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

**Band:** 11 (1971)

**Artikel:** Das überkritische Verhalten von Aluminium-Vollwandträgern mit Querstreifen (I. Bericht (1970) aus der "Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine", Universität Karlsruhe)

**Autor:** Steinhardt, O. / Schröter, W.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-12058

**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:** 15.07.2025

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

# Das überkritische Verhalten von Aluminium-Vollwandträgern mit Quersteifen (I. Bericht (1970) aus der "Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine", Universität Karlsruhe)

Post-Critical Behaviour of Aluminium Plate Girders with Transverse Stiffeners (1st Report 1970)

Comportement post-critique des poutres à âme pleine en aluminium, munies de raidisseurs transversaux (1er rapport 1970)

O. STEINHARDT
Prof.Dr.-Ing., Dr.sc.techn.h.c.

W. SCHRÖTER
Dipl.-Ing., Wiss.Ass.

Karlsruhe, BRD

## 1. Einführung

Im überkritischen Bereich interessiert seit dem JVBH-Kongreß in New York (1968) das optimale Zusammenwirken der Gurte, des Steges und der Quer- und Längssteifen, wobei letztgenannte die Felder a x b gemäß a x $(b_1+b_2+\ldots)$ unterteilen können; auch geneigte oder gekrümmte Steifen sind möglich.- Die Art der Verbindung zwischen den genannten Bauelementen eines Vollwandträgers und deren Querschnittsformen (torsionsweich bzw.-steif und biegeweich bzw.-steif) bleibt überdies wesentlich.

In d i e s e r Untersuchung sollen ausschließlich Einfeldträger unter mittiger Einzellast betrachtet werden, die beiden (symmetrischen) Felder a x b sind durch biegeelastische Gurte und Steifen begrenzt; dabei sind für sämtliche Versuchsträger bei den Stegen die Voraussetzungen der klassischen (linearen) Beultheorie n i c h t erfüllt (also es ist insbesondere die Stegverformung $w > 0{,}3 \cdot t$).- Wie "starr" die Steifen auszubilden sind (z.B. Längssteifen gemäß $k \cdot \gamma^* = k \cdot EJ/b \cdot D$ o.ä.) und wie weit die kritischen Beulspannungen des Steges überschritten werden dürfen (z.B. gemäß $(\tau/\tau_{Kr})^2 + (\sigma/\sigma_{Kr})^2 = 2{,}25$ o.ä.) soll erst später anhand spezieller Traglast-Versuche zu klären versucht werden; jedenfalls sind die Verfasser z.Zt. schon überzeugt davon, daß der "Sicherheitsfaktor" gegenüber $\sigma_{Kr}$ bzw. $\tau_{Kr}$ jeweils $\nu_B < 1$ sein kann, weil einerseits (gerade auch bei Aluminium-Vollwandträgern) die "Traglast" relativ sehr hoch liegt und andererseits bis zur elastischen Grenslast $P_{Gr}^{el}$ (siehe S.4) der Gebrauchszustand der Träger nicht beeinträchtigt erscheint.

## 2. Stand der Forschung

Ch. MASSONNET hat (zunächst im Vorbericht und späterhin im Schlußbericht zum New Yorker Kongreß [1,2]) einige allgemeingültige Folgerungen aus zahlreichen einschlägigen V e r s u c h e n und theoretischen Untersuchungen gezogen, die auch für unsere z u s ä t z l i c h e n Betrachtungen von Bedeutung sind: das Beulen des Stegbleches geht hiernach kontinuierlich, und weiterhin (dies bis zu $P_{Gr}^{el}$) elastisch vor sich; (der Quotient $P_{Gr}^{el}/P_{Kr}$ wurde bei Stahlträgern bei 2,8 ermittelt, für Aluminiumträger fand ROCKEY einen Wert von 4,0). Ferner besteht keine proportionale Beziehung zwischen Traglast ($P_{Tr}^{pl}$) und klassischer Beullast ($P_{Kr}$); das die Gurte (und Steifen) auf Biegung beanspruchende unvollkommene "Zugfeld" wird von der "Rahmensteifigkeit" der Feldränder bestimmt.-

Die Traglast - sei sie nun dargestellt als "Versagenslast" $P_{Tr}^{pl}$ oder als "elastische Grenzlast" $P_{Gr}^{el}$ - bestimmt die "überkritische Tragreserve" (über $P_{Kr}$ hinaus), die sicherlich mit dem Dünnheitsmaß des Steges b/t relativ ansteigt, und die zusätzlich (man vergleiche Stahl- mit Aluminium-Vollwandträgern) nach Maßgabe von $\sigma_F/E$ bzw. $\sigma_{0,2}/E$ dabei zunimmt. Die Traglast erhöht sich bei zunehmender Biegesteifigkeit des "Feldrahmens", wobei K.C. ROCKEY [3] (für $\alpha = a/b = 2$) bei Bemessung der Gurte eine Begrenzung der Beulentiefen (des Steges) im Auge hat. Teilweises Nachgeben des Steges innerhalb der Biegedruckzone soll nach K. BASLER-B. THÜRLIMAN [4] eine Senkung der neutralen Faser bewirken, auch sollen die lotrechten Querpressungen der Gurte über den ganzen Steg möglich sein (hieraus resultiert der Bemessungsgrenzwert $b/t \leq 360$ für Stahl), außerdem wird dem Druckgurt eine teilweise Mitwirkung des Steges (gemäß $30 \cdot t$) zugewiesen. Zuletzt wird von ihnen angenommen, daß der Schubwiderstand eines Stegbleches als reines Schubfeld ($\tau_{Kr}$) bis zum Versagen des Steges bestehen bleibt, und daß das angebliche WAGNER'sche Diagonalzugfeld diesem "reinen" Schubfeld überlagert werden kann. Aus allen diesen Annahmen erhält man die Traglast $T_{ult}$ [8.2 des Vorberichtes [1]] .- Für die gleichzeitige Wirkung von Schub und Biegung schlägt BASLER-THÜRLIMAN das Gesetz der Spannungsüberlagerung [gemäß [1] 8.3 sowie Figur 8.3] vor.- Diese sogenannte amerikanische Bemessungsmethode wurde in den AJSC-Normen aufgenommen.

Zusammenfassend stellte Ch. MASSONNET 1968 [2] fest, daß zwar durch die Kongreß-Berichte der Herren T. FUJII [5], K.C. ROCKEY und M. ŠKALOUD [6] die Näherungstheorie nach K. BASLER-B. THÜRLIMAN zum Teil bestätigt scheint, aber auch offene Fragen noch sichtbar geworden sind, Sieht man dabei zunächst

wiederum vom Längssteifenproblem ab, so läßt sich feststellen, daß die amerikanische Bemessungsmethode hier (mit ihren beschriebenen theoretischen Voraussetzungen) nur dann wirklichkeitsnah sein kann (wie auch H. WAGNER schon 1929 [7] feststellte), falls der Einfluß von n i c h t biegesteifen Gurten vernachlässigt werden darf, d.h. wenn der Abstand der Vertikalsteifen in relativ engen Grenzen bleibt. ROCKEY und SKALOUD haben zwar auch für große $\alpha = a/b$ eine gewisse Übereinstimmung mit den Voraussagen der Traglasten nach BASLER-THÜRLIMAN versuchstechnisch festgestellt, doch muß man u.E. den zugrundeliegenden Tragmechanismus weiter aufhellen. Sicher ist jedenfalls, daß der "wirksamen Flanschsteifigkeit" $EJ_W$, insbesondere des Obergurtes, wesentliche Bedeutung zukommt; hierfür geben ROCKEY und SKALOUD in einem vergleichbaren Bestreben den Parameter $J/a^3 \cdot t$, der zur Beulentiefe in Beziehung gesetzt werden kann, an, wobei zu überlegen bleibt ob anstelle von J nicht genauer ein (noch zu definierendes) $J_W$ gesetzt werden müßte (vgl. auch noch Abschnitt 6).

