

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 8 (1968)

Artikel: Theoretische Lösungen und Versuchsergebnisse

Autor: Winter, George

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-8697>

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: 13.01.2026

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

II

Dünnwandige Konstruktionen

IIa

Theoretische Lösungen und Versuchsergebnisse

GEORGE WINTER

Professor of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, N. Y.

1. Allgemeines

Der weitverbreitete Gebrauch kaltverformter Bauglieder aus Blechen oder Bandstahl ist eine bekannte Tatsache. Viele Millionen Tonnen Stahl wurden auf diese Weise in den letzten zwanzig Jahren in vielen Ländern verarbeitet. In den USA begannen die ersten Untersuchungen auf diesem Gebiet 1939 an der Cornell University, und die erste offizielle Bemessungsvorschrift [1] – die heute in ihrer vierten Fassung vorliegt – wurde 1946 von dem American Iron and Steel Institute herausgegeben; ähnliche Entwurfsvorschriften wurden seither in Kanada, Australien und Indien und anderswo angenommen. In England wurde 1961 eine Entwurfsvorschrift [2] aufgestellt, die in erster Linie auf englischen Forschungen [3] beruht; ähnliche Entwicklungen sind in Frankreich und anderswo im Gange. Übersetzungen des amerikanischen Entwurfshandbuches (American Design Manual) wurden in Deutschland, Spanien und Mexiko veröffentlicht und stehen wenigstens in verkürzter Form in Französisch und Italienisch zur Verfügung. Ein Auszug aus Theorie und Praxis wurde vom Verfasser auf dem IVBH-Kongreß 1952 vorgelegt, dem 1963 ein neuerer Bericht in Deutsch folgte. Praktische Anwendungen, ihr gegenwärtiger Stand und die möglichen Entwicklungen für die Zukunft werden in diesem Band von Dr. J. B. Scalzi in seinem Bericht über das Thema IIb erörtert.

Ausgedehnte praktische Erfahrungen haben gezeigt, daß dieser Konstruktionstyp eigentlich eher eine Ergänzung als eine Konkurrenz zur klassischen Art der Stahlkonstruktion mit warmgewalzten Blechen und Profilen darstellt. Die Situation ist irgendwie der im Betonbau ähnlich. Auch hier bildet der vor-

gespannte Beton in wachsendem Maße nicht eine Konkurrenz, sondern eine Ergänzung der älteren Stahlbetonbauweise. In der Tat sollten in einem weiteren Zusammenhang Stahlkonstruktionen auf der einen Seite und Betonkonstruktionen auf der anderen nicht mehr nur als konkurrierende und sich gegenseitig ausschließende, sondern auch als ergänzende Bauweisen betrachtet werden (siehe zum Beispiel in 7, unten). Viel würde gewonnen werden, wenn das konstruktive Ingenieurwesen sich als eine Einheit anstatt als zwei getrennte, konkurrierende Zweige entwickeln würde.

Der Zweck des vorliegenden Berichtes ist, in Kürze einige der wichtigsten Besonderheiten im Verhalten von dünnwandigen kaltverformten Baugliedern unter Verwendung neuerer Forschungsarbeiten aus Theorie und Versuch darzustellen. Es soll Bezug genommen werden auf eine Vielzahl von Veröffentlichungen von Forschungsergebnissen, und es sollen Gebiete herausgestellt werden, in denen Forschungsarbeiten dringend notwendig sind.

2. Materialeigenschaften und ihre Auswirkungen

Im Vergleich mit dem Stahl, der bei warmgewalzten Blechen und Profilen verwendet wird, ist der Stahl in kaltverformten Konstruktionsgliedern von einer größeren Mannigfaltigkeit und einer größeren Anzahl von Fabrikationsprozessen unterworfen, welche sein Verhalten in der Konstruktion stark beeinflussen. Konstruktionsbleche und Bandstahl sind entweder reckgealtert oder nicht. Sie sind entweder direkt bis auf ihre endgültige Stärke warmgewalzt oder sind nachträglich zu kleineren Dicken kalt ausgewalzt. Diese Variationen beeinflussen die Spannungs-Dehnungs-Kurven und das konstruktive Verhalten. Insbesondere weist warmgewalztes Blech generell eine ausgeprägte Fließgrenze auf, während kalt behandeltem Material eine niedrigere Proportionalitätsgrenze und eine allmähliche Krümmung des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes eigen ist. Diese Unterschiede sind wichtig in bezug auf das Beulverhalten. Nicht alterungsbeständige Stähle, die einer Kaltreckung durch Kaltwalzen oder Abkanten unterworfen waren, gewinnen ihre ausgeprägte Fließgrenze nach einiger Zeit wieder zurück. Dies gibt ihnen oft einen Vorteil gegenüber nichtalterndem Stahl.

