragbaren Vergleichsspannung des jeweils maximal beanspruchten imperfektionsbehafteten Nachbarfeldes erfolgt.

Bei den Vertikalversteifungen insbesondere der mehrfach verstieften Stegbleche sind bislang u.W. keinerlei Imperfektionen in die Berechnung eingeflossen. Hier werden wohl erstmals im MERRISON-Report auf Grund des Gedankens von RYCHMOND die abtriebswirksamen Komponenten der Druck-, Biege- und Schubbelastung an einem sin-förmig vorgekrümmten und gegebenenfalls axialkraftbeanspruchten Stab mit b/800 für einen mathematisch zwar einfachen, in der ingeniermäßigen Interpretation jedoch etwas undurchsichtigen Spannungs-Verformungszustand betrachtet. Sofern vergleichende Beuluntersuchungen, zunächst zugeschnitten auf die Lösung des Eigenwertproblems mit Hilfe moderner diskontinuierlicher Verfahren bei Einbezug MASSONNET'scher Multiplikatoren zur erhöhten Funktionssicherung der Vertikalsteife, hier auf ökonomisch vertretbare Bemessungsanforderungen führen, wäre es wünschenswert, auch die Vertikalsteifen imperfektionsbehaftet mit einer Näherungsberechnung zu dimensionieren.

Bei der zunehmenden Orientierung auf die Bemessung nach Traglasten wird der Imperfektionseinfluß auch für die Gurtungen der Vollwandträger von Bedeutung sein. Überkritische Tragfähigkeitsreserven können sich nur dann wirksam entfalten, wenn der gedrückte Gurt eine genügende Steifigkeit aufweist. Zur Erfassung des Eigenspannungseinflusses wird hier in den Berechnungsmethoden der USA die Proportionalitätsgrenze in der Knick- oder

Kipp-Spannungslinie der Gurtung bzw. des gesamten Vollwandträgers nach der sicheren Seite hin verschoben. Bei dem Vorgehen nach DDR-Standard-Entwurf werden die Imperfektionen der Gurtung wiederum gemäß den Voraussetzungen des Omega-Verfahrens bei der Gruppe der eigenspannungsbehafteten Druckstäbe mit etwas vergrößerten Vorkrümmungen zugrundegelegt.

Schließlich gilt es bei den von der Fertigung angestrebten Trägern ohne Zwischenqueraussteifungen die Formtreue in erhöhtem Maße zu sichern, wobei auch der die Kippbelastung abmindernde Effekt der Querschnittsuntreue durch wesentliche Vordeformationen nicht begünstigt werden darf.

Die Untersuchung des Imperfektionseinflusses insbesondere bei den Problemen der Biegedrillknickung und Kippung mit standardisierungsgerechten Vorgaben der Toleranzen und Berechnungsannahmen bietet noch ein breites Feld, und die Bewältigung dieser Aufgaben wird wohl die Durchführung umfangreicherer Versuchsreihen erfordern. Mit einem in der DDR aufgestellten Berechnungsprogramm für die Ermittlung des Spannungs- und Verschiebungszustandes räumlich gekrümmter Stäbe nach Theorie II. Ordnung werden solche Untersuchungen eine analytische Abstützung erfahren.

Leere Seite
Blank page
Page vide