## 3. Voraussetzungen und Definitionen bei den Karlsruher Versuchen (Teil I, 1970)

Bei den symmetrischen Einfeldbalken aus AlMg3 F23 (Steg) und AlMgSi0,5 F22 (Gurte und Quersteifen) mit mittiger Einzellast und den $\alpha$-Werten 2 bzw. 3 sind die Q u e r s t e i f e n (an den Auflagern und in Trägermitte) so biegefest ausgebildet, daß sie als Bauteil bis zur Versagenslast nicht kritisch werden. Die Gurte sind gegen seitliches Ausweichen abgesichert. Die Stegbleche sollen, auch im überkritischen Bereich, höchstens örtlich begrenzte Plastizierungen erleiden. Eigenspannungen werden nicht berücksichtigt; bei dem geschweißten Träger (Nr. 3) wurde bei 250° C spannungsfrei geglüht, die übrigen 4 Träger wurden HV-verschraubt, wobei Träger Nr. 5 eine spezielle Behandlungsweise (zwecks abminderung der Biegesteifigkeit der Gurte) erfuhr.

Die Last-Eintragung in Trägermitte erfolgte über seitlich gleitfest angeschlossene Steifen direkt in den Steg. Eine Vierendeel-Rahmenwirkung für die geschraubten Träger wird dadurch vermieden, daß nur die abstehenden Winkelschenkel (mit Beilagen verstärkt) durch Druckkontakt die Kraft aus dem Gurt aufnehmen; die anliegenden Winkelschenkel der Quersteifen sind dabei einmal abgeschrägt, außerdem ist das erste Loch dieses Schenkels größer gebohrt und die darin angeordnete HV-Schraube jeweils nur gering angezogen.

Die "klassische Beullast" $P_{Kr}$ (Schub-Biegung, einschl. Randbiegung) liefert einen Maßstab für die Prognosen im "überkritischen Bereich". So

wird mit $n = P_{Gr}^{el}/P_{Kr}$ die Erhöhung bis zur "elastischen Grenzlast" $P_{Gr}^{el}$, bei der die Stegverformungen gerade noch elastisch bleiben, beschrieben, während $n^* = P_{Tr}^{pl}/P_{Kr}$ den entsprechenden ert bis zur plastischen Traglast gleich Versagenslast charakterisiert.

4. Zielsetzungen und Durchführung der Versuche

Es sollen vor allem die Lastwerte $P_{Kr}$, $P_{Gr}^{el}$ und $P_{Tr}^{pl}$ auf versuchstechnischem Weg ermittelt werden, auch sind - zwecks Entwicklung eines brauchbaren Berechnungsverfahrens - laufend die Spannungen $\sigma_x$, $\sigma_y$ und $\tau_{xy}$ (über geeignete Dehnungsmessungen) und die senkrechten und waagrechten Verformungen markierter Punkt des Steges und der Gurte festzustellen (nachdem auch die geometrischen V o r v e r f o r m u n g e n an zwei Trägern bestimmt worden waren).- Bei den Gurten sollen insbesondere auch über die gesamte Trägerlänge $l = 2a$ die jeweiligen Eigenverformungen (z.B.ihre Biegelinien) meßtechnisch beobachtet werden.

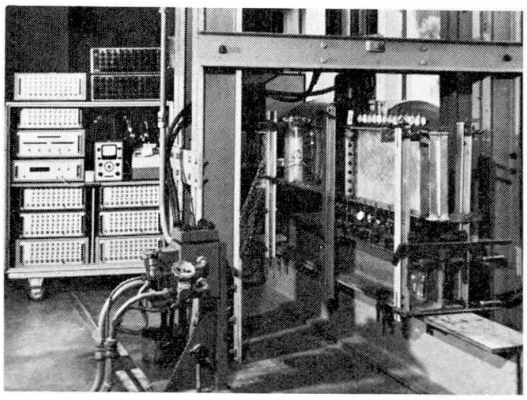


Bild 1: Versuchsträgeraufbau

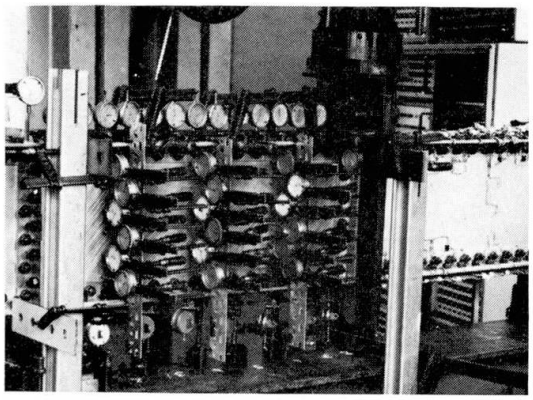


Bild 2: Meßeinrichtung für Stegverformungen

Die V e r s u c h s a n o r d n u n g als Ganzes ist aus den Fotos der Bilder 1 und 2 ersichtlich. Die Träger waren über beidseitige Rollenlager abgestützt und mittig belastet ("Gabellagerungen"). Verdrehungen und seitliche Verformungen der Gurte traten späterhin nicht auf. Infolge der (richtungstreuen) Lasteintragung über am Steg angeklemmte Steifen entfielen örtliche Pressungen am Obergurt. Zur Spannungsermittlung wurden auf e i n e r Trägerhälfte zahlreiche Dehnungsmeßstreifen angebracht, u.a. auf der Achse der Gurte und Rosetten beiderseits am Stegblech unterhalb der Gurte sowie neben den Aussteifungen. Die am Steg beidseitig gemessenen Dehnungen wurden jeweils gemittelt, um (erkannte) Biegebeanspruchungen zu eliminieren. Die z w e i t e Trägerhälfte blieb der Messung geometrischer Größen (Verschiebungen) vorbehalten; sie war mit Reißlack überzogen, um einen Überblick über die (mit der Be-

lastung veränderlichen!) Hauptdehnungsfelder zu gewinnen.- Meßuhrenketten gaben laufend die Distanz zwischen den Gurten wieder, auch wurden (über das ganze Feld a x b) die "Ausbeulungen" des Steges mit einer Genauigkeit von 1/100 [mm] gemessen.

In der vorliegenden V e r s u c h s r e i h e I wurden die Träger-Typen nach Tabelle 1, die zunächst ihre Abmessungen und Teil-Querschnitte enthält, geprüft.- Die Belastungssteigerung erfolgte in Stufen $\Delta P = 1$ Mp (bzw. in der Nähe von charakteristischen Lastwerten von $\Delta P = 0{,}5$ Mp). Bis zum Erreichen von $P_{Gr}^{el}$ waren jeweils Entlastungen (bis auf eine geringe Vorlast) notwendig, um das Vorhandensein von nur elastischen Stegverformungen zu überprüfen.

## 5. Versuchsergebnisse und -beobachtungen

Zur Feststellung der Werkstoffkennwerte der beiden gleichzeitig verwendeten Legierungen AlMg3 (F23) und AlMgSi0,5 (F22) wurden je 2 Zugproben untersucht. Wie aus Bild 3 erkennbar, verlaufen die σ-ε-Diagramme in dem als Biegeträger mit Navier'scher Spannungsverteilung beanspruchten Bereich mit befriedigender Übereinstimmung.