Beim Abkanten von dünnen Blechen zu Konstruktionsgliedern kommt es zu unterschiedlicher Dehnungshärtung an verschiedenen Stellen des Querschnittes. Ausgedehnte Versuche [6, 7] haben eine Erhöhung der Fließgrenze von etwa 30 bis 100% an den Abkantstellen gezeigt, während für die ebenen Teile der kaltgewalzten Querschnitte diese Erhöhungen 15 bis 50% betrugen. Hingegen wurde in den ebenen Teilen von durch Pressen geformten Profilen keine wesentliche Veränderung der Fließgrenze gemessen.

Bisher basierte die Berechnung der Tragfähigkeit generell auf der garantierten minimalen Stahlfestigkeit vor der Verformung [1, 2]. Die vergrößerte Stahl-

festigkeit durch Kaltverformung kann nur nutzbar gemacht werden, wenn sie vorhergesagt und zuverlässig kontrolliert werden kann. In diesem Zusammenhang haben die letzten Untersuchungen [6, 7] folgendes gezeigt:

1. Es gibt keinen merklichen Bauschinger-Effekt. Das heißt die Spannungs-Dehnungs-Kurven für Zug und Druck für stark kaltverformtes Material, wie es zum Beispiel in Rundungen und Ecken auftritt, sind nicht wesentlich verschieden. Dies ist verständlich, da die Verformung hauptsächlich durch Biegung quer zur (Längs-)Achse der Bauteile erzeugt wird. Aus der Plastizitätstheorie (zum Beispiel Prinzip der Volumskonstanz) kann daher geschlossen werden, daß kein Bauschinger-Effekt auftritt.

2. Die Fließspannung an einer Ecke oder Rundung σ_{yc} hängt ab von der ursprünglichen Fließspannung σ_y vor der Verformung, dem Verhältnis der ursprünglichen maximalen Zugfestigkeit σ_u zur Fließspannung σ_y und dem Verhältnis des inneren Biegeradius r zur Dicke des Materials t , und zwar wie folgt [6]:

$$\sigma_{yc} = \frac{kb}{(r/t)^m} \quad (1)$$

wobei der Spannungskoeffizient $k = 2,80\sigma_u - 1,55\sigma_y$,
 der Verfestigungskoeffizient $n = 0,225\sigma_u/\sigma_y - 0,120$
 $b = 1,0 - 1,3n$ und $m = 0,855n + 0,035$ ist.

Die allgemeine Form der Gleichung (1) wurde aus der Plastizitätstheorie abgeleitet, und die numerischen Konstanten stammen aus vielen Versuchen.

3. Wenn die Materialeigenschaften der verschiedenen Teile eines Querschnittes (flache Teile, Ecken, Rundungen) getrennt voneinander bekannt sind, kann die Fließspannung und das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des gesamten Querschnittes mit ausreichender Genauigkeit als Mittelwert der mit Gewichten versehenen Anteile berechnet werden.

4. Der Einfluß verschiedener Materialeigenschaften in verschiedenen Teilen des Querschnittes von Druckgliedern auf die Beulfestigkeit im unelastischen Bereich kann nach [7] berechnet werden.

Zusätzliche Versuche werden benötigt, um zu bestimmen: a) die Einflüsse verschiedener Verformungsprozesse auf die Eigenschaften der flachen Teile; b) in welcher Form die verschiedenen Arten der Kaltbearbeitung bewußt angewendet und verändert werden können, um die Tragkraft der Bauglieder zu erhöhen [8]; c) die Auswirkungen von nicht gleichförmiger Kaltbearbeitung auf die Tragfähigkeit auf Drillknicken und lokales Beulen.

Die oben gemachten Ausführungen beziehen sich auf gewöhnlichen Kohlenstoff- oder niedrig legierten Stahl. Für architektonische oder spezielle Industriezwecke wird in zunehmendem Maße auch nichtrostender Stahl verwendet. Einige der Probleme, die mit dem sehr verschiedenen Spannungs-Dehnungs-Verhalten des nichtrostenden Stahls zusammenhängen, werden in [9] aufgezeigt.

