

Der Momentenausgleich durchlaufender Traggebilde im Stahlbau

Eine neue Statik als Grundlage für wirtschaftliches
Konstruieren

Formeln und Tafeln für den Stahlbau-Statiker
zur Berücksichtigung der Plastizität des Stahls
bei durchlaufenden Trägern und Rahmen

Bearbeitet von

Städtischem Baurat Dr. Ing. Felix Kann

Privatdozent der Technischen Hochschule Braunschweig und Dozent
der Ingenieur-Akademie Wismar i. M.

Mit 58 Abbildungen



Walter de Gruyter & Co.

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung
J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg
Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp.

Berlin W 10 und Leipzig

1932

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

Archiv-Nr. 13 01 32.

Druck von Walter de Gruyter & Co., Berlin W 10

Vorwort.

Angeregt durch einen Vortragszyklus des Deutschen Stahlbau-Verbandes im Oktober 1930, entschloß ich mich, die aktuelle Frage des Spannungsausgleichs in durchlaufenden Trägern und biegungssteifen Rahmen aus Stahl, nachdem diese Frage in der Sonderliteratur des Stahlbaues in den letzten Jahren mehr und mehr in den Vordergrund getreten war, in einer Monographie zu behandeln, die die Aufgabe erfüllen soll, allgemeine Grundlagen für die Berechnung solcher Durchlaufkonstruktionen unter Berücksichtigung der „Selbsthilfe“ (oder des Spannungsausgleiches) des Materials zu finden. Da eine derartige Berechnung von größter wirtschaftlicher Bedeutung für den Stahlbau ist, wird eine systematische Behandlung der „Statik des Momentenausgleiches“ — das beweisen die zahlreichen Sonderabhandlungen über dieses Gebiet und die Zuschriften an die Schriftleitungen der einschlägigen Zeitschriften — von der Fachwelt geradezu gefordert.

In der vorliegenden Schrift wird daher einerseits die statisch bestimmte Aufgabe des Momentenausgleiches zwischen Stützen- und Feldmoment eines Durchlaufträgers bzw. zwischen Eck- und Feldmoment eines biegungssteifen Rahmens allgemein, also für die verschiedensten Belastungsfälle behandelt, andererseits wurden die Begriffe des „natürlichen Momentenausgleiches“ und der „Ausgleichskurven“ neu geschaffen. Durch letztere wird der Konstrukteur in die Lage versetzt, in jedem Einzelfall sofort zu beurteilen, wie weit er von dem Idealfall des „natürlichen Momentenausgleiches“ entfernt ist — eine Frage von größter wirtschaftlicher Bedeutung für den Stahlbau.

Es ist dem Verfasser eine angenehme Pflicht, Herrn Dipl.-Ing. Klöppel, Berlin, und dem Deutschen Stahlbau-Verband für die tatkräftige Unterstützung durch Nachweisung und Überlassung von Literatur und Quellenangaben den wärmsten Dank auszusprechen.

Bei der Anfertigung und Beschriftung der Zeichnungen für die Textabbildungen und beim Lesen der Korrekturen haben mich die Herren Ing. Walter Ehling und Ing. Paul Hennings in dankenswerter Weise unterstützt. Die beiden Abbildungen 26 und 29 sind von dem Erstgenannten entworfen worden.

Möge das Buch eine freundliche Aufnahme finden und seinen Zweck erfüllen, durch Anleitung zum wirtschaftlichen Konstruieren der Durchlauf- und Rahmensysteme im Stahlbau der deutschen Volkswirtschaft zu dienen.

Wismar, im Januar 1932.

Der Verfasser.

Inhaltsübersicht.

	Seite
Einleitung	
Das Wesen der neuen Methode: Die Selbsthilfe oder „Schlauheit“ des Materials.	
Natürlicher Momentenausgleich bei durchlaufenden Trägern.	
Der Momentenausgleich als wirtschaftliches Konstruktionsprinzip im Stahlbau	7
I. Kapitel	
Grundbegriffe und Grundformeln – Fließ- oder Plastizitätsbereich – Plastizitätsfaktor – Ausgleichskurven (Beziehungen zwischen Fließ- bereich und Plastizitätsfaktor)	11
II. Kapitel	
Ermittlung der Momente durchlaufender Träger und einfacher Rahmen für verschiedene Belastungsfälle unter der Voraussetzung des Momenten- ausgleichs zwischen den Stützen- und Feldmomenten – 10 Fälle	18
III. Kapitel	
Berechnung der Ausgleichskurven für die einzelnen Tragsysteme und Belastungsfälle von Durchlaufbalken – 20 Fälle	29
IV. Kapitel	
Berechnung der Ausgleichskurven für einige einfache Rahmenfälle – 16 Fälle	57
Schluß	
Vergleichsrechnungen und Zusammenfassung	74

Literatur.

