

Zeitschrift: IABSE proceedings = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 2 (1978)
Heft: P-13: Evaluation of ultimate load tests of box steel columns made of thinwalled unstiffened plates

Artikel: Auswertung von Traglastversuchen an gedrückten Kastenstützen mit dünnwandigen, unausgesteiften Platten aus Stahl
Autor: Scheer, J. / Böhm, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-33217>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.05.2025

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

Auswertung von Traglastversuchen an gedrückten Kastenstützen mit dünnwandigen, unausgesteiften Platten aus Stahl

Evaluation of Ultimate Load Tests of Box Steel Columns Made of Thinwalled unstiffened Plates

Interprétation des résultats d'essais à la ruine sur des colonnes en caisson à parois minces non raidies

J. SCHEER

Prof. Dr.-Ing.

Technische Universität Braunschweig
BRD

M. BÖHM

Dipl.-Ing.

Technische Universität Hannover
BRD

ZUSAMMENFASSUNG

Der Auswertung und den sich anschliessenden Vergleichsrechnungen liegen 87 ausgewählte Traglastversuche an gedrückten Kastenstützen zugrunde, bei denen sich örtliches Ausbeulen der einzelnen Platten und Biegeknicken des gesamten Stabes gegenseitig beeinflussen. Weitere 264 Traglastversuche wurden herangezogen, um Grenzwerte für die Vernachlässigbarkeit des traglastmindernden Einflusses des örtlichen Ausbeulens auf das Biegeknicken zu erhalten. Die Wahl dimensionsloser, werkstoffunabhängiger Schlankheitsgrade für das einzelne Plattenelement und den gesamten Stab ermöglicht eine übersichtliche Einordnung und Auswertung der Versuche.

SUMMARY

The evaluation and following comparative calculations are based on 87 ultimate load tests of box steel columns which show interaction between local buckling of single plates and overall buckling of the member. Further 264 ultimate load tests have been used in order to establish limit values for neglecting the effect of local buckling on the reduction in ultimate buckling load. Easy classification and interpretation of tests is made possible by choosing dimensionless and material-independent slenderness ratios for the single plate element and the overall member.

RÉSUMÉ

L'interprétation des résultats et des calculs comparatifs est basée sur 87 essais à la ruine sur des colonnes en caisson, qui montrent une interaction entre le voilement local des parois minces et le flambement de la colonne. De plus, 264 essais à la ruine ont été réalisés pour obtenir des valeurs limites à partir desquelles l'influence du voilement local sur le flambement peut être négligé. Le choix des coefficients d'élancement indépendants du matériau et sans dimension pour la paroi et pour la colonne permet une classification claire des résultats.



1. EINFÜHRUNG

Anlaß für diese Zusammenstellung und Auswertung gab eine erste Überarbeitung der westdeutschen Baubestimmung für Plattenbeulen in den Jahren 1974 bis 1977 durch eine Arbeitsgruppe "Platten" des Westdeutschen Ausschusses für Stahlbau (DASt). Nahziel dieser Überarbeitung war ein Ersatz des Abschnittes über das Plattenbeulen der DIN 4114 (1952) durch eine DASt-Richtlinie. Fernziel ist deren Novellierung im Rahmen der Erneuerung aller Abschnitte dieser Norm. Die DASt-Arbeitsgruppe "Platten" hielt es für notwendig, u.a. die Grundlagen des Abschnitts 9 "Dünnwandige Teile von Druckstäben" und 17.5 "Beuluntersuchung von Rechteckplatten, die Bauteile eines Druckstabes sind" der DIN 4114 (1952) neu zu durchdenken. Dabei gaben Versuchsergebnisse wichtige Hilfen, um sowohl die theoretischen Überlegungen als auch die Gültigkeit von Sicherheitsnachweisen zu überprüfen. Daher wurden alle in der Literatur uns bekannten Versuchsergebnisse gesichtet und, falls verwertbar, zusammengestellt und ausgewertet. Hier soll über diejenigen berichtet werden, die an gedrückten, planmäßig geraden Kastenstützen aus Stahl mit dünnwandigen, nicht ausgesteiften Plattenelementen gewonnen wurden. Dafür wurden die von Herzog [1] zusammengestellten Quellen und die Versuchsberichte von Dwight/Chin/Ractliffe/Graves/Smith [2] und von Barbré/Grassl/Schmidt/Krupp [3] herangezogen.

Im Entwurf für eine DASt-Richtlinie "Beulsicherheitsnachweise für Platten" der Arbeitsgruppe "Platten" ist der Nachweis der erforderlichen Beulsicherheit von dünnwandigen Teilen von Druckstäben neu geregelt [4]. Die vorgeschlagenen Regeln werden im Abschnitt 5 mit den Versuchsergebnissen verglichen, ferner mit einem Bemessungsvorschlag von Herzog [1] und dem Nachweis nach DIN 4114 (1952).

Das Ziel der Auswertung galt der Erfassung folgender Einflüsse auf die Traglast des Stabes und ihrer dünnwandigen Teile:

- Schlankheitsgrad des Stabes,
- Vergleichsschlankheitsgrade der dünnwandigen Plattenelemente,
- Werkstoffverhalten,
- Vorverformungen (geringe Lastexzentrizität eingeschlossen) und
- Eigenspannungen.

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Zusammenstellungen und Auswertungen konnten im Rahmen des DASt-Gemeinschaftsprogramms "Plattenbeulversuche", hier im Teilprogramm "Kleine Kastenträger ohne Steifen" durchgeführt werden. Sie wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert, wofür die Verfasser auch an dieser Stelle danken.

2. VERNACHLÄSSIGBARKEIT DES ÖRTLICHEN AUSBEULENS AUF DAS BIEGEKNICKEN

Traglastversuche an Druckstäben mit gedrunkenen Plattenelementen sollen hier nur kurz erörtert werden. Es wird auf die Untersuchungen der Europäischen Konvention des Stahlbaus (EKS) verwiesen [5], deren Kommission VIII auf Grund statistischer Auswertungen von über 1000 Traglastversuchen und Vergleichsrechnungen Bemessungsregeln vorgeschlagen hat, die inzwischen als Europäische Knickspannungslinien allgemein bekannt sind.

Die aus diesen Bemessungsregeln ermittelte rechnerische Traglast stellt eine obere Schranke für die Traglast der Druckstäbe mit dünnwandigen Bauteilen dar,

denn wegen der kleinen b/t -Verhältnisse (b = Breite der Platte, t = Dicke der Platte) der EKS-Versuche beeinflußt das örtliche Ausbeulen der Plattenelemente die Traglast nicht. Die b/t -Verhältnisse liegen immer unter den Grenzwerten der DAST-Richtlinie 008 "Zur Anwendung des Traglastverfahrens im Stahlbau", bei der örtliches Ausbeulen erst dann berücksichtigt werden muß, wenn die bezogene Vergleichsschlankheit $\bar{\lambda}_V = \sqrt{\beta_S / \sigma_{1Ki}}$ (β_S = Fließspannung, σ_{1Ki} = ideale Beulspannung der Platte) größere Werte als $\bar{\lambda}_V > \text{rd. } 0,6$ für den Stahl 37 und St 52 besitzt.

Traglastversuche von Moxham [6] an Platten bestätigen diese Werte (Bild 1), da im Bereich $\bar{\lambda}_V < 0,6$ für die bezogene Traglastspannung $\bar{\sigma}_u = \sigma_u / \beta_S$ $\bar{\sigma}_u \geq 1,0$ gilt.