3. Örtliche Instabilitäten und überkritisches Verhalten

Für Platten und Schalen ist allgemein bekannt, daß die kritischen Spannungen und Lasten, die durch die klassischen Eigenwertmethoden bestimmt werden, oft keine Beziehungen zu dem wirklichen Beulverhalten haben. Dies ist dann der Fall, wenn die Beulfiguren nicht aus der ursprünglichen Form des Konstruktionsgliedes entwickelt werden können. In diesem Falle entstehen bei beginnendem Beulen Membranspannungen, deren Einfluß häufig das ganze überkritische Beulverhalten bestimmt. Diese Membranspannungen können entstabilisierend sein wie bei axial gedrückten Zylindern oder radial gedrückten Kugelschalen. In diesem Fall ist ein Durchschlagen möglich, und sogar kleinste Anfangsimperfektionen führen zu einer drastischen Reduzierung der Beultragfähigkeit. In anderen Fällen wirken sich die Membranspannungen stabilisierend aus, so daß die wirkliche Tragfähigkeit sehr viel größer sein kann als die berechnete kritische Spannung. Dies ist der Fall für Platten, die einer Beanspruchung auf Druck, Biegung oder Schub in ihrer Ebene ausgesetzt und wenigstens entlang einzelner Ränder ausgesteift sind. Das überkritische Verhalten von Platten unter Schub und Biegung wird in diesem Band von Prof. Massonnet in seinem Bericht zum Thema IIc diskutiert. Die vorliegende Erörterung bezieht sich auf Platten unter Druck mit oder ohne Zwischensteifen, wie sie im Stahlleichtbau fast immer vorkommen.

Für längsgedrückte Platten kann das überkritische Verhalten sehr einfach durch die sogenannte mittragende Breite dargestellt werden. Dieser Grundgedanke wurde zuerst von v. Kármán zur Berechnung des überkritischen Beulverhaltens entwickelt und vom Verfasser abgewandelt und verallgemeinert, so daß er auch zur Berechnung der Längssteifigkeit im überkritischen Bereich angewendet werden kann [10, 11]. Auf der Basis einer großen Anzahl von Versuchen wurde der folgende Ausdruck für die mittragende Breite von Platten, die an beiden Längsrändern ausgesteift sind, entwickelt:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1,9}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}} \left[1 - \frac{0,475}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}} \right] = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right) \quad (2)$$

wobei b die Breite, t die Dicke und b_e die mittragende Breite der Platte sind. Es bedeuten weiter: σ_{max} = die maximale Spannung am Längsrand und σ_{cr} = die klassische kritische Spannung für frei drehbar gelagerte Ränder. Die Platte versagt, wenn $\sigma_{max} \rightarrow \sigma_y$, das heißt wenn die Spannung an den Rändern die Fließspannung erreicht. In diesem Stadium ist die gesamte Druckkraft in der Platte, die den Bruch hervorruft, $b_e t \sigma_y$.

Dieser Ausdruck fällt innerhalb des Streubereiches der Versuchsergebnisse, liegt aber nahe seiner unteren Grenze und ist schon seit 1946 erfolgreich im Gebrauch. Es wurde kürzlich gezeigt, daß derselbe Ausdruck auch gut für den Durchschnitt der Versuchsergebnisse für geglühten, rostfreien Stahl paßt [9].

Für Kohlenstoffstahl hat M. SKALoud kürzlich bestätigt, daß Gleichung (2) mit seinen eigenen, sehr sorgfältig ausgeführten Versuchen gut übereinstimmt [12] und auf der sicheren Seite liegt. Auf Grund langer praktischer Erfahrungen und der Auswertung von zusätzlichen Versuchsergebnissen, wie etwa jener von M. Skaloud, scheint es nun möglich, einen etwas weniger auf der sicheren Seite liegenden Ausdruck vorzuschlagen, indem man in der zweiten Form der Gleichung (2) den Koeffizienten 0,25 durch 0,22 oder in der ersten Form 0,475 durch 0,418 ersetzt.

Für Platten, die entlang beider Längsränder ausgesteift und zusätzlich mit Zwischenlängssteifen versehen sind, kann man aus Paragraph 2.3.2 der amerikanischen Vorschriften [1] die minimale Steifigkeit entnehmen, welche eine Steife haben muß, um auch im überkritischen Bereich der Platte voll wirksam zu sein. Diese Vorschrift wurde auch in unabhängigen Versuchen von SKALoud bestätigt [13]. Weitere Informationen sind für Platten mit Steifen notwendig, deren Steifigkeit kleiner als die oben definierte Minimalsteifigkeit – welche ihre volle Wirksamkeit gewährleistet – ist.