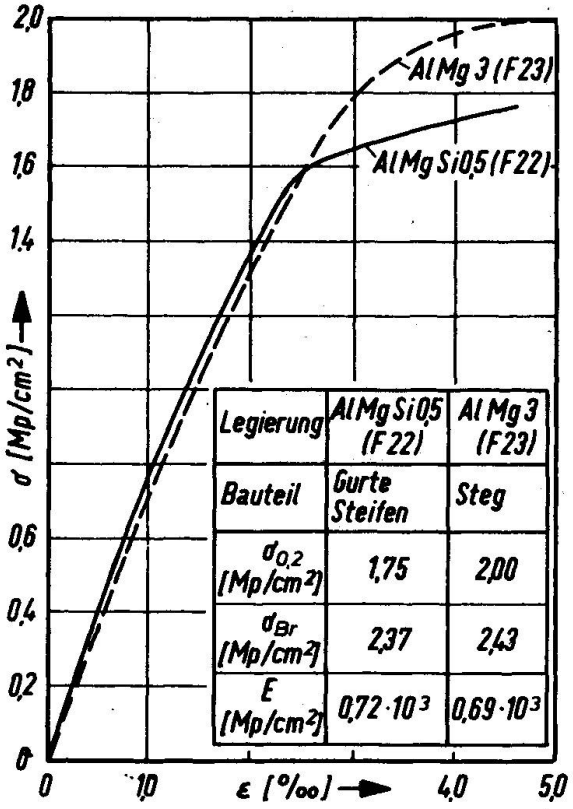



Bild 3: Werkstoffkennwerte

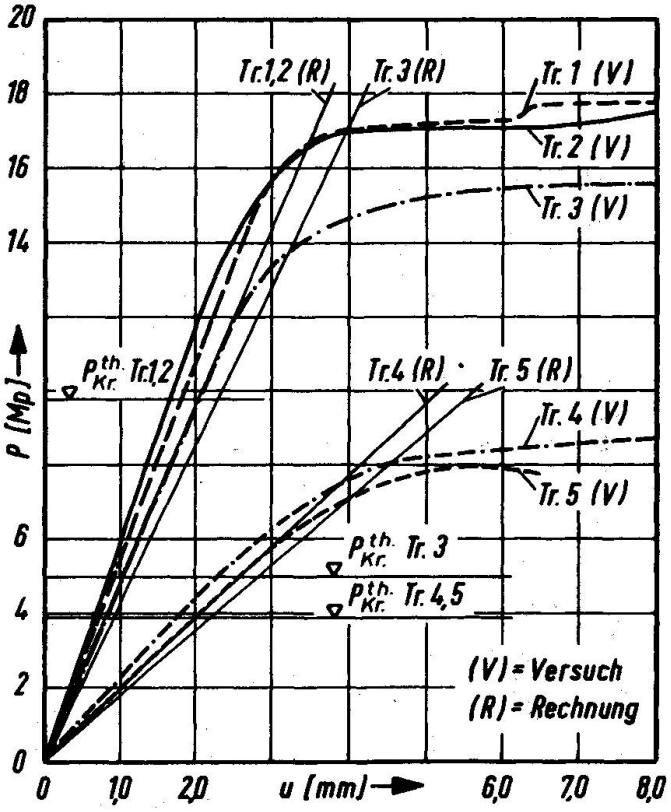
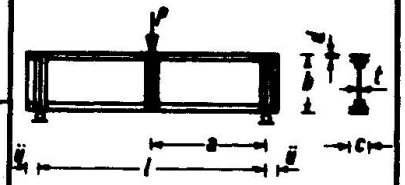
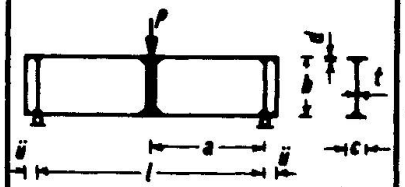
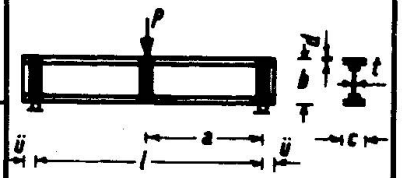



Bild 4: Last-Durchbiegungskurven der Träger (Tr) 1 bis 5

## Tabelle 1: Abmessungen und Ergebnisse der Versuchsreihe I

| Träger Nr. | Trägeraufbau | Abmessungen | | | | | Lasten | | | | Krit. Spannungen | | Laststeigerungen | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Erläuterungen: $l = 2a = 900\,mm$, $ü = 100\,mm$, $e = 23\,mm$ (Schraubenrißlinie), $b' = b - 2e$, $a' = a - 2e - 12$ | Gurtplatte $\Phi\, d \cdot c$ [mm] | Gurtwinkel/ Stegsteifen [mm] | Stegblech $\Phi\, b \cdot t$ [mm] | $\alpha = \frac{a}{b}$ bzw. $\alpha = \frac{a'}{b'}$ | $\beta = \frac{b}{t}$ bzw. $\beta = \frac{b'}{t}$ | $P_{Kr}^{theor.}$ je nach Randbed. [Mp] | $P_{Kr}^{DIN\,4114}$ [Mp] | $P_{Gr}^{el}$ [Mp] | $P_{Tr.}^{pl}$ [Mp] | $\tau_{Kr}(P_{Kr}^{theor.})$ [Mp/cm²] | $\sigma_{Kr}^{Rand}(P_{Kr}^{theor.})$ [Mp/cm²] | $n = \frac{P_{Gr}^{el}}{P_{Kr}^{theor.}}$ | $n^* = \frac{P_{Tr}^{pl}}{P_{Kr}^{theor.}}$ |
| | a | b | c | d | e | f | g | h | i | k | l | m | n | o |
| 1 |  Verbindungsmittel: NV M12 | Φ120·10 | ⊤40·40·3 | Φ450·3 | 1,98 | 135 | 9,8 | (6,0) | 14,0 | 17,6 | 0,34 | 0,53 | 1,43 | 1,80 |
| 2 | | | ⊥40·40·3 | | | | 9,8 | (6,0) | 15,0 | 18,0 | 0,34 | 0,53 | 1,52 | 1,84 |
| 3 |  Verbindungsmittel: M16 - Schweißung | Φ120·10 | Φ57·10 | Φ450·3 | 1,94 | 150 | 5,0 | (5,0) | 12,0 | 16,1 | 0,16 | 0,36 | 2,40 | 3,22 |
| 4 |  Verbindungsmittel: NV M12 | Φ100·6 | ⊤40·40·3 | Φ335·2 | 2,91 | 145 | 3,9 | (2,3) | 7,0 | 8,8 | 0,29 | 0,21 | 1,80 | 2,26 |
| 5 | | | ⊥40·40·3 | | | | 3,9 | (2,3) | 7,0 | 8,0 | 0,29 | 0,25 | 1,80 | 2,06 |

Bei den Verformungsmessungen in Tragwerksebene sind in Bild 4 die Lastverschiebungs-Diagramme für die Träger 1 bis 5 dargestellt. Hierbei ist festzustellen, daß die Verformungen sich noch in einem größeren Bereich über den jeweils kritischen Lasten nahezu linear verhalten und sich erst im Bereich von $P_{Gr}^{el}$ die Abminderung des Schubmoduls G auswirkt. Die theoretischen Lastverformungslinien sind nur bis $P_{kr}$ gültig und setzen sich aus der Summe der Biege- und Schubverformung zusammen; letztere hat infolge der geringen Stegfläche einen Anteil von 44 bis 57 °/o der Gesamtverformung, die hier – infolge der relativ kurzen Trägerstützweite – rechnerisch zu groß erscheint.

