Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 107/108 (1936)
Heft: 25

Artikel: Baustatische Methoden: Antrittsvorlesung
Autor: Stüssi, Fritz
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-48316

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: 13.07.2025

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

INHALT: Baustatische Methoden. — Das Zeppelin-Luftschiff «Hindenburg», LZ 129. — Rohrbruchsicherungen. — Von Lawinen. — Das Landhaus «La Joliette» bei Bulle. — Mitteilungen: «Gradtag»-Versuche. Zum Kohlenstaubmotor. Eidgen. Technische Hochschule. Hochdruckschmierung von Gleitlagern. Rotierender Zylinderrechen für Abwasser. Die «Grafa International» in Basel. Das Ende der Kettenschiffahrt. Der Schweiz. Elektrotechnische Verein. III. Weltkraftkonferenz, II. Talsperrenkongress. Die Durchgangstrasse Basel-Zürich im Raume Brugg-Baden. Der Schweizer. Technikerverband. Die Tieferlegung der Glatt. — Wettbewerbe: Bankneubau Kantonalbank-Filiale Binningen, Baselland. — Mitteilungen der Vereine. — S. I. A.-Fachgruppe für Stahl und Eisenbetonbau und Section Vaudoise de la S. I. A. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 107 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 25

Baustatische Methoden.

Antrittsvorlesung von Dr. sc. techn. FRITZ STÜSSI, Privatdozent an der ETH., Zürich.

1. Wenn wir in der neueren Fachliteratur des Bauingenieurs die theoretischen Untersuchungen über baustatische Fragen in bezug auf die eingeschlagenen Lösungswege betrachten, so können wir grundsätzlich zwei Gruppen unterscheiden: einmal wird versucht, die Lösung neuer Aufgaben mit denjenigen Mitteln zu finden, die sich bei der Bewältigung der täglichen Aufgaben der Konstruktionspraxis bewährt haben, d. h. mit den typisch baustatischen Methoden. Bei der anderen Gruppe ist die Lösungsform, im Sinne der theoretischen Mechanik, vorwiegend mathematisch orientiert.

Dass diese beiden Wege nebeneinander bestehen, ist verständlich aus der persönlichen Einstellung gegenüber der Baustatik derjenigen, die eine solche Untersuchung durchführen. Der Konstrukteur, der die baustatischen Methoden täglich praktisch zur Bemessung von Tragwerken verwendet, wird auch bei der Lösung neuer Aufgaben in erster Linie die baustatischen Zusammenhänge sehen und anzuwenden versuchen. So stellt sich für ihn beispielsweise der Zusammenhang zwischen der Belastung eines Balkens und seiner Momentenfläche am natürlichsten als Seilpolygon dar, während der Mathematiker diesen Zusammenhang in erster Linie als Differentialbeziehung auffassen wird. Solange es sich nur um die begriffliche Darstellung des Problems handelt, sind die beiden Ausdrucksweisen einander insofern gleichwertig, als sie den betrachteten Zusammenhang eindeutig charakterisieren und, je nach der subjektiven Einstellung, prägnant veranschaulichen. Die mathematische Formulierung hat dabei allerdings den Vorteil knappster Schreibweise für sich.

Anders stellen sich dagegen die Verhältnisse, sobald es sich darum handelt, den betrachteten Zusammenhang bei der Lösung einer baustatischen Aufgabe anzuwenden. Die baustatische Darstellung, das Seilpolygon, enthält in allgemeinster Form die numerische Lösung, während bei der mathematischen Darstellung, der Differentialgleichung, die Lösung zwar angegeben werden kann, aber ihre Form je nach dem Charakter der Belastungsfunktion ändert und deshalb für die Anwendung weitgehende Spezialkenntnisse in höherer Mathematik verlangt.