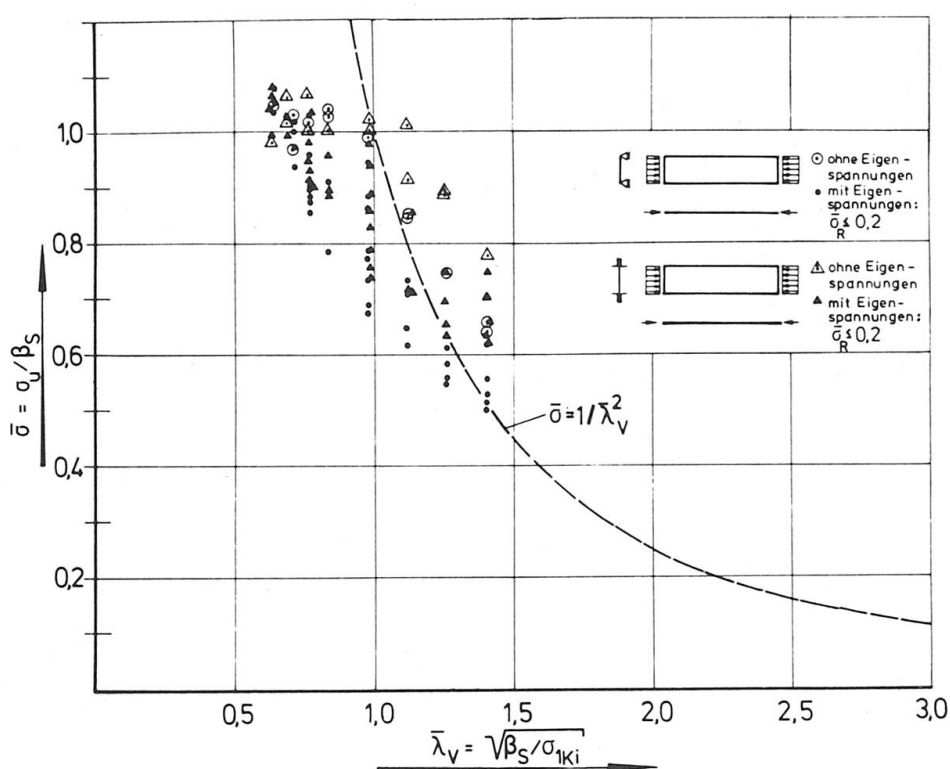


Bild 1 Traglastversuche an Platten nach Moxham [6]

Diese Versuche lassen darüber hinaus differenzierte Aussagen zu. Wenn man einerseits vereinfachend, andererseits - wie im Abschnitt 3 herausgestellt werden wird - bei einer Reihe von Parameterfällen notwendigerweise die zur Berechnung des bezogenen Vergleichsschlankheitsgrades $\bar{\lambda}_V$ erforderliche ideale Beulspannung σ_{1Ki} der Plattenelemente immer mit dem Beulwert $k = 4$, also $\sigma_{1Ki} = 4 \cdot \sigma_e$ berechnet, zeigen Platten ohne Eigenspannungen mit eingespannten Längsrändern oberhalb von $\bar{\lambda}_V = 0,75$ und für Platten ohne Eigenspannungen mit gelenkiger Längsrandlagerung erst oberhalb von $\bar{\lambda}_V = 0,97$ einen Abfall der Traglastspannung unter die Fließspannung β_S .

Eine Zusammenstellung von Versuchsergebnissen an kurzen Druckstäben [2] und [7] bis [12] liefert zum Teil kleinere Grenzwerte der bezogenen Blechschlankheit $\bar{\lambda}_V$ für $\bar{\sigma} \geq 1$ (Bild 2).

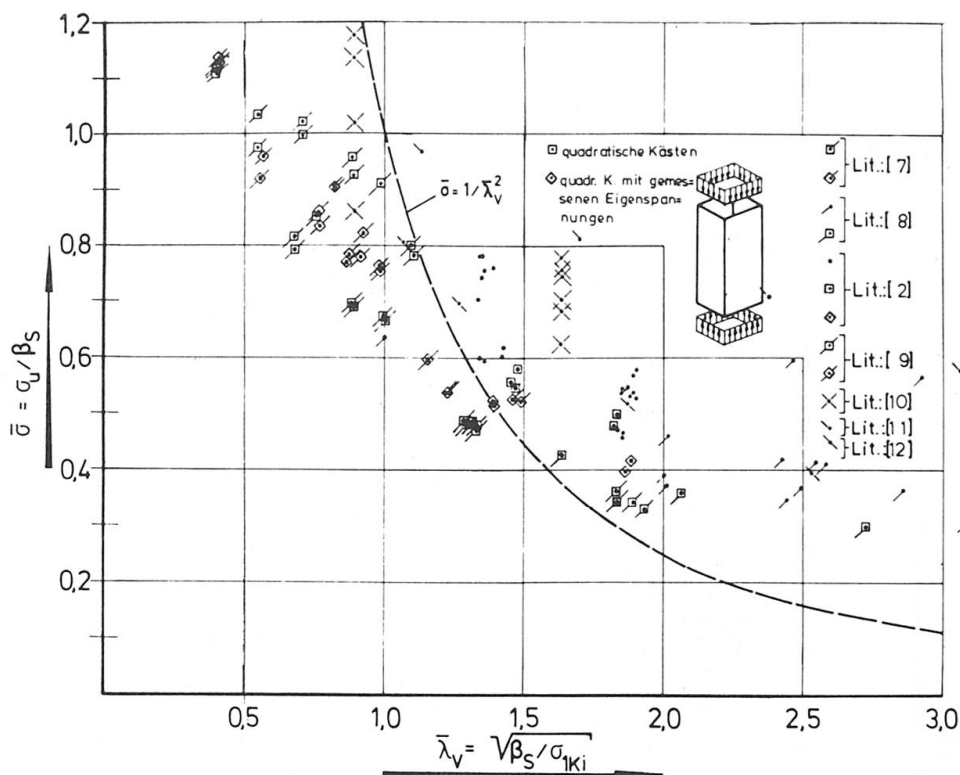


Bild 2 Traglastversuche an kurzen Kastenstützen, eine Zusammenstellung von Versuchsergebnissen

Ab $\bar{\lambda}_V = 0,50$ gibt es Versuchswerte, deren Traglast - bedingt durch örtliches Ausbeulen - niedriger liegt, als die rechnerisch angenommene Fließlast $P_F = \beta_s \cdot F$ (F = Querschnittsfläche). Die Grenze für die Versuche liegt in einem $\bar{\lambda}_V$ -Bereich von 0,50 bis 0,97. Die relativ große Streuung des Grenzwertes ist in der Vernachlässigung folgender Einflüsse begründet: Längsrandlagerung, Eigenspannungen, Vorverformungen, Werkstoffeigenschaften.

3. VERNACHLÄSSIGBARKEIT DES EINFLUSSES DES BIEGEKNICKENS AUF DAS ÖRTLICHE AUSBEULEN

Auswertungen von Traglastversuchen an Knickstäben [5] zeigen, daß der Einfluß des Biegeknicks für bezogene Stabschlankheiten $\bar{\lambda}_K \leq 0,2$ vernachlässigt werden kann.

Einen Einblick in das Tragverhalten von Rechteckplatten mit gelenkiger und eingespannter Längsrandlagerung geben die 146 Traglastversuche von Moxham [6] mit einer Blechdicke $t = 3$ mm und einer unteren Fließspannung $\beta_{s,u} = 232$ N/mm² in einem b/t -Bereich von 36 bis 80 mit unterschiedlichen Eigenspannungen σ_R bis zu $\bar{\sigma}_R = \sigma_R / \beta_{s,u} = 0,20$. 140 Platten haben ein Seitenverhältnis $\alpha = 4$, sechs Platten $\alpha = 0,9$. Die Vorverformungen der Platten sind sehr gering und haben nur einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Traglast (Bild 1).