In Bild 5 für Träger 2 und in Bild 6 für Träger 5 sind die Verformungen u der Gurte für die drei maßgebenden Laststufen $P_{kr}^{theor.}$, $P_{Gr}^{el}$, $P_{Tr}^{pl}$ (bzw. eine Last nahe bei $P_{Tr}^{pl}$) dargestellt. Es wird hierbei jeweils die überlagerte Biegelinie aus dem Anteil der Durchbiegung des gesamten Trägers und derjenigen aus der Zugfeldbeanspruchung $u_o$ je Trägerhälfte wiedergegeben. Die maximalen Ordinaten bei a/2 wachsen erst nach Überschreiten der Last $P_{Gr}^{el}$ stark an, zeigen jedoch von Anfang an kein proportionales Verhalten zur Laststeigerung. Aus dieser Gurtverformung im Bereich eines Stegfeldes wird dem Gurtquerschnitt neben der vorhandenen Normalkraft ein zusätzliches Biegemoment $\Delta M = P_G \cdot u_o$ zugewiesen. Weiterhin ist die durch die Zugfeldwirkung hervorgerufene Gegenkrümmung im Untergurt klar erkennbar. Der Unterschied der maximalen Werte u bei einem Vergleich der beiden Bilder sind hierbei abhängig von dem Überschreitungsgrad vorh $P/P_{Kr}$, dem Wert $\alpha$ sowie von der noch zu definierenden Gurtsteifigkeit $EJ_W$.

Verformungen w senkrecht zur Tragwerksebene sollten für die Gurte ausgeschlossen sein. In Bild 7 a-d für Träger 3 ($\alpha \approx 2$) sind nun die Stegverformungen für die maßgebenden Laststufen aufgezeichnet. Die große Vorverformung $w_o$ = 6,7 mm ≈ 2,2 t war bei diesem Träger aus dem Schweißvorgang entstanden. Alle weiteren wiedergegebenen Darstellungen (Bild 7b,c,d) nehmen diesen Zustand als Nullstellung an, zeigen jedoch, daß diese weitgehend spannungsfreie Vorbeule sich bei steigender Belastung in die Stegblechebene teilweise zurückbildet, um dann relativ früh wieder in ein nahezu klassisches Zugdiagonalfeld überzugehen. Ein verhältnismäßig schnelleres Anwachsen der Beultiefen sowie eine größere Traglastverminderung konnte bei einem Vergleich mit Träger 1 und 2 (gleiche Stegfläche, 1,29faches Trägheitsmoment) aus dem Vorhandensein einer Vorbeule nicht abgeleitet werden. Bei der Darstellung der Stegverformungen für den Träger 5 ($\alpha \approx 3$) in Bild 8 a-d zeigt sich ausgehend von einer sehr geringen Vorbeule $w_o$ = 0,6 mm ≈ 0,3 t – nach der Ausbildung typischer Beulfiguren in der Nähe der Last $P_{kr}^{theor.}$ (mit