Damit kommen wir auf eine gewisse Schwierigkeit in der praktischen Anwendung mathematisch orientierter Methoden auf baustatische Untersuchungen zu sprechen. Diese Schwierigkeit ist eine ausgesprochen subjektive; sie beruht in der Person des Konstrukteurs. Beschäftigen wir uns kurz mit seiner Tätigkeit: Der Konstrukteur hat auf Grund der gegebenen Bedingungen über Funktion und Formgebung des zu erstellenden Tragwerks zunächst die allgemeinen Bauformen zu entwerfen, mit denen auch die grundsätzliche statische Wirkungsweise festgelegt ist. Erst nach dieser Festlegung auf Grund der Erfahrung oder des konstruktiven Gefühls, oder, etwas unbescheidener ausgedrückt, auf Grund einer gewissen schöpferischen Phantasie, tritt die Baustatik in Funktion zur Festlegung der Abmessungen der einzelnen Bauteile. Die Aufgabe des Konstrukteurs ist in erster Linie eine allgemein entwerfende; das Rechnen bildet nur eine Ergänzung und Kontrolle der konstruierenden Tätigkeit. Die Baustatik ist ein Hülfsmittel in der Hand des Konstrukteurs, dessen Aufgabe primär das Bauen und erst sekundär das Rechnen ist. Sie bildet eine wertvolle und notwendige Ergänzung des konstruktiven Gefühls; ihre Kenntnis allein aber genügt nicht zur Schaffung von Ingenieurbauwerken. Wenn damit auch die Bedeutung der Baustatik im Aufgabenkreis des Ingenieurs eine gewisse Einschränkung erfährt, so darf anderseits auch ihre Wichtigkeit nicht unterschätzt werden. Denn die Baustatik, und nur sie, ermöglicht einen bis in alle Einzelheiten zuverlässigen Entwurf von Tragwerken, nur sie erlaubt die zuverlässige Gestaltung eines Bauwerkes mit beabsichtigtem Sicherheitsgrad, und nur solche Bauwerke dürfen den Anspruch auf Vollwertigkeit erheben. Die Baustatik ermöglicht uns eine fortgesetzte Kontrolle unserer konstruktiven Erfahrungen und bildet so eine der Grundlagen unseres beruflichen Könnens.

Es wäre an sich wohl denkbar, dass auch in der Baustatik die allgemeinen Methoden der theoretischen Mechanik zur Bemessung von Bauteilen verwendet würden, denn durch eine Spezialisierung, wie sie eigene baustatische Methoden darstellen, wird man sich immer in gewissem Sinne zum eigenen Nachteil von der allgemeinen Entwicklung absondern. Demgegenüber muss in diesem Zusammenhang auf eine objektiv feststellbare Tatsache hingewiesen werden: bei einer Reihe von Problemen, die für die Bemessung von Tragwerken von Bedeutung sind, liegen seit längerer Zeit Lösungsvorschläge oder Ansätze dazu in mathematischer Formulierung vor, ohne dass die Konstruktionspraxis davon Gebrauch machen würde. So sind zum Beispiel die klassischen Arbeiten über die Stabilität der auf Biegung beanspruchten Träger von Prof. Prandtl (1899) und Prof. Timoshenko (1905 ff.) in der Praxis unbeachtet geblieben, in der Hauptsache wohl deshalb, weil die hohen mathematischen Anforderungen dem Konstrukteur normalerweise das Verständnis und damit die Ueberprüfung durch eigene Nachrechnung verunmöglichten. Trotzdem man sich dafür mit unzulänglichen und anfechtbaren Näherungsformeln beholfen hat, muss diese Scheu der Praxis, der Bemessung von Tragwerken unverstandene Formeln zu Grunde zu legen, mit Rücksicht auf die grosse Verantwortung für Menschenleben und Sachwerte, die der Konstrukteur zu tragen hat, begrüsst werden.

Wir können damit bereits eine erste Anforderung formulieren, die wir an eine Berechnungsmethode stellen müssen, wenn diese der Konstruktionspraxis dienen soll: sie muss eine gewisse Allgemeinverständlichkeit besitzen. Damit ist keineswegs eine negative Einstellung gegenüber den mathematischen Untersuchungen der theoretischen Mechanik beabsichtigt, aus denen sich ja die Baustatik entwickelt hat und immer noch angeregt und befruchtet wird. Dagegen möchte ich zeigen, dass die Fragestellung in der Baustatik in wesentlichen Beziehungen von derjenigen der theoretischen Mechanik verschieden ist, und dass sich aus dieser Verschiedenheit in der Fragestellung notwendigerweise auch eine Verschiedenheit in der Form der Beantwortung ergeben muss. Damit rechtfertigt sich für mich in der Hauptsache die aufzustellende Forderung einer besonderen baustatischen Betrachtungsweise.