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich zwei wichtige Rückschlüsse auf die Traglast von Knickstäben mit dünnwandigen Bauteilen ziehen:

- Obwohl die ideale Beulspannung von an den Längsrändern starr eingespannten Platten 75 % höher als die von Platten mit gelenkig gelagerten Längsrändern ist, liegt die beobachtete Traglast im b/t -Bereich der Versuche von Moxham nur 14 % bis 20 % höher.

An der oberen Grenze von $b/t = 80$ ergibt sich für eingespannte Längsränder eine ideale Beulspannung von 202 N/mm^2 ; sie liegt also nur geringfügig über der Proportionalitätsgrenze für den Stahl St 37. Ähnlich geringe Lasterhöhungen können auch für elastisch eingespannte Platten erwartet werden. Die aufgrund eines Vergleichs nach der physikalisch und geometrisch linearen Beultheorie vermutete Erhöhung der Tragfähigkeit infolge Eigenspannung der Längsränder ist nur gering. Es wird daher empfohlen, immer von der Annahme gelenkiger Lagerung der Längsränder auszugehen. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse und Einordnung in Vergleiche mit dimensionslosen Druckstäben wird daher immer von $\sigma_{1Ki} = 4 \cdot \sigma_e = 4 \cdot (431,6 \cdot t/b)^2 [\text{N/mm}^2]$ und $\bar{\lambda}_V = \sqrt{\beta_S / \sigma_{1Ki}}$ ausgegangen.

- Die in die Platten eingebrachten Schweißeigenspannungen reduzieren die Traglast in Abhängigkeit vom b/t -Verhältnis bis auf 70 %. Der Zusammenbruch erfolgt nicht schlagartig, wie er bei Platten ohne Schweißeigenspannungen mit einem b/t -Verhältnis ≥ 43 zu beobachten ist. Das Verformungsverhalten ist demgemäß unterschiedlich: Die Verkürzung der Platten kann im Gegensatz zu den Platten ohne Schweißeigenspannungen ein Vielfaches der Fließverkürzung betragen, ohne einen nennenswerten Traglastabfall feststellen zu müssen.

4. INTERAKTION ZWISCHEN BIEGEKNICKEN UND BEULEN VON KASTENSTÜTZEN MIT DÜNNWANDIGEN BAUTEILEN AN HAND VON TRAGLASTVERSUCHEN

Für die Auswertung liegen 87 Traglastversuche^x aus den Literaturquellen [2], [3], [8], [10], [11] und [12] vor. Weitere 110 Traglastversuche an kurzen Kastenstützen sind in Abhängigkeit der bezogenen Vergleichsschlankheitsgrade $\bar{\lambda}_V$ in Bild 2 aufgetragen und lassen sich mit den Traglastversuchen an Platten [6] vergleichen.

x Auf eine Darlegung des umfangreichen Zahlenmaterials wird verzichtet. Nur die wichtigsten Einflußgrößen sollen besprochen werden.

4.1 Querschnittsform

Bei den Versuchen sind unterschiedliche Querschnittsformen gewählt worden (Bild 3), um sowohl bestimmte Parameter gezielt zu untersuchen, als auch bestimmte Einflüsse zu unterdrücken.

Die Querschnittsform A, in einem Strangpreßverfahren hergestellt, weist vernachlässigbar geringe Eigenspannungen auf und verhindert für zentrischen Druck Spannungsumlagerungen von einem Plattenelement auf das andere. Für die Einzelplatte kann eine nahezu gelenkige Längsrandlagerung unterstellt werden, wie sie nur noch bei Querschnittsform B vorhanden ist.

Baupraktisch häufig vorkommende geschweißte Kastenstützen werden durch die Querschnittsformen B, C, D und E repräsentiert. Die Querschnittsformen F, G und H dagegen weisen nur geringe, durch das Abkanten der Bleche bedingte Eigenspannungen auf. Die in den Fällen C bis H vorliegenden unterschiedlichen

Einspanngrade an den Längsrändern lassen nur bedingt einen Vergleich mit den Querschnittstypen A und B zu.

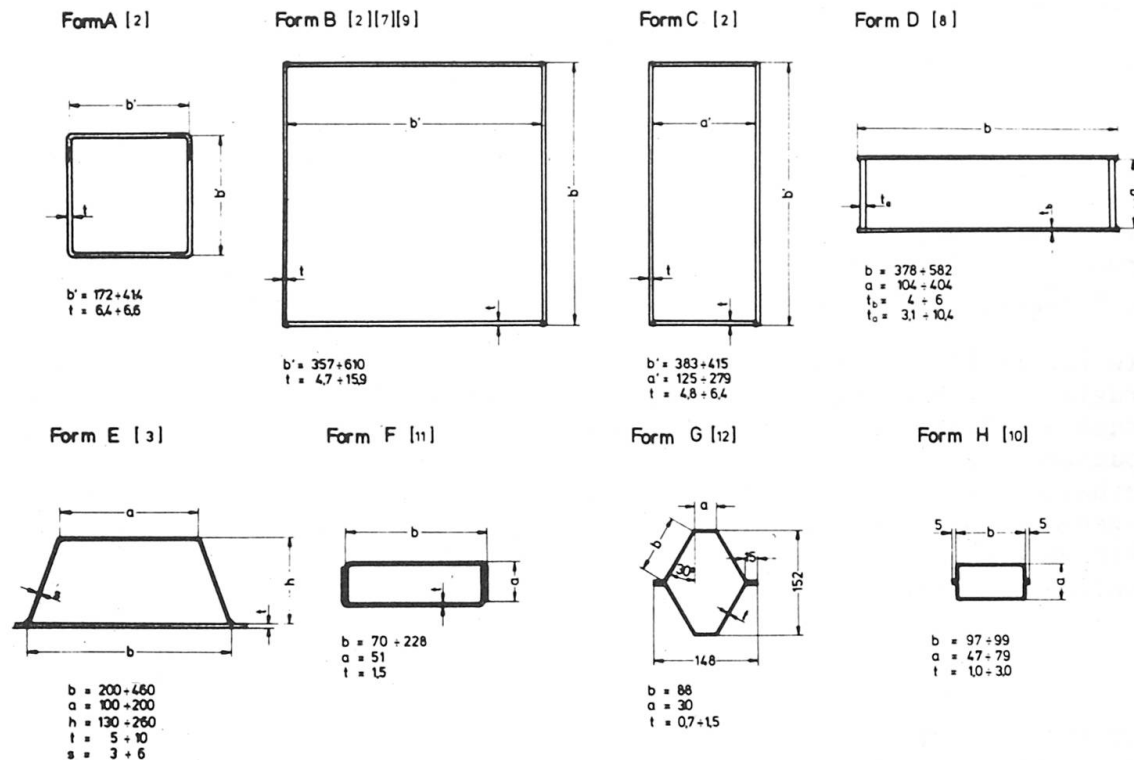


Bild 3 Querschnittsformen

4.2 Lagerungsbedingungen an den Stabenden

Die Endlager sind für die 87 untersuchten Kastenstützen so ausgebildet, daß eine ungehinderte Endverdrehung des Stabes an beiden Stabenden möglich ist. Über die Güte der Gelenke (Reibung, Rückstellmomente, Zentrierung) liegen keine Aussagen vor.