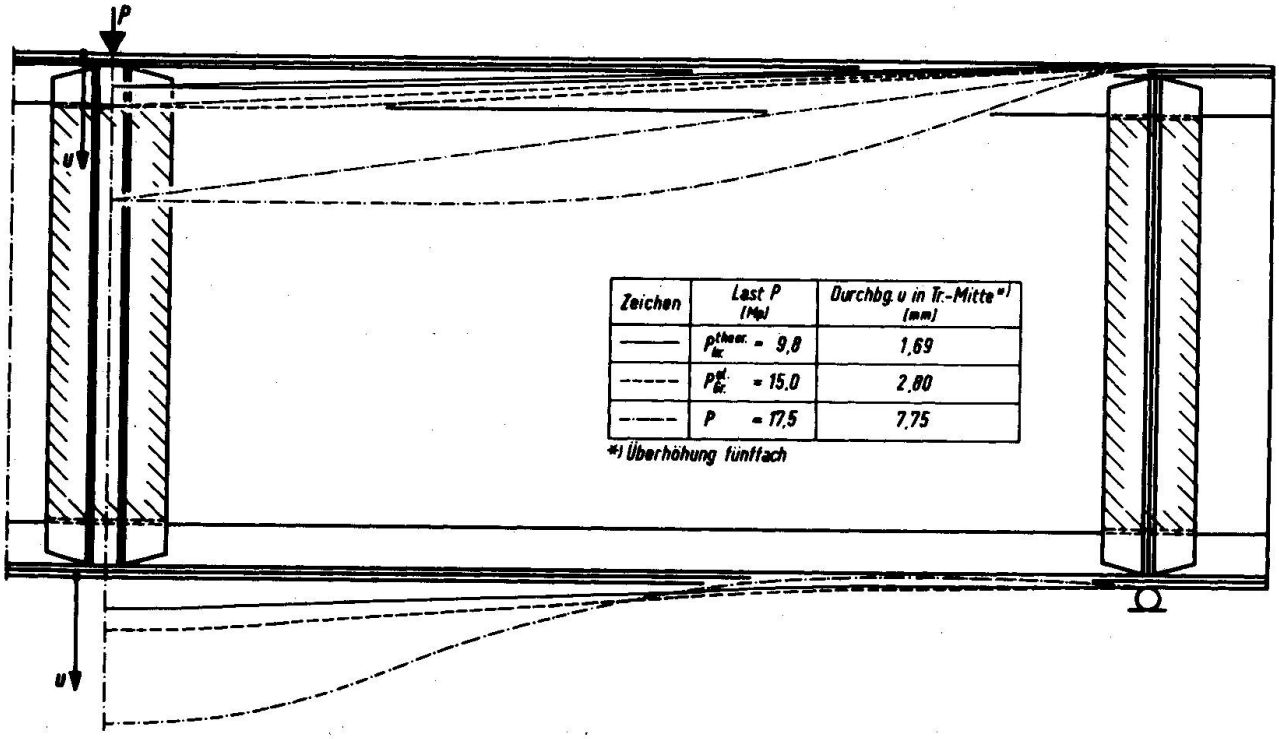



**Bild 5:** Gurtverformungen u von Träger 2 (aus Versuch)

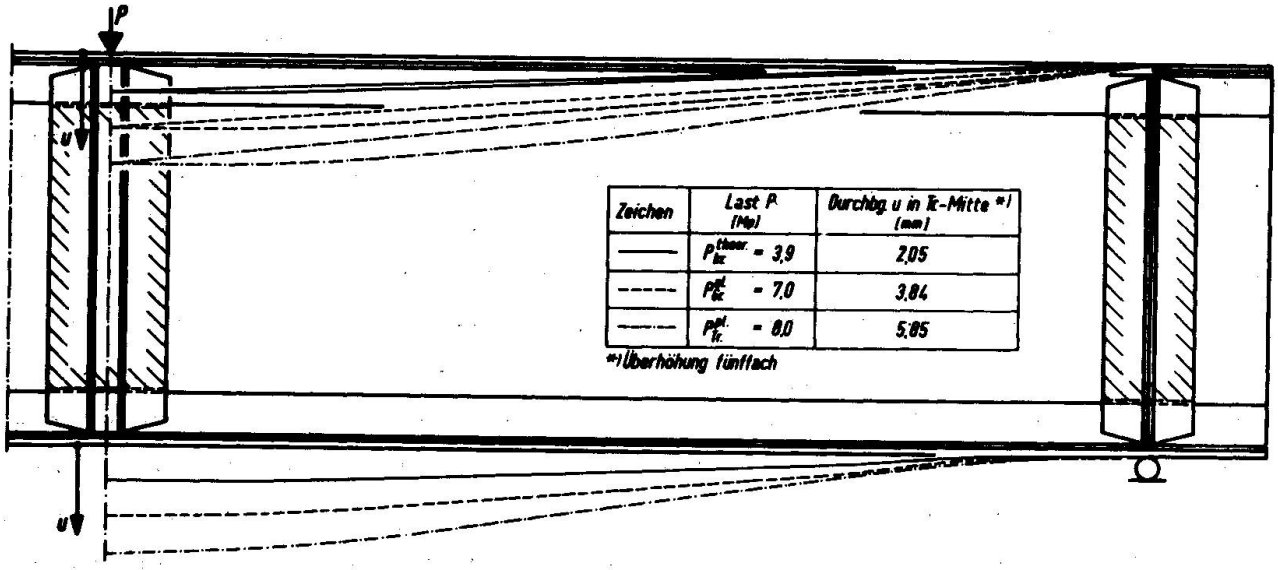



**Bild 6:** Gurtverformungen u von Träger 5 (aus Versuch)

einer Beulenbreite $b^* = 0{,}8$ bis $1{,}0\ b$) – wiederum das bekannte Zugdiagonalfeld, das ausgehend von der "klassischen" Zugfeldneigung $\phi = 40$ bis $45^\circ$ sich erst später bei Lasten $P > P_{Gr}^{el}$ in die Neigung der geometrischen Diagonale des Stegfeldes dreht. Die Stegverformungen konnten (infolge Überschreitens des Meßbereiches an mehreren