Die Gleichungen, die mit Erfolg beim Entwurf für Platten mit und ohne Zwischensteifen verwendet werden, sind halbempirischer Natur. Das heißt ihre allgemeine Form basiert auf theoretischen Überlegungen, während die numerischen Konstanten aus Versuchen bestimmt wurden. Es wäre wünschenswert, eine streng theoretische Berechnungsmethode für die Tragkraft im überkritischen Bereich zu besitzen. Es existieren nur befriedigende theoretische Untersuchungen für den Beginn des überkritischen Verhaltens, aber nicht für den praktisch viel wichtigeren Zustand des fortgeschrittenen überkritischen Bereichs [14]. Ebenso wäre es wünschenswert, Aufschlüsse über das Verhalten anisotroper Platten im überkritischen Bereich durch Theorie und Versuch zu erhalten. Eine solche Anisotropie kann als Folge einer gerichteten Kaltbehandlung entstehen, oder sie kann geometrischer Natur sein, wie dies zum Beispiel bei Platten mit dicht aufeinanderfolgenden schlanken Steifen möglich ist.

Bei dünnwandigen gedrückten Baugliedern tritt im mittleren Schlankheitsbereich (L/r ungefähr 25 bis 90) eine Wechselwirkung zwischen überkritischer Beulfestigkeit und Stützenknickung auf. BIJLAARD und FISHER [15] haben durch Theorie und Versuch gezeigt, daß a) die Tragfähigkeit der Stütze auch im überkritischen Bereich vorhanden ist, was bedeutet, daß die konventionelle Methode der Berechnung unabhängiger kritischer Eigenwerte der Spannungen für lokales Beulen und für Stützenknicken und die Zugrundelegung des kleineren der beiden Werte für den Entwurf die Tragfähigkeit stark unterschätzen kann. b) Im überkritischen Bereich der Platte ist eine starke Wechselwirkung zwischen örtlicher und Gesamtanstrengung der Stütze vorhanden. Dies ist in vereinfachter Form in die Entwurfsverfahren für Dauerstandfestigkeit eingearbeitet [1].

4. Biegedrillknicken

Für dünnwandige geschlossene Querschnitte, wie Rohre, ist die St. Venantsche Torsionssteifigkeit proportional der Dicke und, was wesentlich ist, der dritten Potenz der Hauptquerschnittabmessungen. Dagegen ist für offene Querschnitte gerade das Umgekehrte der Fall. Die Steifigkeit nach St. Venant ist hier proportional der 3. Potenz der Dicke und der 1. Potenz der anderen Hauptabmessungen. Deshalb spielt die Biegedrillknickung für offene dünnwandige Profile eine größere Rolle als für offene dickwandige oder für geschlossene Querschnittsformen.

Die allgemeine Theorie der elastischen Biegedrillinstabilität wurde bereits ausreichend behandelt, am ausführlichsten von V. Z. VLASOV [16]. Für die praktische Anwendung bestehen folgende Schwierigkeiten: a) Von einfachen Fällen abgesehen, sind die Lösungen der zugehörigen simultanen partiellen Differentialgleichungen zu komplex und zeitraubend für die routinemäßige Anwendung. b) Es ist schwierig für das Gebiet des unelastischen Knickens, die elastische Theorie passend abzuwandeln, weil den verschiedenen gleichzeitigen Beanspruchungen (Biegung, Torsion, Verwölbung usw.) verschiedene unelastische Moduli zugrundeliegen. Für einzelne symmetrische Querschnitte sind wenigstens die zwei Extremfälle, einfache Biegung einerseits und axialer Druck andererseits, relativ leicht in folgender Weise zu behandeln:

Einfache Biegung. Die Theorie des seitlichen Ausknickens von Balken ist schon lange bekannt. Kleine Unterschiede im Belastungstypus (zum Beispiel gleichmäßig verteilte Last gegenüber Einzellasten in den Drittelpunkten oder einem konstanten Moment) haben einen geringen Einfluß auf die Größe der kritischen Spannung, so daß für die Bemessung der einfachste Ausdruck, nämlich jener für ein konstantes Moment, verwendet werden kann. Weiterhin ist in der Formel für dünnwandige Querschnitte die St. Venantsche Torsionssteifigkeit oft im Vergleich zur Wölbsteifigkeit vernachlässigbar [17]. Auf dieser Grundlage lassen sich sehr einfache Bemessungsformeln ableiten [1, 17].