4.3 Angaben über Vorverformungen und Lastexzentrizität

Für die Querschnittsformen D und G werden von den Verfassern Angaben über Vorverformungen und Lastexzentrizitäten gemacht. So sind für den Querschnitt D die Unebenheiten der Einzelplatte mit Meßuhren gemessen worden. Die durch die Herstellbedingungen entstandenen Vorbeulen sind unregelmäßig über die Platte verteilt und erreichen maximale Werte von $0,45 \cdot t$ oder $b/210$. Die Vorauslenkung der Stabachse in Stabmitte ist kleiner als $L/1000$. Sieben der Kastenstützen haben planmäßig folgende auf die Stablänge bezogene Lastexzentrizitäten f_0/L :

Zeile	Kasten- Nr. nach [8]	$\bar{\sigma}_u$	$\bar{\lambda}_V$	$\bar{\lambda}_K$	f_o/L
1	35.1	0,24	1,80	1,36	1/460
2	36.1	0,30	1,99	1,15	1/360
3	37.1	0,37	1,88	0,90	1/290
4	35.2	0,46	1,87	0,55	1/180
5	35.3	0,51	1,86	0,41	1/140
6	36.2	0,52	1,19	0,34	1/110
7	37.2	0,57	1,88	0,27	1/ 88

Die Querschnittsform G hat eine Lastexzentrizität von $L/1000$. Weitere Imperfektionen sind in der Literatur nicht angegeben, da ihr Einfluß als gering angesehen wird.

4.4 Ermittlung der Fließspannung

Die Fließspannung dient als Bezugsgröße, um die Traglast in dimensionsloser Form angeben und damit die Versuchsergebnisse untereinander vergleichen und auswerten zu können. Die Ermittlung der Fließspannung kann auf drei verschiedenen Wegen erfolgen:

- 1) an Proben im Zugversuch [11],
 - a) obere Fließspannung $\beta_{S,o}$ [8], [12],
 - b) untere Fließspannung $\beta_{S,u}$ [6],
 - c) statische Fließspannung $\beta_{S,st}$ [7], [9],
- 2) an Proben im Druck- oder Quetschversuch [6], [9],
- 3) an kurzen Kastenstützen, die von Versuchskörpern stammen, im Druckversuch [2], [5].

Bei der im Zugversuch ermittelten Fließspannung β_S ist zu unterscheiden zwischen der oberen Fließspannung $\beta_{S,o}$, der unteren Fließspannung $\beta_{S,u}$ und der statischen Fließspannung $\beta_{S,st}$. Die Unterschiede können beträchtlich sein [13], [14]. Die obere und untere Fließspannung ist abhängig von der vorgegebenen Dehnungsgeschwindigkeit. Dieser Sachverhalt erschwert einen direkten Vergleich der Versuchsergebnisse, da die Ermittlung der Fließspannungen unterschiedlich gehandhabt wird und z. T. keine Angaben über Art der Fließspannungen und deren Ermittlung vorliegen.

Die Versuchstraglast ist zusätzlich von der Belastungsgeschwindigkeit im Versuch abhängig. Auf diese Probleme kann mangels Angaben in den Versuchsberichten nicht eingegangen werden.

Für den Vergleich der Traglastversuche besteht zur Zeit nur die Möglichkeit, die von dem Verfasser angegebenen Fließspannungen oder Fließlasten zu benutzen.



4.5 Schweißeigenspannungen

In [2] werden die Schweißeigenspannungen über den Umfang für jeden Kasten aus Dehnungsmessungen in Längsrichtung experimentell ermittelt. Mittlere Druckeigenspannungen in Stabrichtung bis zu Werten $\bar{\sigma}_R = \sigma_R / \beta_S = 0,26$ wurden festgestellt.

4.6 Zusammenfassende Darstellung der Traglastversuche in einem Schaubild

Die in Abschnitt 4.1 bis 4.5 angedeuteten Einflußgrößen, wie Vorverformungen, Lastexzentrizität, Schweißeigenspannungen und teilweise Längsrandspannungen auf die Traglast der Traglastversuche werden, wie z.B. in [15] dargestellt, in Abhängigkeit zweier Parameter, nämlich des bezogenen Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_K$ und des bezogenen Vergleichsschlankheitsgrades $\bar{\lambda}_V$, im Bild 4 dargestellt.

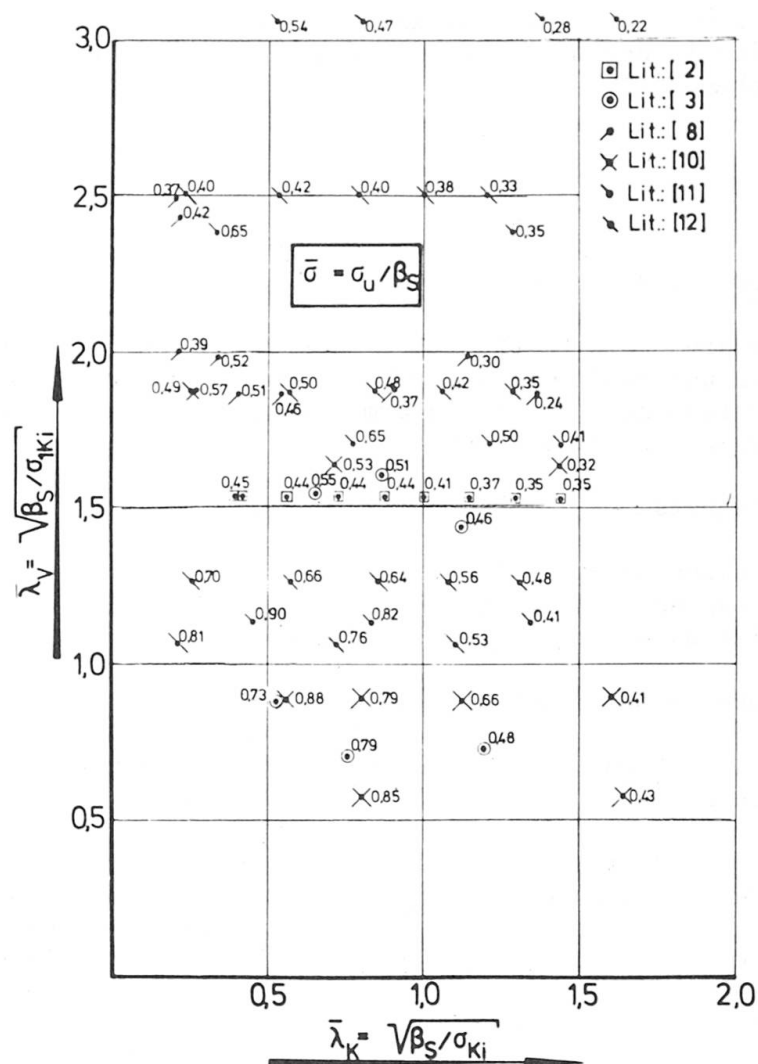


Bild 4 Traglastversuche an Kastenstützen mit dünnwandigen Bauteilen, eine Zusammenstellung von Versuchsergebnissen.

Für die Ermittlung des bezogenen Vergleichsschlankheitsgrades $\bar{\lambda}_V$ wird für alle Querschnittsformen eine gelenkige Längsrandlagerung angenommen (wie auch bei der Versuchsauswertung im Bild 1 und Bild 2). Die Traglast wird in dimensionsloser Form angegeben:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_u &= \sigma_u / \beta_S = \bar{P}_u = P_u / (F \cdot \beta_S) \text{ mit } \beta_S &= \text{Fließspannung} \\ \bar{\lambda}_K &= \sqrt{\beta_S / \sigma_{Ki}} &\sigma_{Ki} &= \text{Eulersche Knickspannung des Stabes} \\ \bar{\lambda}_V &= \sqrt{\beta_S / \sigma_{lKi}} &\sigma_{lKi} &= \text{ideale Beulspannung der Platte mit} \\ & & & \text{Navierschen Randbedingungen}\end{aligned}$$

Die den Punkten beigefügten Zahlenwerte geben die im Versuch erzielte Traglast in dimensionsloser Form $\bar{\sigma}_u = \bar{P}_u (\bar{\lambda}_V, \bar{\lambda}_K)$ an.

5. VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE MIT BERECHNUNGSVORSCHLÄGEN

Für eine statistische Auswertung der experimentell ermittelten Traglasten an Druckstäben mit dünnwandigen Bauteilen mit rechnerisch ermittelten Traglasten wurden die entsprechende Bestimmung der DIN 4114 (1952), der Bemessungsvorschlag nach Herzog [1] und der Entwurf für eine DAST-Richtlinie "Plattenbeulen" [4] herangezogen. Der Vergleich soll zeigen, inwieweit die Berechnungsmodelle in der Lage sind, die unterschiedlichen im Versuch vorhandenen Einflüsse wie Eigenspannungen, Imperfektionen und Werkstoffeigenschaften sicher abzuschätzen.

5.1 Berechnung nach Bestimmungen der DIN 4114 (1952)

Nach Abschnitt 12.5 darf bei Beuluntersuchungen von Rechteckplatten, die Bauteile eines Druckstabes sind, die Beulsicherheit v_B nicht kleiner sein als die Knicksicherheit v_K des Stabes, jedoch für die Vergleichsspannung $\sigma_{VKi} = 368 \text{ N/mm}^2$ darf die Beulsicherheit folgendermaßen reduziert werden:

$$v_B \geq 0,9 + 0,1 \left(\frac{368}{\sigma_{VKi}} \right)^2 v_K. \quad (1)$$

Die erforderliche Knicksicherheit v_K ergibt sich aus dem Verhältnis der Engeßerschen Knickspannung σ_K zur zulässigen Knickspannung $\sigma_d \text{ zul}$ nach dem ω -Verfahren:

$$\text{erf } v_K = \frac{\sigma_K}{\sigma_d \text{ zul}} \quad (2)$$

Es werden die im gedrunenen Schlankheitsbereich verringerten Knickzahlen bei einteiligen Druckstäben aus Rundrohren benutzt und damit die zulässige Knickspannung $\sigma_d \text{ zul}$ ermittelt. Um eine "rechnerische Tragknickspannung" für den gesamten zulässigen Schlankheitsbereich zu erhalten, die mit den beiden anderen Berechnungsvorschlägen verglichen werden können, wird die zulässige Knickspannung mit einer Sicherheitszahl $v = 1,70$ erhöht (Bild 5). Somit ergibt sich die bezogene rechnerische Tragspannung nach DIN 4114 (1952) zu:

$$\bar{\sigma}_{Kn} = \frac{\sigma_{Kn}}{\beta_S} = 1,7 \frac{\sigma_d \text{ zul}}{\beta_S} \quad (3)$$

Wird für die abgeminderte Beulvergleichsspannung, die der Engeßerschen Knickspannung entspricht, die gleiche Sicherheitszahl $v = 1,70$ gegenüber der zulässigen Beulspannung zugrunde gelegt, so bestimmt sich in diesem Fall die rechnerische Tragspannung für das Beulen



für $\sigma_{VKi} < 368 \text{ N/mm}^2$ zu

$$\bar{\sigma}_{VK} = \frac{\sigma_{VK}}{\beta_S} = \frac{\sigma_K}{\beta_S} \quad (4a)$$

und für $\sigma_{VKi} \geq 368 \text{ N/mm}^2$ zu

$$\bar{\sigma}_{VK} = \frac{\sigma_{VK}}{\beta_S} = \frac{\sigma_K}{\beta_S} \left(\frac{1}{0,9 + 0,1 \left(\frac{368}{\sigma_{VKi}} \right)} \right) \quad (4b)$$

Die rechnerische Tragspannung für die Interaktion zwischen Knicken und Beulen läßt sich dann folgendermaßen angeben:

$$\bar{\sigma}_{th} \leq \bar{\sigma}_{Kn} = \bar{\sigma}_{Kn} (\bar{\lambda}_K) \quad (5a)$$

und

$$\bar{\sigma}_{th} \leq \bar{\sigma}_{VK} \frac{\sigma_{Kn}}{\sigma_K} = \bar{\sigma}_{VK} (\bar{\lambda}_V) \frac{\sigma_{Kn}(\bar{\lambda}_K)}{\sigma_K(\bar{\lambda}_K)} \quad (5b)$$

Die so ermittelte bezogene Tragspannung $\bar{\sigma}$ ist in Abhängigkeit der bezogenen Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_K$ und $\bar{\lambda}_V$, wie die Bilder 5 und 6 leicht erkennen lassen, für gedrungene Querschnitte nicht unabhängig vom Werkstoff. Die höhere Tragspannung (bis 7 %) für den Werkstoff St 52 in einem Schlankheitsbereich $0,43 < \bar{\lambda}_V < 0,98$ resultiert hauptsächlich aus der höheren rechnerischen Beultragspannung $\bar{\sigma}_{VK}$, da die rechnerischen Knicktragspannungen für St 37 und St 52 annähernd gleich sind. Für den Vergleich werden die sich für den Werkstoff St 52 ergebenden Tragspannungen benutzt (Bild 7).

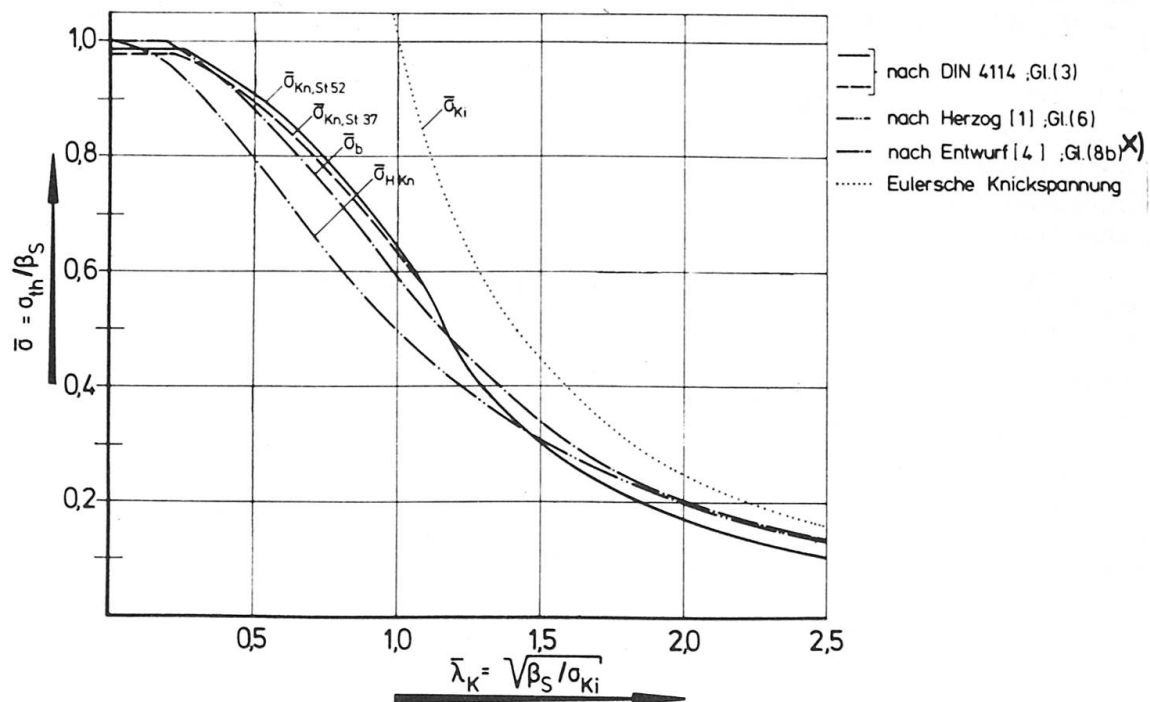


Bild 5 Zusammenstellung der rechnerischen Tragknickspannungen
x) entspricht der Traglastkurve b der EKS [5]