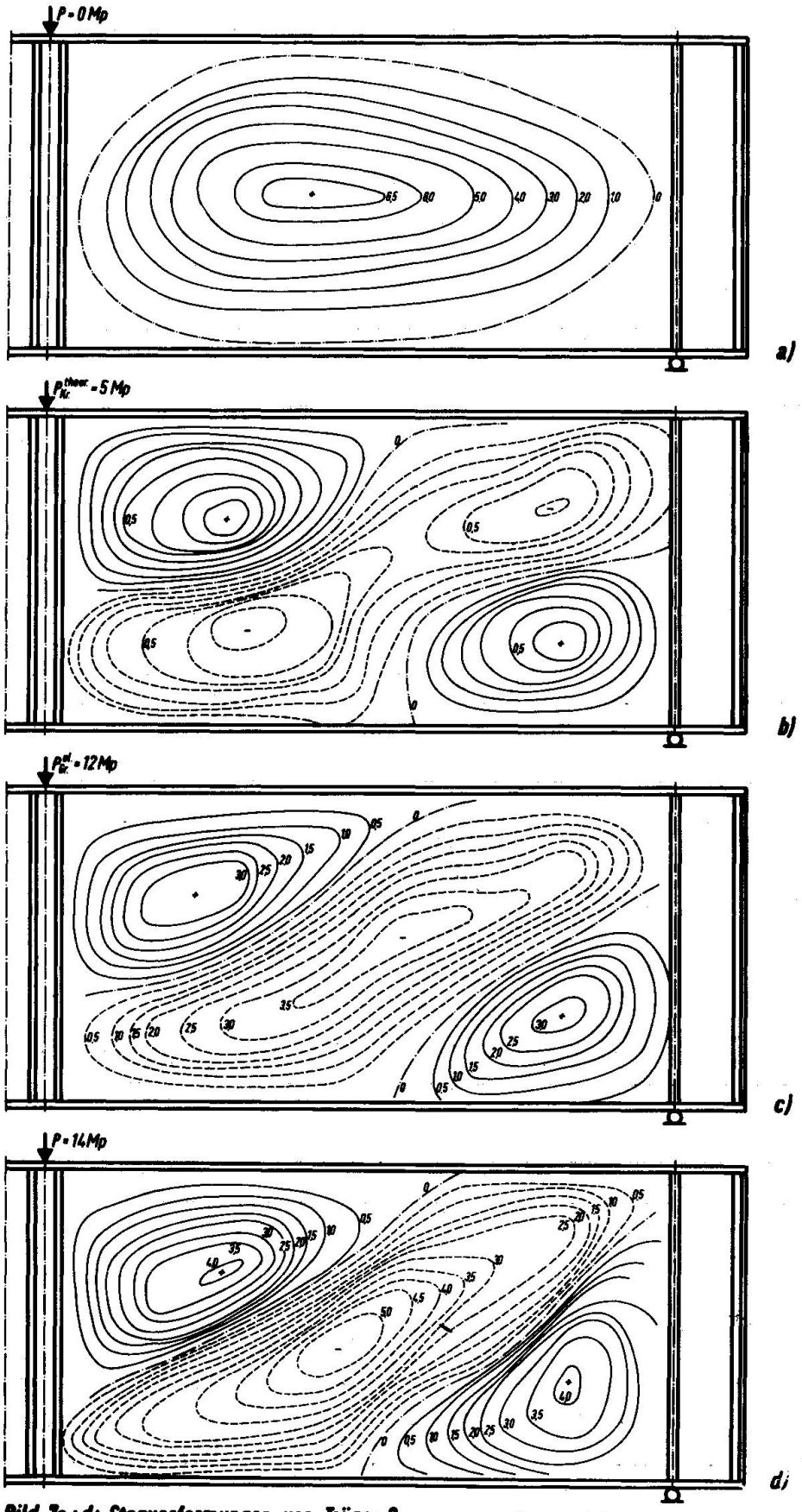



**Bild 7a÷d: Stegverformungen von Träger 3**

Höhenquoten in mm

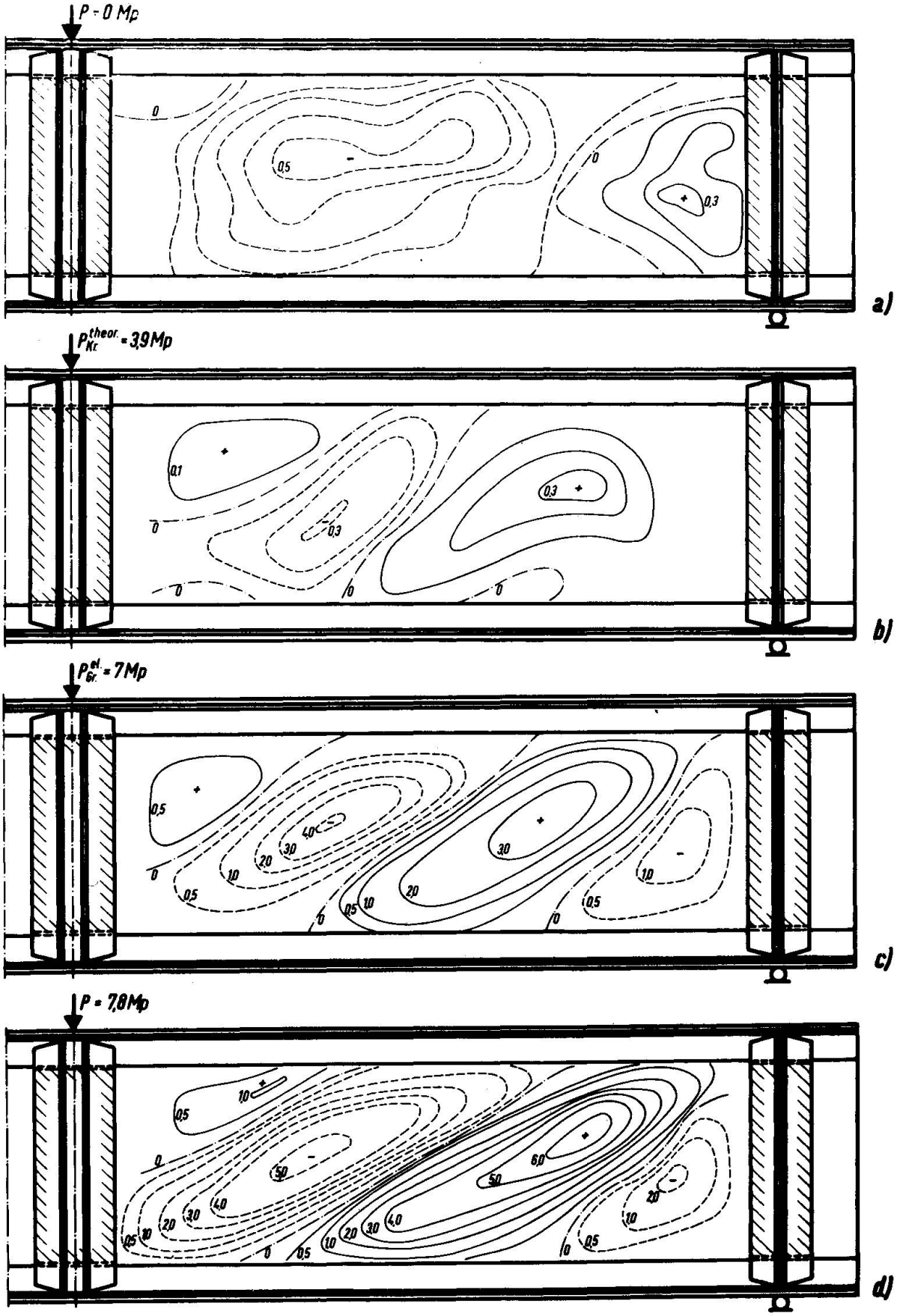



**Bild 8a÷d: Stegverformungen von Träger 5**

*Höhenquoten in mm*

Meßuhren) im Endzustand $P_{Tr}^{pl}$ nicht mehr als vollständiges Bild (deshalb $P < P_{Tr}^{pl}$ für Bild 7d und Bild 8d), sondern nur an einzelnen Stellen gemessen werden. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die maximalen Stegverformungen w, die von der jeweiligen Vorverformung aus ermittelt wurden. (Für Träger 1 und 2 liegen keine Meßwerte vor.)

Tabelle 2: Maximale Stegverformungen $w_{max}$ mm der Träger 3 bis 5

| | a | b | c | d | e |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Träger | | 3 | 4 | 5 |
| 2 | Stegblechdicke t mm | | 3 | 2 | 2 |
| | nach ROCKEY $J_G/(a^3 \cdot t) \cdot 10^{-6}$ | | 4,8 | 4,6 | 4,6 |
| 3 | Stegverformungen in Abhängigkeit von den Lasten | $P_o$ / $w_{omax}$ | 0 / 6,7 | nicht gemessen | 0 / 0,6 |
| 4 | | $P_{Kr}^{theor}$ / $w_{max}$ | 5,0 / 0,8 | 3,9 / 0,6 | 3,9 / 0,3 |
| 5 | | $P_{Gr}^{el}$ / $w_{max}$ | 12,0 / 3,3 | 7,0 / 3,0 | 7,0 / 4,0 |
| 6 | | $P_{Tr}^{pl}$ / $w_{max}$ | 16,1 / 8,3 | 8,8 / 4,6 | 8,0 / 6,2 |

In Bild 9 werden für Träger 5 die in der Mitte der Gurte gemessenen Randspannungen $\sigma_x$ (um 90° zur Spannungsrichtung gedreht) für die maßgebenden Lasten aufgetragen. Diesen Meßwerten sind die berechneten Spannungen nach der technischen Biegelehre gegenübergestellt. Hierbei ist deutlich eine Spannungsreduzierung für die Untergurte aber auch für die Obergurte eine Spannungszunahme festzustellen, die aus der horizontalen Komponente der Zugfelddiagonalen sowie aus der Änderung der Tragweise (Biegeträger-Schubfeldträger-Fachwerkträger) resultiert.- Zur Auftragung der $\sigma_x$-Spannungen am Querschnitt A B wurden zusätzlich Messungen in den Punkten A' und B' (56 mm von den Randfasern entfernt) vorgenommen. Die daraus sich ergebenden Spannungsverteilungen im Bereich der Gurte lassen für Laststufen $P > P_{Kr}^{theor.}$ keine Annahme (auch nicht im Bereich der Zugzone) nach Navier zu. Für die Spannungskomponenten in y-Richtung wurden meßtechnisch sehr kleine Werte festgestellt.

Bild 10 (für Träger 2) gibt eine Übersicht der $\tau_{xy}$-Spannungen bei den maßgebenden Lasten, die im Abstand von 60 mm von der Randfaser sowie in zwei Querschnitten gemessen wurden und den rechnerischen Spannungen nach der technischen Biegelehre gegenübergestellt sind. Im Sinne des "unvollständigen" Zugfeldes ist hierbei ein dreistufiger Systemwandel zu be-