Axialer Druck. Während die Theorie für diesen Fall ziemlich einfach ist, treten folgende praktische Schwierigkeiten auf: a) Die Ausdrücke für die kritischen Lasten sind umfangreich und enthalten eine große Anzahl von Querschnittseigenschaften; b) ein gegebenes Profil, zum Beispiel ein [-Profil, kann – je nach dem Verhältnis der Querschnittsabmessungen und der Stablänge – durch Drillbiegeknicken oder durch einfaches Biegeknicken versagen, wie dies Fig. 1 schematisch zeigt. Verschiedene vereinfachte Bemessungsregeln wurden hierfür entwickelt. KLÖPPEL und SCHARAT [18] entwickeln Methoden zur Berechnung eines fiktiven Schlankheitsgrades, für den dann der Nachweis auf Biegeknicken zu führen ist. CHAJES und WINTER [19] haben eine Methode gewählt, welche das tatsächliche Verhalten des Stabes wiedergibt. Sie entwickelten für die meisten in der Praxis angewendeten, einfachsymmetrischen Profile Kurventafeln, deren Aufbau in Fig. 1 erläutert ist und die dem Statiker eine

rasche Entscheidung darüber, welcher Knickfall vorliegt, ermöglichen. Liegt Biegeknicken vor, so gelten die üblichen Gleichungen; liegt jedoch Biegedrillknicken vor, muß eine andere Kurvenschar benutzt werden, um die Knicklast zu ermitteln. – Versuche haben gezeigt [20], daß (I) die theoretische Knicklast, im elastischen Bereich genau mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt; (II) für einige Querschnittsformen eine bedeutende «überkritische» Tragreserve besteht, die jedoch im elastischen Bereich mit großen Torsionsverformungen verbunden ist; (III) im unelastischen Bereich die Berechnung mit dem Tangentenmodul genügend genaue Ergebnisse liefert, obwohl dies nicht streng bewiesen werden kann.

Allgemeine Belastung. Für den allgemeinen Fall des exzentrischen Druckes oder der Längs- und Querbelastrung bei verschiedenen Lagerbedingungen wird die Lösung der Differentialgleichungen [16] auch bei Vernachlässigung des Einflusses der stabilisierenden unterkritischen Verformungen sehr mühsam. Für einige Fälle wurden daher Computer-Lösungen entwickelt [22, 21]. Zurzeit sind Untersuchungen im Gange, ob nicht vernünftige Näherungsmethoden in der üblichen Form der sich wechselseitig beeinflussenden Gleichungen für zwei Arten von Bruchphänomenen fundiert werden können, das heißt

$$(\sigma_a/\sigma_{cr,a})^m + (\sigma_b/\sigma_{cr,b})^n = 1 \quad (3)$$

wobei die Indizes a und b sich auf die zwei einfachen Belastungsarten (transversale und axiale Belastung) beziehen. Einige Arbeit ist bereits auf dem Gebiet der nichtlinearen Instabilität von Bauteilen (Effekt der Abminderung der Stabilität infolge wachsender Verformung) unter kombinierter Biegung und Torsion geleistet worden [23].

Mehr Forschungsarbeit in Theorie und Versuch sowie zur Aufstellung einfacher Bemessungsregeln ist nötig, wobei besonders die Auswirkungen verschiedener Kombinationen von Randbedingungen (für Biegung, Torsion und Verwölbung), das unelastische Verhalten, Anfangsimperfektionen und Vorbeulen sowie schließlich der schwierige Fall von ganz willkürlichen asymmetrischen Querschnitten zu berücksichtigen wäre.

5. Verwindung der Querschnitte

Im Falle sehr breiter dünnwandiger Querschnitte ist es möglich, daß die Querschnittsform eines Bauteiles wesentliche Verwindungen erfährt. Diese können stabil oder instabil sein und entweder die äußere Form beeinflussen oder die Tragfähigkeit des Bauteiles herabsetzen.

Ein einfaches Beispiel ist der in Fig. 2 dargestellte Stabquerschnitt. Wird er bei Spannungen unterhalb des kritischen Bereiches als Balken beansprucht, so hat der Stab das Bestreben, sich in die dargestellte Trogform zu verformen.