1. Grüning, Die Tragfähigkeit statisch unbestimmter Tragwerke aus Stahl bei beliebig häufig wiederholter Belastung. Berlin 1926.
 2. Maier-Leibnitz, Beitrag zur Frage der tatsächlichen Tragfähigkeit einfacher und durchlaufender Balkenträger aus Baustahl St. 37 und aus Holz: Die Bautechnik, 1928, Heft 1 und 2.
Derselbe, Versuche mit eingespannten und einfachen Balken von I-Form aus St. 37: Die Bautechnik 1929, Heft 20.
Derselbe, Gesichtspunkte für die Gestaltung und Einzelausbildung der Tragrippe von Stahlbauten (Ausgewählte Vorträge aus dem Gebiet des Stahlbaues, herausgegeben vom Deutschen Stahlbau-Verband, Berlin).
 3. Max Mayer, Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen. Berlin 1926.
 4. Zuschriften an die Schriftleitung der „Bautechnik“, Heft 20, 1928.
 5. Dipl.-Ing. J. H. Schaim, Berlin, Der durchlaufende Träger unter Berücksichtigung der Plastizität: Der Stahlbau 1930, Heft 2.
Dr. Fritz Emperger, Zur Statik des eingespannten und des Durchlaufbalkens: Beton und Eisen 1930, Heft 12.
G. von Kazinczy, Budapest, Statisch unbestimmte Tragwerke unter Berücksichtigung der Plastizität: Der Stahlbau 1931, Heft 5.
Dr. techn. J. Fritsche, Prag, Die Tragfähigkeit von Balken aus Stahl mit Berücksichtigung des plastischen Verformungsvermögens: Der Bauingenieur 1930, Heft 49, 50, 51.
 6. Dr. Bohny, Zuschrift an die Schriftleitung der „Bautechnik“, Heft 20, 1928.
 7. Dr.-Ing. e. h. K. Bernhard, Zuschrift an die Schriftleitung der „Bautechnik“ Heft 20, 1928.
 8. Vgl. Grüning, a. a. O. S. 274.
 9. Vgl. Fritsche, a. a. O. S. 874.
 10. In ähnlicher Weise wird bekanntlich die Wirkung der Schrägen (Vouten) seit jeher berücksichtigt. Vgl. u. a. auch den Aufsatz des Verfassers „Drehwinkelverfahren in der experimentellen Statik“, Zentralblatt der Bauverwaltung 1931, Heft 30.
 11. Die „Kreuzlinienabschnitte“ oder Belastungsglieder der Clapeyronschen Gleichung sind zusammengestellt für alle möglichen Belastungsfälle im Anhang der Schrift von Dipl.-Ing. G. Ehlers, Berlin: „Die Clapeyronsche Gleichung als Grundlage der Rahmenberechnung“, Sonderdruck aus „Deutsche Bauzeitung“, Berlin. Ferner Kleinlogel-Sigmann, Der durchlaufende Träger. Berlin 1929.
 12. Die Gleichungen (3) und (4) stimmen überein mit den in den „Bestimmungen über die zulässige Beanspruchung und Berechnung von Konstruktionsteilen aus Flußstahl und hochwertigem Baustahl usw.“ in Hochbauten vom 25. II. 1925 festgelegten Momentenwerten von $\frac{Ql}{11}$ im Endfeld und $\frac{Ql}{16}$ im Mittelfeld.
 13. Dipl.-Ing. G. Ehlers, a. a. O. S. 10.
 14. Dr. techn. Fritz Stüssi, Sicherheit statisch unbestimmter Fachwerke bei Veränderung einzelner Stabquerschnitte: Die Bautechnik 1931, Heft 40.
 15. Derselbe, Über den Verlauf der Schubspannungen in auf Biegung beanspruchten Balken aus Stahl. Ein Beitrag zur Berücksichtigung der Plastizität: Schweizerische Bauzeitung, Bd. 98, Nr. 1.
-

Einleitung.