2. Navier hat im ersten Abschnitt seines grundlegenden Werkes «Résumé des leçons données à l'école des ponts et chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines» die Aufgabe der angewandten Mechanik oder eben der Baustatik wie folgt umschrieben:

«Ein fester Körper widersteht einer Kraft, die ihn zu verbiegen oder seine Teile zu trennen versucht. Bei der Aufsuchung der Gesetze, denen diese Eigenschaft unterworfen ist, kann man sich zwei Hauptaufgaben stellen: 1. zu ermitteln, ob ein Körper, dessen Form und Belastung gegeben sind, sich verbiegen oder brechen wird, und um welche Grösse dies im ersten Fall geschehen wird; 2. die Form des Körpers so zu bestimmen, dass er bei geringstem Volumen einer gegebenen Belastung den grösstmöglichen Widerstand leistet.»

Diese Aufgabenstellung enthält erstens die Forderung der *Sicherheit* und zweitens diejenige der *Wirtschaftlichkeit*. Dadurch unterscheidet sich die Baustatik von den Wissenschaften, die ihr ihre Grundlagen geliefert haben. Die Physik, und auch derjenige Teil der Physik, der sich mit der Untersuchung und Betrachtung des Gleichgewichts der Massen oder der Kräfte beschäftigt, die Mechanik, kennen insbesondere die zweite dieser Forderungen nicht. Während die Naturwissenschaften die Aufgabe haben, Vorgänge in der Natur zu beschreiben und zu erklären und unsere Beobachtungen und Erfahrungen über solche Vorgänge zu ordnen, muss die Baustatik, durch Extrapolation der an bestehenden Bauwerken gewonnenen Erfahrungen, die Erschaffung neuer Bauformen ermöglichen. An diese neuen Bauwerke wird in jedem Einzelfall die Forderung einer bestimmten Sicherheit gestellt, sowohl gegen Zerstörung durch die Belastungen wie auch gegen bestimmte Grösstwerte der Formänderungen. Während in der theoretischen Mechanik das «Wie» und «Warum» im Vordergrund steht, ist bei der Baustatik das «Wie gross» der Hauptinhalt der Fragestellung. Die Problemstellung der Baustatik ist somit eine ausgesprochen quantitative.

Der quantitative Charakter der baustatischen Problemstellung wird besonders deutlich durch die Forderung der Wirtschaftlichkeit, die Navier durch die Forderung des geringsten Volumens umschreibt. Wenn die rechnerische Festlegung der Querschnittsabmessungen zu einem minimalen Tragwerksvolu-

men, oder, allgemeiner ausgedrückt, zur wirtschaftlichsten Lösung führen soll, was an sich ja nicht genau dasselbe ist, so muss die Berechnungsmethode eine gewisse Beweglichkeit besitzen. So muss sie beispielsweise bei allen Problemen, bei denen die elastischen Formänderungen eine Rolle spielen, die Berücksichtigung einer beliebigen Veränderlichkeit der Tragwerksquerschnitte erlauben. Wenn ich mir nur über das allgemeine Verhalten eines Tragwerksteils, d. h. über das «Wie» und «Warum» des Gleichgewichts generell Rechenschaft ablegen will, so genügt mir ein Rechnungsverfahren, das die Untersuchung nur unter der einschränkenden Voraussetzung gewisser bestimmter Querschnittsverhältnisse gestattet. Möglich und denkbar ist dabei, dass dieses zweite Verfahren mir dafür andere Aufschlüsse über die Arbeitsweise geben kann, die zur Vertiefung der allgemeinen konstruktiven Erfahrung Wesentliches beitragen können, die aber mit der im speziellen Fall massgebenden Forderung der Wirtschaftlichkeit nichts zu tun haben. Wir müssen somit von einem baustatischen Verfahren verlangen, dass es eine wirtschaftliche Formgebung gestattet, d. h. dass es an eine beliebige Veränderlichkeit der Querschnittsverhältnisse, die durch geringsten Materialaufwand oder einfache Bauausführung gefordert werden kann, anpassungsfähig ist.

3. Nach Ernst Mach («Die Mechanik in ihrer Entwicklung») «gehört die Oekonomie der Mitteilung und Auffassung zum Wesen der Wissenschaft. Für den Handwerker und noch mehr für den Forscher wird die kürzeste, einfachste, mit den geringsten geistigen Opfern zu erreichende Erkenntnis eines bestimmten Gebietes von Naturvorgängen selbst zu einem ökonomischen Ziel. Die Naturwissenschaft bestrebt sich, durch übersichtliche und vollständige Beschreibung das Abwarten neuer Erfahrungen unnötig zu machen. Aber auch bei der Beschreibung selbst kann Arbeit gespart werden, indem man Methoden aufsucht, möglichst viel auf einmal und in der kürzesten Weise zu beschreiben.»