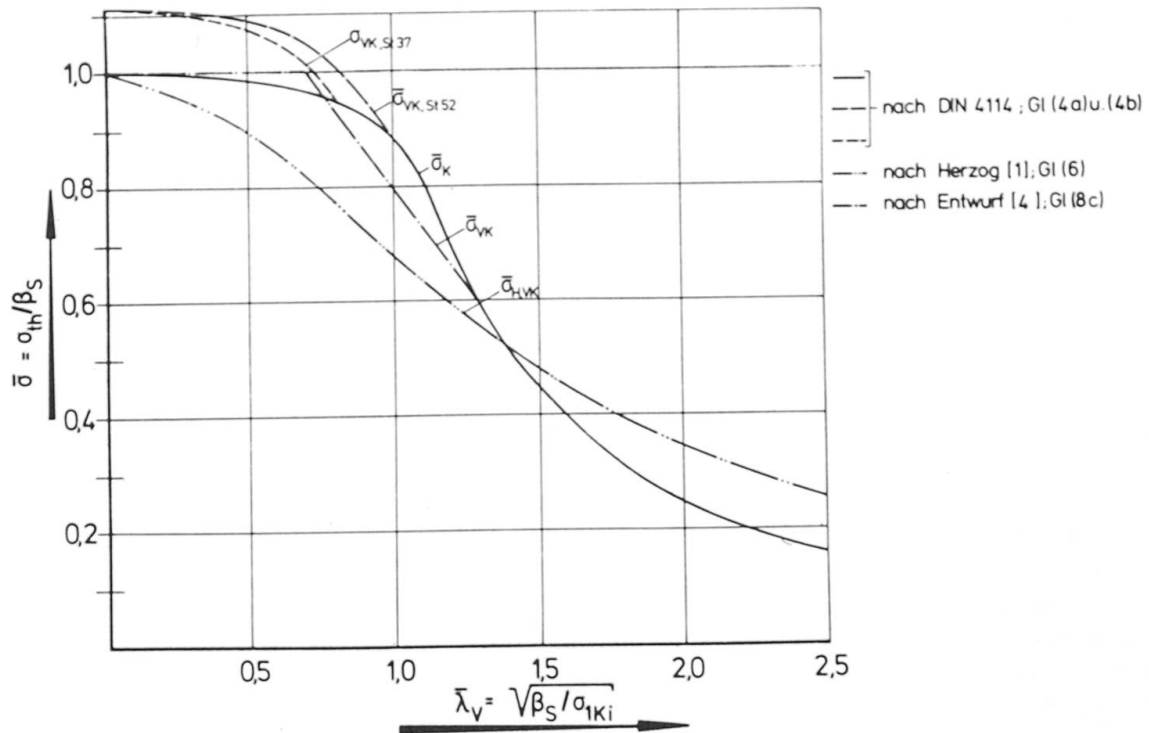


Bild 6 Zusammenstellung der rechnerischen Tragbeulspannung

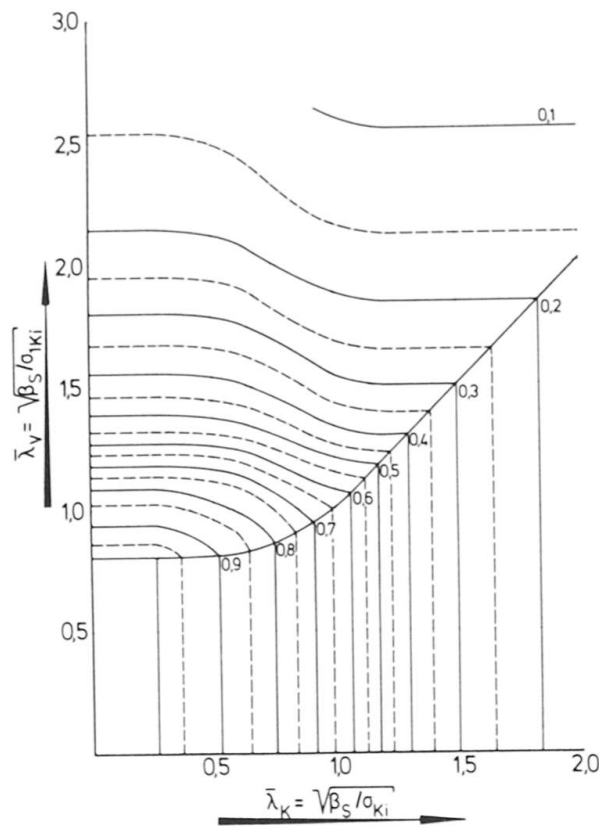


Bild 7 Interaktion zwischen Stabknicken und Plattenbeulen nach DIN 4114 (1952), Abschnitt 17.5 für St 52

5.2 Berechnung nach Herzog

Der Bemessungsvorschlag nach Herzog [1] ist aus empirischen Untersuchungen an druckbeanspruchten Kastenstützen abgeleitet. Die angegebenen Gleichungen, die zum einen eine untere Schranke, zum anderen einen Mittelwert darstellen, sind werkstoffunabhängig und lauten umgeformt nach den bezogenen Schlankheitsgraden $\bar{\lambda}_V$ und $\bar{\lambda}_K$

für die untere Schranke

$$\bar{\sigma}_{th} = \frac{1}{0,47 \bar{\lambda}_V^2 + \bar{\lambda}_K^2 + 1} \quad (6)$$

und für den Mittelwert

$$\bar{\sigma}_{th} = \frac{1}{\sqrt{0,22 \bar{\lambda}_V^4 + \bar{\lambda}_K^4 + 1}} \quad (7)$$

Im Interaktionsdiagramm (Bild 8, Darstellung der Gl. (6)) stellen die Kurven mit $\bar{\sigma} = \text{const}$ Ellipsen dar mit $\bar{\lambda}_V$ - und $\bar{\lambda}_K$ -Achsen als Hauptachsen. Die rechnerische Traglastkurve für $\bar{\sigma}_{th} = \bar{\sigma}_{th}(\bar{\lambda}_K, \bar{\lambda}_V = 0)$ ist in Bild 5, für $\bar{\sigma}_{th} = \bar{\sigma}_{th}(\bar{\lambda}_K = 0, \bar{\lambda}_V)$ in Bild 6 mit aufgenommen.