Durch die grundlegenden Arbeiten und Versuche von Prof. Grüning¹⁾, Hannover, und Prof. Maier-Leibnitz²⁾, Stuttgart, ist die Frage der „Selbsthilfe“ oder — etwas volkstümlicher ausgedrückt — der „Schlauheit“ des Materials bei statisch unbestimmten Tragwerken aus Stahl (Durchlaufträgern und Rahmen) angeschnitten und bis zu einem gewissen Grade geklärt worden. Man versteht unter der Selbsthilfe des Materials die durch die erwähnten Versuche erwiesene Tatsache, daß sich bei Berücksichtigung der plastischen Verformung unter einer gesteigerten (Grenz-) Belastung eine Angleichung der Feld- und Stützenmomente durchlaufender Systeme (zu denen auch die biegungssteifen Rahmen gehören) ergibt, daß also bei einer rechnermäßig über die Streckgrenze erfolgenden Beanspruchung an einer Stelle an einer anderen, noch nicht voll ausgenutzten Stelle eine Spannungserhöhung eintritt, die selbst wieder bis zur Streckgrenze ansteigen kann.

Die Dimensionierung geschieht — unter Verwertung dieser Tatsache — daher nicht mehr auf Grund einer festen Größe der zulässigen Spannung, sondern auf Grund der für das Material und das Traggebilde notwendigen Sicherheit, wie dies von namhaften Fachleuten schon seit längerer Zeit für die Berechnung aller Bauwerke vorgeschlagen wird³⁾ und beispielsweise in der Flugzeugstatik längst üblich ist.

Als Folge der Veröffentlichungen von Grüning und von Maier-Leibnitz hat sich die Fachwelt lebhaft für diese Angelegenheit zu interessieren begonnen und in Zuschriften an die Schriftleitung der die Aufsätze von Maier-Leibnitz enthaltenden Zeitschrift „Die Bautechnik“⁴⁾ und in selbständigen Beiträgen⁵⁾ zu dieser Frage Stellung genommen.

Wenn auch im großen und ganzen als zusammenfassendes Ergebnis aller dieser Abhandlungen ein Gutheißen der neuen Erkenntnisse, die von großer wirtschaftlicher Bedeutung für den Stahlbau sind, festgestellt werden kann, so sind doch auch andererseits — und dies mit Recht — Stimmen laut geworden, die zur Vorsicht mahnen. So warnt Dr. Bohny⁶⁾ davor, „so ohne weiteres die wenigen vorliegenden Ergebnisse in der Praxis zu verwenden, also gewissermaßen mit der Selbsthilfe des Materials von vornherein zu rechnen“, und Dr.-Ing. e. h. Karl Bernhard⁷⁾ schließt seine Zuschrift mit der Forderung, daß „in Übereinstimmung mit den guten Erfahrungen

der Praxis der Weg verfolgt werden müsse, allgemeine Grundlagen für die Berechnung derartiger Konstruktionen unter Berücksichtigung der Selbsthilfe (wofür Bernhard Spannungsausgleich als Bezeichnung vorschlägt) zu finden“.

Tatsächlich sind ja auch die Versuche nur für ganz bestimmte spezielle Belastungsfälle, also für ein eng begrenztes Gebiet, durchgeführt worden, und es ist bei der Auswertung der Versuche nicht auf einen wichtigen Umstand Rücksicht genommen worden, der — soviel dem Verfasser bekannt — in der vorliegenden Abhandlung zum ersten Male im Zusammenhange mit der Frage des Momentenausgleichs behandelt wird, nämlich auf die Frage: Wie groß ist der Unterschied der durch die Wirkung der Plastizität auszugleichenden Momente in Feld und Stütze, wenn diese Momente nach der Elastizitätstheorie (z. B. nach Clapeyron), also ohne Berücksichtigung der plastischen Verformung berechnet werden? Es gibt ja doch besondere Fälle von Systemen und zugeordneter Belastung, in denen der Momentenausgleich schon von vornherein erfüllt ist, die Plastizität also gar nicht in Anspruch genommen werden muß, im Gegensatz dazu aber gibt es Fälle, in denen Stützen- und Feldmoment sehr verschieden ausfallen. Wir nennen den ersteren der beiden Fälle den „natürlichen Momentenausgleich“, für den eines der bekanntesten Beispiele der beiderseits eingespannte Balken mit Einzellast in der Mitte (Abb. 1) oder aber der Rechteck-Zweigelenrahmen mit waagerechter (Wind-) Belastung in Höhe des Riegels (Abb. 2) ist.

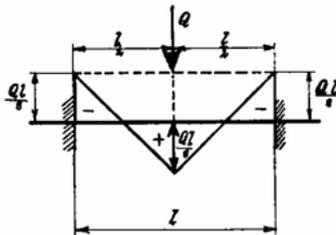


Abb. 1.