Diese Verformung wird durch die radial nach abwärts gerichteten Komponenten der Längsbiegespannungen in den breiten Flanschen verursacht. Es wurden für diesen Fall Bemessungsregeln entwickelt [1, 17]. Dreht man den betrachteten Balken um, so können die beiden schmalen Druckflansche für sich bei gleichzeitigem Auftreten einer Querschnittsverformung labil werden. Eine Näherungstheorie für dieses Verhalten wurde aufgestellt und durch zahlreiche Versuche bestätigt [24] sowie eine vereinfachte Berechnungsmethode entwickelt [1].

Die Wechselbeziehung zwischen lokaler Beulung und Knickung des Gesamtstabes im überkritischen Bereich wurde im Abschnitt 3 erörtert. Unter Berücksichtigung der Querschnittsverformung infolge Biegedrillknickens wurde eine Computer-Lösung für einfach symmetrische Querschnitte entwickelt [22]. Ein Vergleich dieser Lösung unter gleichzeitiger Betrachtung des lokalen Beulens und des Biegedrillknickens mit der bisher üblichen getrennten Berechnung der beiden Instabilitäterscheinungen wurde noch nicht durchgeführt. Auf diesem Gebiet ist noch mehr Arbeit erforderlich.

Ein anderes Problem tritt auf, wenn Leichtbauprofile für vorgehängte Wände (curtain walls) verwendet werden. In diesem Falle kann ein Temperaturwechsel Verwindungen der Plattenelemente verursachen, die aus baulichen und ästhetischen Gründen nicht toleriert werden können. Es ist daher notwendig, weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet durchzuführen. Die einfache Eigenwerttheorie zur Berechnung des durch eine Temperaturänderung verursachten Plattenbeulens ist nicht ausreichend, da man nicht nur die Form, sondern auch die Größe der entsprechenden Plattenverformungen kennen muß, um zu prüfen, ob sie aus ästhetischen Gründen tragbar sind.

6. Schubbeanspruchte Scheiben aus Leichtbauelementen

Werden gewellte Bleche oder gerippte Dach-, Wand- oder Bodenplatten entlang ihrer Ränder oder Säume verbunden, so erhält man kontinuierliche Scheiben. Diese haben eine hohe Tragkraft und Steifigkeit, wenn sie in ihrer Ebene belastet werden. Sie werden schon seit langem für Dächer und Decken verwendet, um horizontale Belastungen aus Wind- oder Erdbebenkräften aufzunehmen und diese auf vertikale aussteifende Scheiben, wie zum Beispiel Schubwände, überzuleiten. In solchen Fällen werden die Scheiben so entworfen, daß sie Schubkräfte in ihrer Ebene übertragen können. Deshalb sind ihre wesentlichen Charakteristika ihre Tragkraft gegen Schub und ihre Schubsteifigkeit.

Infolge der großen Mannigfaltigkeit der Formen dünnwandiger Stahlblechtafeln und der Arten der Verbindung miteinander (Randverbindungen) und mit den Hauptrahmen des Bauwerkes wurde es nötig, jedes einzelne System zu testen, um seine Charakteristika zu bestimmen [25, 26]. Diese Untersuchungen haben im allgemeinen ergeben, daß die Tragkraft der Scheibe auf Schub nicht

nur von der Gestalt und der Dicke der Teilplatten abhängt, sondern auch von der Art und dem Abstand ihrer Verbindungen. Wind oder Erdbeben verursachen gewöhnlich eine kleine Zahl von wiederholten oder Wechselbelastungen von hoher Intensität. Versuche zeigen, daß geschweißte Scheiben gegenüber solchen zyklischen Belastungen ziemlich unempfindlich sind. Hingegen können durch Schrauben verbundene Scheiben durch Wechselbeanspruchungen großer Intensität, die aber noch unterhalb der Grenzelastung liegen, geschwächt werden.

Die Schubsteifigkeit wird nicht nur durch die Schubverformung der Tafeln selbst bestimmt, sondern auch durch örtliche Verformungen entlang der Randverbindungen und in der Nähe der Endverbindungen. Dies macht die Schubsteifigkeit zu einer Funktion der Plattenlänge.

7. Mischkonstruktionen

In Ermangelung eines gebräuchlichen Fachausdruckes wird hier der Ausdruck «Mischkonstruktion» für jedes System, das die typische statische Wirkungsweise von dünnwandigen, kaltverformten Baugliedern im Verbund mit anderen Konstruktionselementen aufweist, verwendet. Es kann sich dabei entweder um warmgewalzte Stahlprofile oder einfachen Beton beziehungsweise Stahlbeton oder eine Kombination beider handeln. Die Bedeutung dieses Konstruktionszweiges wurde bereits in I erwähnt. Tatsächlich werden Stahlleichtbauteile gegenwärtig hauptsächlich in Mischkonstruktionen der einen oder anderen Art verwendet. Nur zwei Typen sollen in diesem Zusammenhang mit entsprechenden Forschungsarbeiten erwähnt werden, nämlich die verschiedenen Mischkonstruktionen mit schubbeanspruchten Scheiben und die Stahl-Beton-Verbundkonstruktionen.