Wenn hier bei der Beschreibung und Erklärung von mechanischen Vorgängen die *Oekonomie des Denkens* als zum Wesen der Wissenschaft gehörig gefordert wird, so dürfte eine ähnliche Forderung der Oekonomie des Denkens auch bei den Methoden der Baustatik gefordert werden. Wenn nun aber die Ziele der Baustatik von denen der theoretischen Mechanik ihrem Wesen nach verschieden sind, so ergibt sich zunächst die Feststellung, dass die Methoden der Darstellung und des Denkens der Mechanik, die dort die Forderung der Oekonomie befriedigen, in der Baustatik nicht unbedingt ökonomisch sein müssen. Damit erhebt sich für uns die Forderung, zu untersuchen, wo die Baustatik eigener Methoden bedarf, um ihren Aufgaben am besten zu entsprechen. Eine derartige Untersuchung über die ökonomische Denkweise der Baustatik ist kaum objektiv im Sinne einer eindeutigen Beweisführung durchzuführen. Sie wird vielmehr ausgesprochen subjektiv sein und damit allerdings auch einem gewissen subjektiven Charakter, den die höhere Baustatik zweifellos besitzt, innerlich entsprechen.

Der Unterschied zwischen der Auffassung der Mechanik und der Baustatik soll kurz am Beispiel des zentrisch gedrückten, gelenkig gelagerten geraden Stabes, also am Knickproblem gezeigt werden (Abb. 1): Die kleinen Ausbiegungen unmittelbar vor dem Knicken des Stabes gehorchen der Differentialgleichung

$$E J y'' + P y = 0 ,$$

die das Gleichgewicht zwischen innern und äussern Momenten ausdrückt. Für konstante Querschnittswerte, $E J =$ konst., lautet die Lösung dieser Gleichung

$$y = y_0 \sin \frac{n \pi x}{l} ,$$

woraus sich die Knickkraft $P_{kr.}$ ergibt zu

$$P_{kr.} = \frac{n^2 \pi^2 E J}{l^2} .$$

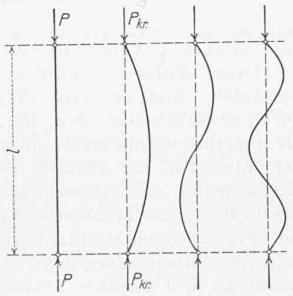


Abb. 1

Die Baustatik braucht von allen diesen Lösungen nur die erste, n = 1, denn nur diese ist für die Bemessung massgebend. Dafür benötigt sie aber eine Methode, nach der die Knickkraft auch bei beliebig veränderlichen Querschnitten, beliebiger Stützung usw. berechnet werden kann. Diese Methode braucht aber dafür in anderer Beziehung weniger allgemein zu sein, als die Lösung der Differentialgleichung, weil ja alle diese Fälle nur für die kleinste Knickkraft untersucht werden müssen. Es ist für das Verständnis des Knickproblems wichtig, zu wissen, dass der gedrückte Stab in verschiedenen Formen ausknicken kann, für die Bemessung gedrückter Stäbe aber ist es völlig bedeutungslos. Im Sinne unserer Ueberlegungen ist die mathematische Lösung des Knickproblems, von der Baustatik aus gesehen, gedanklich nicht ökonomisch, weil sie durch alle höheren Werte der Knicklast, die wir bei der Bemessung nicht brauchen, belastet ist. Evident wird diese Belastung besonders bei komplizierteren Stabilitätsproblemen.

4. Wenn wir die Unterschiede zwischen theoretischer Mechanik und Baustatik betrachten, müssen wir auch den *Begriff der Voraussetzung* erwähnen. Die Voraussetzung in unserem Gebiet ist eine Abstraktion, die entweder ein idealisiertes Tragwerk oder einen idealisierten Baustoff schafft. Eine der bekanntesten Voraussetzungen in Bezug auf das Tragwerk ist die Annahme reibungsfreier Gelenke beim Fachwerk. Diese Annahme ist eine Leistung der schöpferischen Phantasie Culmanns, des prominenten ersten Vertreters der Baustatik an unserer Hochschule. Sie ermöglichte vor etwa 80 Jahren die Aufstellung einer Fachwerktheorie, die die Praxis vollinhaltlich übernommen hat. Im Sinne der Baustatik ist allerdings die Lösung der reinen Fachwerktheorie nicht abschließend, bevor nicht die Frage geklärt ist, wieweit die Tragwerkssicherheit durch die Voraussetzung reibungsloser Gelenke, die ja in Wirklichkeit nicht vorhanden sind, beeinflusst wird. Die damit aufgerollte Frage über die Bedeutung der Nebenspannungen ist auch heute noch nicht endgültig beantwortet, wenn auch die neueren Erkenntnisse deutlich in Richtung einer Rechtfertigung und Bestätigung der Culmann'schen Voraussetzung liegen.