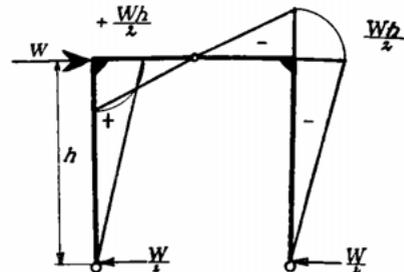


Abb. 2.

Man wird sich aber offenbar um so mehr auf die Wirkung der plastischen Verformung, also auf die Selbsthilfe des Materials, verlassen können, je näher man für irgendeinen vorliegenden System- und Belastungsfall dem „natürlichen Momentenausgleich“ kommt und umgekehrt, man wird — solange nicht noch weitere Versuchsergebnisse zur allgemeinen Klärung der Frage vorliegen — um so weniger mit dem Ausgleich rechnen dürfen, je weiter man von dem Sonderfall des natürlichen Momentenausgleichs entfernt ist, je verschiedener sich also Stützen- und Feldmoment für einen gegebenen Fall nach der Elastizitätstheorie ergeben.

Es ist daher für den wirtschaftlich denkenden Statiker naheliegend, die Schlauheit des Materials zu unterstützen durch die Schlauheit

des Konstrukteurs, indem man Systeme wählt, bei denen infolge entsprechender Spannweitenverhältnisse bzw. Steifigkeitsziffern (bei Rahmen), spezieller Laststellungen durch Anordnung von Querträgern an bestimmten Punkten usw. der Ausgleich der Momente für einen bestimmten vorherrschenden Belastungsfall, z. B. Eigengewicht, schon nach der Elastizitätstheorie erfüllt ist. Solche Systeme mit natürlichem Ausgleich oder aber solche, die nicht weit vom natürlichen Ausgleich entfernt sind, bei denen also die Plastizität entweder gar nicht oder nur in geringem Maße in Anspruch genommen wird, bieten im Stahlbau den Vorteil hervorragender Wirtschaftlichkeit und werden im III. und IV. Kapitel der vorliegenden Schrift ausführlich behandelt.

Ein Analogon zu den durchlaufenden Systemen mit natürlichem Ausgleich der Momente für einen vorherrschenden Belastungsfall bietet die Gewölbetheorie in den nach der „Stützlinie für Eigengewicht“ oder aber „Stützlinie für Eigengewicht plus halbe Verkehrslast“ geformten Bogenträgern, die schon seit alters her bekanntlich in der Baustatik als Grundlage für ein wirtschaftliches Konstruieren der Massivgewölbe dienen.

So wird zweifellos die neue „Statik des Momentenausgleichs“ die Grundlage für ein neues wirtschaftliches Konstruktionsprinzip im Stahlbau schaffen. Durchlaufende Träger von abwechselnd gleichen positiven und negativen Momenten ergeben Träger von überall gleichem Querschnitt kleinster Abmessungen. Im Gegensatz zu unseren früheren Ansichten hierüber bieten solche statisch unbestimmten Träger gegenüber statisch bestimmten Trägern, z. B. den Balken auf zwei Stützen oder den Gerberschen Gelenkträgern, nicht allein den Vorteil der größeren Wirtschaftlichkeit, sondern auch den Vorteil größerer Sicherheit; denn auch Temperaturänderungen und die früher so gefürchteten Stützensenkungen durchlaufender Traggebilde bei nicht einwandfreiem Baugrund erhöhen, sofern man an dem Momentenausgleich festhält, die Spannungen des kritischen Zustandes nicht; dies wird auch in der erwähnten Schrift von Grüning¹⁾ ausdrücklich festgestellt. Diese Einflüsse erhöhen nur die Grenzen der plastischen Längenänderungen. Andererseits bleibt aber ein n -fach unbestimmtes System noch stabil, wenn an nicht mehr als n Querschnitten die Streckspannung erreicht oder überschritten wird — wodurch gewissermaßen n Zwischengelenke eingeschaltet werden —, während ein Gelenkträger sofort labil wird, wenn nur in einem einzigen Punkte durch Überschreiten der Streckspannung ein neues Gelenk hinzukommt. Man sieht: das statisch unbestimmte System ist sicherer als das bestimmte. (Es ist im übrigen dieselbe Überlegung, die seit dem Einsturz der Quebec-Brücke dazu geführt hat, bei Fachwerken aus Stahl anstatt der Gelenkbolzenverbindungen steife Eckverbindungen mit Knotenblechen zu verwenden.)

Die beiden Hauptforderungen an jede Baukonstruktion, nämlich Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, sind demnach bei unseren Durchlauf-