Schubbeanspruchte Scheiben. Solche Scheiben, die für Dach- oder Deckenkonstruktionen zur Aufnahme horizontaler Kräfte herangezogen werden, übertragen nur Schubkräfte. Dies hat seine Ursache darin, daß gerippte Bleche durch Ausbildung von Zugfeldern ziemlich große Schubspannungen im unterkritischen beziehungsweise überkritischen Bereich aufnehmen können. Sie sind jedoch in nur sehr geringem Maße in der Lage, Normalspannungen senkrecht zu den Rippen oder Wellen aufzunehmen. Daher müssen die Biegemomente in solchen Scheiben auf einem anderen Wege aufgenommen werden. Wenn der die Scheibe umschließende Rahmen eine reguläre Stahlkonstruktion ist, was gewöhnlich der Fall ist, wird die Scheibe an den Rahmen angeschweißt. In einem solchen Fall nehmen die Stahlträger rings um die Scheibe die Biegemomente auf. Mit anderen Worten wirkt die Mischkonstruktion, bestehend aus schubbeanspruchten Scheiben aus Stahlleichtbauteilen, die von warmgewalzten Trägern eingerahmt sind, wie ein horizontaler Blechträger, in welchem die Scheibe den Steg und die Randbalken die Flansche darstellen [25].

Eine weitere sich schnell entwickelnde Mischkonstruktion für Dächer sind die Stahlfaltwerkschalen. Hier sind die gekrümmten Schalen als Membran dazu bestimmt, den Schub aufzunehmen, während die Normalspannungen durch die hierfür besonders geeigneten Randglieder aufgenommen werden. Soweit bisher festgestellt werden kann, zählen auch aus ebenen Flächen zusammengesetzte Faltwerke (Trapezbleche) und hyperbolische Paraboloiden in diese Kategorie. Beide wurden getestet [27, 28], und vor allem das Faltwerk wurde als für die praktische Anwendung besonders geeignet befunden. Mehr als hundert solcher Dächer wurden schon errichtet. Nähere Einzelheiten der praktischen Entwicklung solcher Stahl-Dachschalen (Faltwerke) werden in Dr. Scalzis Bericht zum Thema IIb gegeben. Zusätzliche Forschungen auf diesem Gebiete sind bereits angelaufen.

Folgende Probleme sollen einer Klärung zugeführt werden: Beulen und überkritisches Verhalten gewellter oder gerippter (das heißt orthotroper) Platten oder Schalen (Membrane) unter Schubspannung; die Stabilität der Randglieder solcher Faltwerke, welche in Längsrichtung durch Schubkräfte aus den Schalen belastet werden; eine Theorie zur Berechnung der Durchbiegungen solcher Schalen unter Gleichlast; örtliche Durchbiegungen solcher Schalen unter konzentrierter oder teilweiser Belastung usw.

Eine andere Art von Mischkonstruktionen findet sich in der klassischen Stahlskelettbauweise, deren Tragkonstruktion aus ein- oder mehrstöckigen Rahmen besteht, wenn hier die Scheiben als Dächer, Wände oder Decken angeordnet werden. In solchen richtig entworfenen Konstruktionen bilden die Wand-, Decken- und Dachscheiben eine Haltung der Rahmenstiele und Riegel gegen das Knicken in der Scheibenebene. Diese seitliche Knickhaltung ist sowohl für das Biegeknicken als auch das Biegedrillknicken der Stützen sowie der Riegel und der Decken- oder Dachbalken wirksam. Die Theorie solcher Instabilitätsfälle bei elastischer Stützung, die durch ein schubfestes Medium bewirkt wird, ist bekannt und durch Versuche weitgehend erhärtet [29]. Wenn die Rahmentteile so angeordnet sind, daß ihre schwachen Achsen senkrecht zu den Scheiben liegen, können diese Scheiben als Knickhaltung die Tragfähigkeit der Rahmentteile um Hunderte von Prozentsen erhöhen.