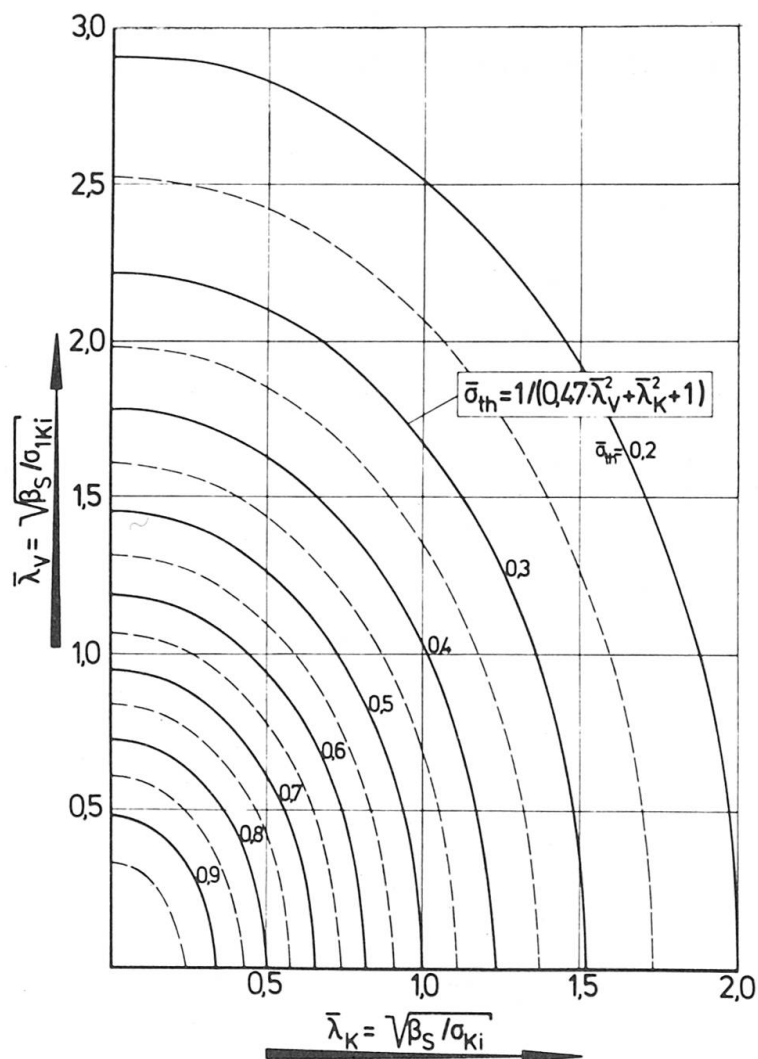


Bild 8 Interaktion zwischen Stabknicken und Plattenbeulen nach Herzog [1]

5.3 Berechnung nach dem Entwurf für eine DAST-Richtlinie "Plattenbeulen"

Die Traglastkurve für das Knicken ohne Einfluß des örtlichen Ausbeulens dünnwandiger Plattenelemente nach dem Entwurf entspricht der Traglastkurve b der EKS [5], die eine sinusförmige Vorauslenkung des Stabes von $L/1000$ berücksichtigt und Druckeigenspannungen bis $\bar{\sigma}_R = 0,6$ für geschweißte Kastenstützen mit erfaßt. Die Traglastkurve b ist im Bild 5 aufgenommen. In Bild 6 ist die bezogene Beulspannungskurve des Entwurfes wiedergegeben. Nach dem Entwurf werden vier Bereiche im Interaktionsdiagramm zwischen Knicken des gesamten Stabes und örtlichem Ausbeulen der Plattenelemente angegeben (Bild 9):

Bereich I: keine Instabilität

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_K &< 0,2 \\ \bar{\lambda}_V &< 0,7 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \bar{\sigma}_{th} = 1 \quad (8a)$$

Bereich II: nur Stabknicken

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_K &> 0,2 \\ \bar{\lambda}_V &< 0,08 (\bar{\lambda}_K - 0,2)^2 + 0,7 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \bar{\sigma}_{th} = \bar{\sigma}_b(\bar{\lambda}_K) \quad (8b)$$

Bereich III: nur Plattenbeulen

$$\bar{\lambda}_V > \frac{4}{3} (\bar{\lambda}_K - 0,2)^{\frac{3}{4}} + 0,7 \quad \rightarrow \quad \bar{\sigma}_{th} = \bar{\sigma}_{VK}(\bar{\lambda}_V) \quad (8c)$$

Bereich IV: Interaktion zwischen Stabknicken und Plattenbeulen

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_V &> 0,08 (\bar{\lambda}_K - 0,2)^2 + 0,7 \\ \bar{\lambda}_V &< \frac{4}{3} (\bar{\lambda}_K - 0,2)^{\frac{3}{4}} + 0,7 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \bar{\sigma}_{th} = \bar{\sigma}(\bar{\lambda}_V, \bar{\lambda}_K) \quad (8d)$$

(lineare Interaktion)

Die Berechnung von Druckstäben mit dünnwandigen Bauteilen nach dem Entwurf soll auch für längsausgesteifte Platten gelten. Die Festlegung des Berechnungsvorschlages stützt sich sowohl auf Versuchsergebnisse an unausgesteiften und längsausgesteiften Platten, als auch auf Vergleichsrechnung nach Elastizitätstheorie 2. Ordnung an Druckstäben mit dünnwandigen Bauteilen [16], [17]. Die im Bild dargestellten Geraden der Interaktion zwischen Stabknicken und Plattenbeulen des Bereichs IV ergaben sich aus diesen theoretischen Untersuchungen. Es wurde - wie in allen Abschnitten des Entwurfes der DAST-Richtlinie - auf die Ausnutzung der überkritischen Tragreserven der Platten verzichtet, um - ohne Absicherung durch einen besonderen Gebrauchsfähigkeitsnachweis - im Gebrauchszustand größere Verformungen zu vermeiden. Für die Praxis hat im übrigen der Bereich $\bar{\lambda}_V > 1,3$ mit nennenswerten überkritischen Reserven keine Bedeutung.

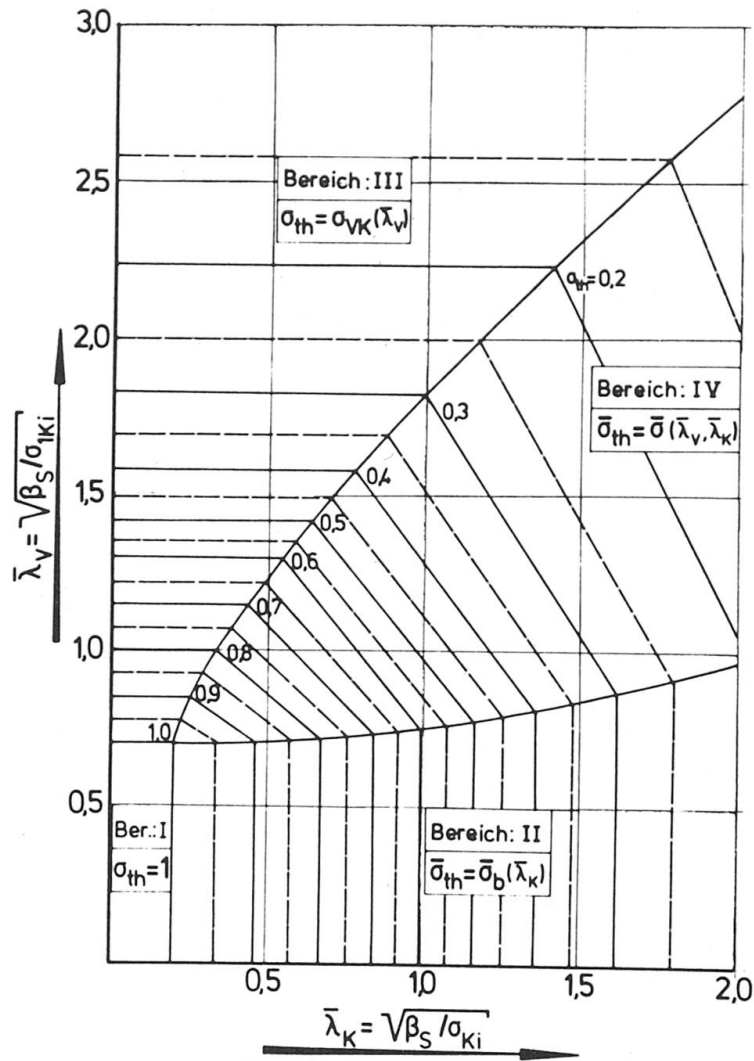


Bild 9 Interaktion zwischen Stabknicken und Plattenbeulen nach Entwurf (Juni 1977) [4].