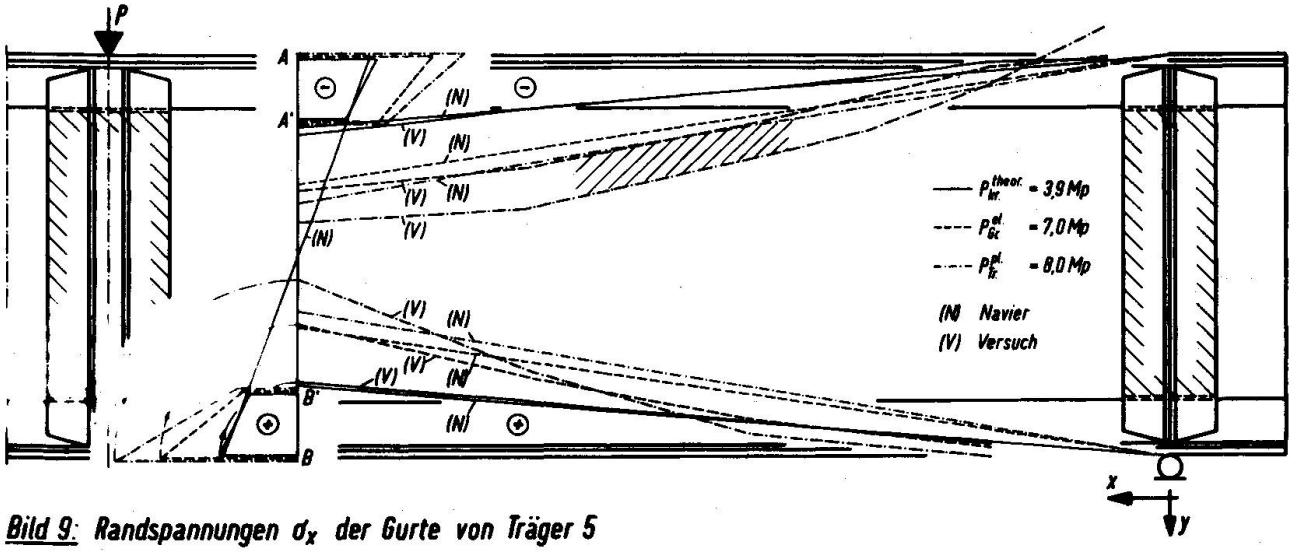



**Bild 9:** Randspannungen $\sigma_x$ der Gurte von Träger 5

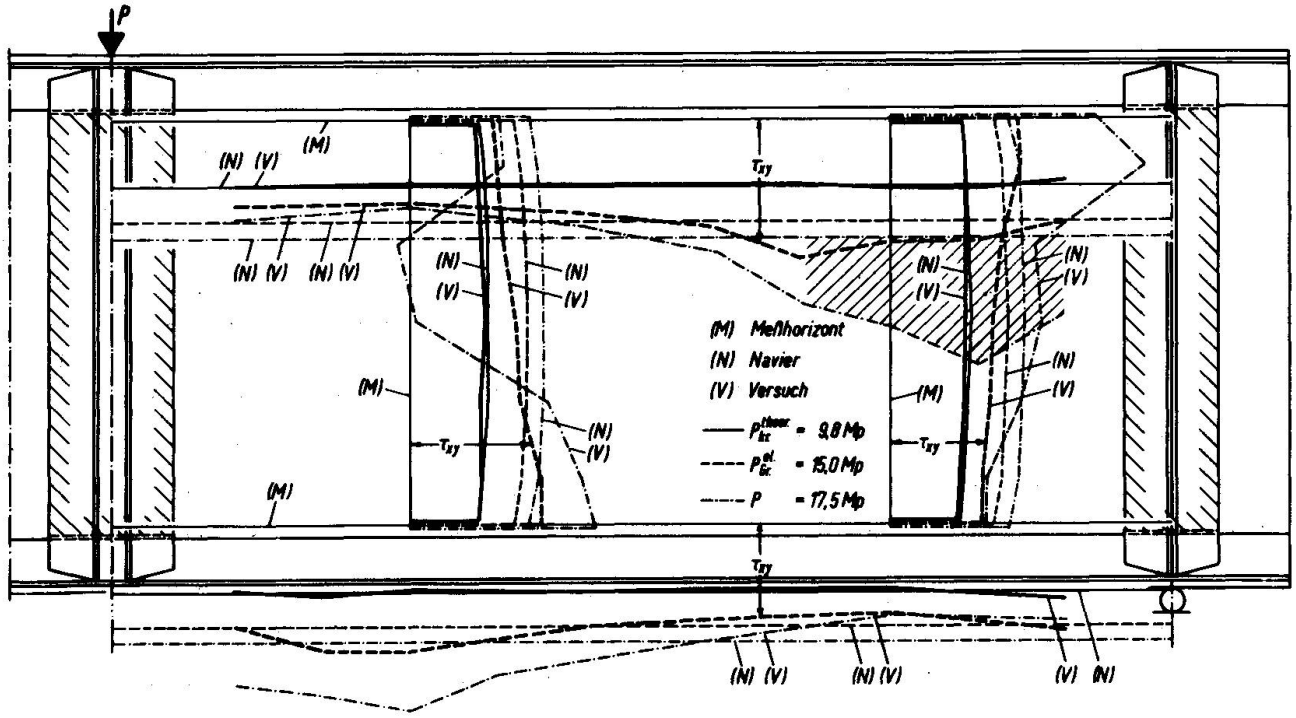



**Bild 10:** $\tau_{xy}$ -Spannungen von Träger 2

obachten. Ausgehend von der Berechnung nach der technischen Biegelehre ($P \leq P_{Krit}^{theor.}$) ist bei weiterer Laststeigerung in dem Stegbereich außerhalb des stärker wellenförmig verformten Zugfeldbandes eine proportionale Steigerung der Schubspannung zu beobachten. Man kann also bis etwa zur Laststufe $P_{Gr}^{el}$ in einem größeren Bereich des Stegbleches von einer Sandwichtragweise (auch Schubfeldträger genannt) sprechen, wobei die Reduzierung des Schubmoduls im Bereich des Zugfeldbandes zu berücksichtigen wäre. Erst oberhalb $P_{Gr}^{el}$ kommt es u.E. zur eigentlichen "Fachwerkträgerwirkung", d.h. das Zugband hat sich in die geometrische Diagonale gedreht. Diese Deutung befindet sich auch in Übereinstimmung mit der Drehung der Beulfiguren (z.B. Bild 7d) bei wachsenden Lasten in die geometrische Diagonale.

## 6. Theoretische Untersuchungen

In einer neueren Veröffentlichung gibt Ch. MASSONNET [8] eine kritische Beurteilung der bis jetzt bekanntgewordenen Traglastberechnungsmethoden. Darauf aufbauend läßt sich - unter Berücksichtigung mitgeteilter fremder und bisheriger eigener Versuche - u.E. das Tragverhalten von Vollwandträgern mit relativ sehr dünnen Stegen - in schrittweise zunehmender Genauigkeit - anhand der nachfolgend aufgeführten mechanischen Modelle baustatisch erfassen:

### 6.1 Vollwandträger ausschließlich mit Quersteifen

A. Über die (druckfesten) Quersteifen, die ausschließlich an ihren beiden Enden angeschlossen sind, verlaufen die (biegeelastischen) Gurte kontinuierlich durch.- Die feldweise Steigerung der Gurtkräfte infolge der Querkraft $Q = Q^{*} + Q^{**}$ erfolgt auf zweierlei Weise: $Q^{*}$ wird (über $\tau_{krit}$ hinaus, jedoch bei etwas absinkendem Schubmodul $G^{*}$) kontinuierlich gemäß Navier's Theorie, $Q^{**}$ gemäß einer Zugfeldtheorie örtlich in der Feldecke übertragen, welche ganz wesentlich erst zwischen $P^{el}_{Gr}$ und $P^{pl}_{Tr}$ zur Auswirkung gelangt. Für die vereinfachte Anwendung dieser letztgenannten Theorie darf die "Zugfelddiagonale" wie im Traglastfall unter einer Neigung $tg\ \phi = 1/\alpha = b/a$ angenommen werden; rechtwinklig zu dieser Diagonalen ergibt sich eine definierbare Zugspannungsverteilung $\sigma_{dz}$ im Steg (Bild 11). Man erhält zuletzt eine mathematische Beziehung zwischen $Q^{**}$ (bzw. den Parametern einer Verteilungsfunktion für $\sigma_{dz}$) und den Zwischenbiegelinien der Gurte über die Länge a, die von den jeweilig wirksamen Trägheitsmomenten $J_w$ der Gurte selbst abhängen. Anstelle der Zugfeldneigung kann auch der für die Ausbildung des Beulfeldes wichtige Parameter $\alpha$ eingeführt werden (I. Bericht über die Karlsruher Untersuchungen).

B. In konsequenter Weiterführung des Gedankenganges, wie er unter A beschrieben wurde, kann der Einfluß einer stetig-festen Verbindung der Quersteifen mit dem Stegblech in Abhängigkeit von der Biegesteifigkeit dieser Steifen (in der Trägermittelebene) verfolgt werden. Es werden nun zusätzlich durch eine antimetrische Belastung der Steifen in genannter Ebene einerseits sprunghaft Zusatzbeträge der Gurtkräfte abgegeben, andererseits wird die Spannungsverteilung innerhalb des Zugfeldes in geringem Maße unsymmetrisch.