Eine andere wirtschaftlich vielversprechende Art von Mischkonstruktionen wurde eingehend von E. R. BRYAN und Mitarbeitern an der Universität Manchester erforscht [30]. Es handelt sich um das Zusammenwirken von Portalrahmen und Dachscheiben bei einstöckigen Industriehallen üblicher Bauart mit schrägem Dach. Wenn die Dacheindeckung entsprechend in sich und mit den Rahmen verbunden ist, so stellt die so erhaltene Konstruktion eine Mischkonstruktion von einfachen Stabstahlrahmen und gefalteten Blechen des Stahlleichtbaues (Faltwerke) dar. Unter Eigengewicht wirkt zum Beispiel die Dachscheibe der Tendenz der Rahmenecke, wegzukippen, entgegen, was eine Reduktion der Rahmenmomente zur Folge hat. Diese Reduktion kann sich auf 60 bis 80% belaufen, wie dies theoretische Untersuchungen und Versuchsreihen von

Bryan und eine davon unabhängige theoretische Entwicklung, verbunden mit Modellversuchen, von LUTTRELL [26] zeigen.

Die Verbundbauweise verwendet Stahlleichtbauplatten im Verbund mit Beton und manchmal auch mit warmgewalzten Stahlprofilen. Flache Stahlleichtbauplatten (Dachplatten usw.) verwendete man lange als Schalung für Stahlbetonplatten, und zwar sowohl als verlorene Schalung als auch als Bewehrung zur Aufnahme positiver Momente. Wegen der Vielfalt der verwendeten Plattenformen geben die Plattenhersteller meistens Versuchsinformationen an, jedoch werden allgemeinere Informationen dringend benötigt. Das Hauptproblem ist die Schubkraftübertragung zwischen dem Beton und den relativ biegsamen Platten. Wenn keine speziellen Plattenformen vorgesehen sind, muß die Schubübertragung hauptsächlich durch den chemischen Verbund hergestellt werden. Es steht hinreichend gut fest, daß der chemische Verbund zwischen Beton und verzinktem Stahlblech besser ist als zwischen Beton und unbehandeltem Walzstahl. Jedoch müssen weitere Untersuchungen angestellt werden, um die Koppelungskräfte für diese bewehrten Betonkonstruktionen sicher berechnen zu können. Kürzlich wurde dieser Konstruktionstyp weiterentwickelt, wobei verschiedene Plattentypen mit den unterstützenden Stahlträgern im Verbund wirken. In diesem Fall wird die Schubübertragung zwischen Träger und gewellten oder Zellenplatten durch die gebräuchlichen Scherverbindungsmitel, wie zum Beispiel aufgeschweißte Stahldübel, bewirkt. Versuche [31] haben die Brauchbarkeit und Wirksamkeit dieser Art Verbundkonstruktion erwiesen; sie zeigen besonders, daß der Grad der Verbundwirkung zwischen Platte und Träger vom Profil der Rippen der Betonplatten abhängt, das durch die Form der verwendeten Stahlleichtbauplatten vorgeschrieben ist.

8. Anschlüsse und Verbindungen

Die Integrität vieler Stahlleichtbauten, besonders von Mischkonstruktionen, hängt weitgehend von der Festigkeit und Zuverlässigkeit der Montageverbindungen ab. Während man mit solchen Verbindungen reichliche praktische Erfahrung gesammelt hat, scheinen systematische Versuchsergebnisse nur für geschraubte Verbindungen vorzuliegen [32]. Mehr Versuchsergebnisse sowie die Vereinheitlichung ihrer Durchführung und Kontrolle werden für Schraubenverbindungen, besonders aber für geschweißte Montageverbindungen benötigt.

Das Schweißen von dünnwandigen Stahlblechen untereinander ebenso wie das Schweißen dünnwandiger Profile an dickwandige, warmgewalzte Stahlprofile bringt Probleme, die sich von jenen des Schweißens üblicher Stahlkonstruktionen stark unterscheiden. Besondere Maßnahmen sind notwendig, um verzinkte Bleche zu schweißen. Während die Punktschweißung von Stahlleichtbauteilen in der Werkstatt hoch entwickelt ist, ist es notwendig, das schwierigere Problem

der Baustellenschweißung zu untersuchen und zu entwickeln. Vielversprechende Klebemittel stehen nun zur Verfügung und sind in den Versuchsanstalten für Stahlleichtbauteile verwendet worden. Ihr Verhalten und ihre Zuverlässigkeit sollten im Hinblick auf ihre eventuelle praktische Verwendbarkeit untersucht werden.