5.4 Vergleichsrechnung

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen sind in Bild 10 zusammengestellt. Zusätzlich wurde eine Aufteilung der Traglastversuche in drei Klassen vorgenommen. Der gekreuzt schraffierte Bereich gilt für die Versuche mit einer bezogenen Vergleichsschlankheit $\bar{\lambda}_V \geq 2,0$, der einfach schraffierte Bereich für $1,5 \geq \bar{\lambda}_V < 2,0$ und der Bereich ohne Schraffierung für $\bar{\lambda}_V < 1,5$.

Die Dreiteilung wurde vorgenommen, um die Ergebnisse besser beurteilen zu können, da sowohl die Bestimmungen der DIN 4114 (1952) als auch der Entwurf für eine Richtlinie "Plattenbeulen" bewußt auf die überkritischen Tragreserven des Plattenelementes im höheren Vergleichsschlankheitsbereich verzichten, um größere Verformungen des Bleches zu vermeiden. An Hand der Auftragung der Ergebnisse in Form einer Summenlinie, die zusätzlich in Bild 10 aufgenommen wurde, läßt sich die Streuung der einzelnen Verfahren übersichtlich ablesen.

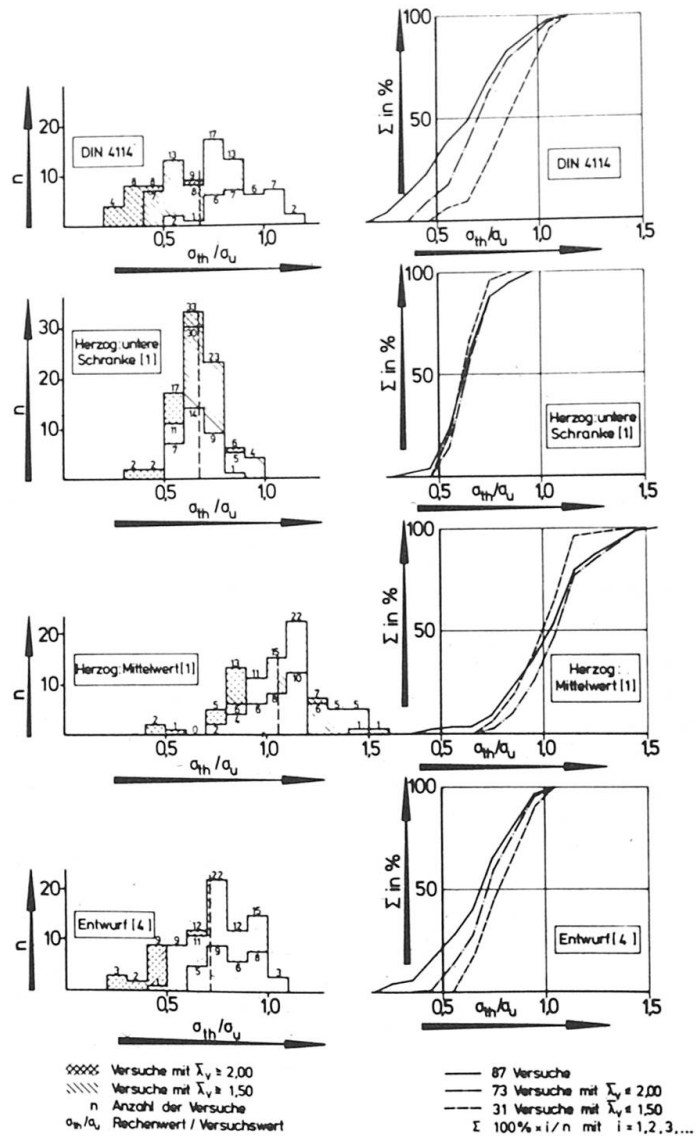


Bild 10 Auswertung von 87 Traglastversuchen an dünnwandigen Kastenstützen

LITERATURVERZEICHNIS

1. M. Herzog: "Die Traglast dünnwandiger Kastenstützen mit Imperfektionen und Eigenspannungen unter zentrischem Druck nach Versuchen", VDI-Z 118 (1976) Nr. 2.
2. J. D. Dwight/T. K. Chin/N. T. Ractliffe/T. R. Graves Smith: "Local buckling of thin-walled columns", CIRIA Research Report 12, London, 1968.
3. R. Barbré/H. Grassl/H. Schmidt/J. Kruppe: "Traglastversuche an Ausschnitten gedrückter Gurte mehrerer Hohlkastenbrücken", Inst. f. Stahlbau, TU Braunschweig 1976.



4. Entwurf (Juni 1977) für eine DAST-Richtlinie "Beulsicherheitsnachweis für Platten", Arbeitsgruppe "Platten" des DAST-Unterausschusses Stabilität.
5. H. Beer/G. Schulz: "Traglast des planmäßig mittig gedrückten Stabs mit Imperfektionen", Teil 1-3, VDI-Z 111 (1969) Nr. 21, Nr. 23 und Nr. 24.
6. K. E. Moxham: Buckling tests on individual welded steel plates in compression", CUED/C-Struct./TR.3, Cambridge 1971.
7. F. Nishino/Y. Ueda/L. Tall: "Experimental investigation of the buckling of plates with residual stresses", ASTM STP 419, Am. Soc. Testing Mats., 1967.
8. K. Klöppel/R. Schmied/J. Schubert: "Die Traglast mittig und außermittig gedrückter dünnwandiger Stützen ...", Teil II, Der Stahlbau 1969/1 und 3.
9. J. B. Dwight/K. E. Moxham: "Welded steel plates in compression", The structural engineer, No. 2, Vol. 47, London, 1969.
10. M. Skaloud/M. Zörnerová: "Experimental investigation into the interaction of the buckling of compressed thin-walled columns with the buckling of their plate elements", Acta Technica CSAV, No. 4, 1970.
11. J. De Wolf/T. Pekoz/G. Winter: "Interaction of postcritical plate buckling with overall column buckling of thin-walled members", 9th Vorbericht Congress in Amsterdam, IVBH, Zürich, 1972.
12. S. Baar/F. Hick: "Interaction du flambement et du voilement dans les barres elances a parvis minus", Construction Métallique, No. 30, 1972.
13. K.-F. Koch: "Zur Bestimmung der Fließspannungen für die Auswertung von Versuchen an Stahlbauten", Materialprüf. 18 (1976) Nr. 2 Februar.
14. R. Barbré: "Zur Frage der Ermittlung der Werkstoffkennwerte bei Baustahl", Inst. f. Stahlbau Braunschweig, Bericht 7506, 1975.
15. H. Schmidt: "Zum Tragverhalten axial gedrückter geschweißter längsversteifter Blechfelder", TU Hannover, Schriftreihe Heft 9, 1975.
16. H. Nölke: "Steel Plated Structures", Vol. II, Contribution to Session 4, 1977.
17. H. Nölke: "Zum Traglastverfahren bei dünnwandigen Stahlbauteilen", Vortrag an der TU München am 24.5.76 (unveröffentlicht).