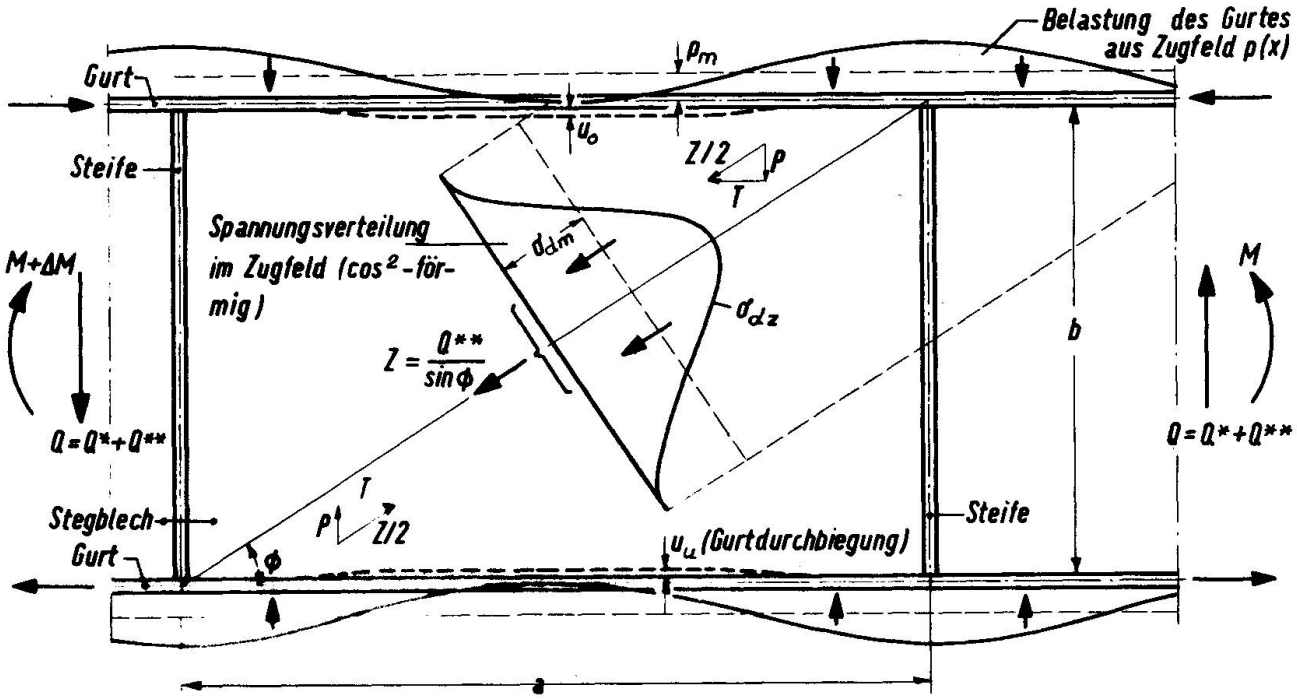



Bild 11: Gedankenmodell zur Spannungsverteilung im Zugfeld und resultierende Gurtbelastung

6.2 Vollwandträger mit Quersteifen und einer Längssteife (im Abstand $b_1$ vom Obergurt).

A. Bei zweckmäßiger Ausbildung einer Längssteife, die etwa bis $b_1 = b/3$ vom Obergurt entfernt ist, kann prinzipiell im Sinne der Ausführung unter 6.1 A verfahren werden. Infolge eines verhältnismäßig großen Trägheitsmomentes $J_w$ für den Obergurtbereich ergibt sich ein verbreitertes und abgeflachtes Zugfeld innerhalb der größeren Stegfläche $a \times b_2$. Es wird wahrscheinlich konstruktiv zweckmäßig sein, diesen einfachen Längssteifenstrang entweder aus hochfesterem Material herzustellen, oder ihn beispielsweise über HV-Verbindungen so anzuschließen, daß eine frühzeitige Plastizierung bzw. der Verlust der aussteifenden Wirkung senkrecht zur Trägerebene vermieden wird.

B. Eine weitergehende Untersuchung über Quersteifen mit erhöhter Steifigkeit (in Trägermittelebene) leitet über zu den nachfolgenden Betrachtungen (6.3). -

6.3 Vollwandträger mit Quer- und Längssteifen, die rahmenartig Stegblechfelder umfassen.

Das Problem eines einzelnen auf Biegung und Schub beanspruchten Stegfeldes, das durch einen biegesteifen, rechteckigen Rahmen begrenzt

wird, kann als Fortsetzung der Modellvorstellung gemäß 6.1 und 6.2 angesehen werden.- Falls die Gesamtansicht eines Vollwandträgers durch zahlreiche Einzelfelder $a_i \times b_i$ zusammengesetzt ist, bliebe zuletzt die Möglichkeit über ein größeres Rechenprogramm (z.B. mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente) charakteristische Anwendungsfälle fallweise zu lösen.

## 8. Literatur


[1] MASSONNET, Ch.: Dünnwandige hohe Blechträger JVBH-Vorbericht, VIII. Kongreß New York (1968) S. 178.

[2] MASSONNET, Ch.: Bemerkungen des Verfassers des Einführungsberichtes. JVBH-Schlußbericht, VIII. Kongreß New York (1968) S. 493.

[3] ROCKEY, K.C.: The Influence of Flange Stiffness upon the Post-buckled Behaviour of Web Plates subjected to Shear. Engineering Vo. 184, (1957) S. 788.

[4] BASLER K. und B. THÜRLIMAN: Strength of Plate Girders in Bending Proc. ASCE, Journal Structural Div. St. 6 S. 153 Août 1962.

[5] FUJII, T.: On an Improved Theory for Dr. BASLER's Theory. JVBH-Schlußbericht, VIII. Kongreß New York (1968) S. 479.

[6] ROCKEY, K.C. u. M. ŠKALOUD: Influence of Flange Stiffness upon the Load Carrying Capacity of Webs in Shear. JVBH-Schlußbericht, VIII. Kongreß New York (1968) S. 429.

[7] WAGNER, H.: Ebene Blechwandträger mit sehr dünnem Stegblech. Zeitschrift für Flugtechnik u. Motorluftschiffahrt, 20. Jahrgang, 8. Heft (1929), S. 200.

[8] MASSONNET Ch.: Grandes poutres à âme mince, tendances actuelles dans la conception et le calcul; Construction métallique, Nr. 2, Paris, 1969.


## ZUSAMMENFASSUNG


Die in unserem vorliegenden Bericht I in den Abschnitten 3, 4 und 5 beschriebenen Versuche an Aluminium-Vollwandträgern mit Quersteifen erlauben einige Rückschlüsse auf ihren Tragmechanismus. Abschnitt 6 gibt hierzu (in Bild 11) erste einfache mathematisierbare Ansätze, die in ihrer Auswertung anhand weiterer Diskussionsbeiträge unsererseits auf dem Colloquium erläutert werden sollen. - In diesem Abschnitt wird darüber hinaus für zukünftige Untersuchungen ein systematisches Fortschreiten beschrieben. Es ist zu erwarten, dass in Karlsruhe im Laufe des Jahres 1971 die unter 6.1 B und 6.2 A beschriebenen Ausführungsfälle versuchstechnisch erforscht werden können.


## SUMMARY


The tests described in this report in the chapters 3, 4 and 5 allow some conclusions about the load behaviour of aluminium-plate girders with transverse stiffeners. Chapter 6 gives first points of application to find a mathematic solution that will be discussed by us at the Colloquium. In this chapter a systematic advancement for further research is also given. It is expected that during 1971 the two cases described in 6.1.B and 6.2.A will be tested at Karlsruhe.

RESUME

Les auteurs décrivent des essais effectués sur des poutres à âme pleine en aluminium, raidies transversalement; ces essais permettent d'établir quelques conclusions relatives au comportement des poutres sous charge. On donne également un modèle simple des sollicitations, qui sera discuté lors du Séminaire. On décrit pour terminer un programme systématique de recherches futures; il est probable que l'on pourra réaliser en 1971 les essais décrits sous 6.1B et 6.2A.