Ein Beispiel aus der andern Gruppe der Voraussetzungen (idealisierter Baustoff) ist folgendes: Die Beanspruchungen und Formänderungen einer elastischen Platte können bei bestimmter Lagerung und Belastung in mathematischer Schärfe berechnet werden, wenn die Voraussetzung homogenen Materials getroffen wird. Für den Mathematiker ist mit der Lösung der Lagrange'schen Differentialgleichung auch das Problem an sich gelöst, denn für ihn ist die Voraussetzung des homogenen Baustoffs nicht eine subjektive Näherungsannahme wie für den Konstrukteur, sondern ein mit der Wirklichkeit gleichwertiger Ausgangspunkt seiner Untersuchung. Baustatische Verfahren der Plattenstatik für die Bemessung von Platten des Eisenbetonbaues werden die Veränderlichkeit der Steifigkeit zu berücksichtigen erlauben müssen, wenn sie alle Anforderungen, die sich aus dem Zweck der Baustatik an ein Verfahren stellen lassen, erfüllen wollen. Ebenso wird auch der Stahlbau bei der Untersuchung von Beulproblemen im plastischen Bereich eine Erweiterung der Plattentheorie in diesem Sinne fordern müssen.

Ein klassisches, aber wahrscheinlich wenig bekanntes Beispiel dafür, wie wenig wichtig für den Mathematiker die materielle Abklärung der Voraussetzungen eines technischen Problems sind, findet sich bei Leonhard Euler im Anhang «De curvis elasticis» seines Hauptwerkes über die Isoperimeterprobleme «Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes». Euler leitet dort die nach ihm benannte Knickgleichung des geraden zentrisch gedrückten Stabes ab. Er bestimmt die Knicklast als diejenige axial wirkende Kraft, die einen ursprünglich geraden Stab zu verbiegen vermag, aus der Bernoullischen Bedingung der minimalen Formänderungsarbeit. Das bekannte Resultat lautet in der Eulerschen Schreibweise

$$P_{kr.} = \frac{\pi^2 E k^2}{l^2} .$$

$E k^2$ bedeutet die absolute Elastizität (elasticitas absoluta) und entspricht unserm heutigen Begriff der Biegungssteifigkeit $E J$. Euler sagt, daß die Elastizität durch Versuche (Durchbiegungsmessung) bestimmt werden könne und gibt dann in § 40 noch folgende nähere Angabe:

«Diese absolute Elastizität $E k^2$ aber hängt zuerst von der Natur des Materials ab, aus dem der Stab hergestellt ist; denn die einen Materialien sind mehr, die andern weniger befähigt, sich auszudehnen. Zweitens hängt sie auch von der Breite des Stabes ab, so, dass der Ausdruck $E k^2$ proportional zur Stabbreite wird sein müssen, wenn alles übrige gleich bleibt. Drittens aber ist die Dicke des Stabes von grossem Einfluss auf die Grösse des zu bestimmenden Ausdrucks $E k^2$, der dem Quadrat der Dicke proportional zu sein scheint. Der Ausdruck $E k^2$ wird somit einen von den Materialeigenschaften abhängigen Wert besitzen und von der Breite des Stabes in der ersten, von seiner Dicke in der zweiten Potenz abhängig sein.»

Diese Angabe ist falsch; die Biegungssteifigkeit ist der dritten Potenz der Dicke eines Stabes von Rechteckquerschnitt proportional. Durch diesen Fehler wird aber die Leistung des Mathematikers Euler in keiner Weise verkleinert; die Größe der absoluten Elastizität ist ihm für die theoretische Lösung des Knickproblems nicht wichtig; es genügt ihm, diese, als Voraussetzung, zu definieren. Für die Bemessung des gedrückten Stabes ist dagegen gerade der numerische Wert der Biegungssteifigkeit von ausschlaggebender Bedeutung.

Diese Hinweise dürften genügen, um einen weiteren Unterschied zwischen der Baustatik und der theoretischen Mechanik zu kennzeichnen. In der Baustatik ist es notwendig, die Voraussetzungen, die oft als subjektive Näherungsannahmen zur Vereinfachung der Rechnung eingeführt werden, in ihren Auswir-

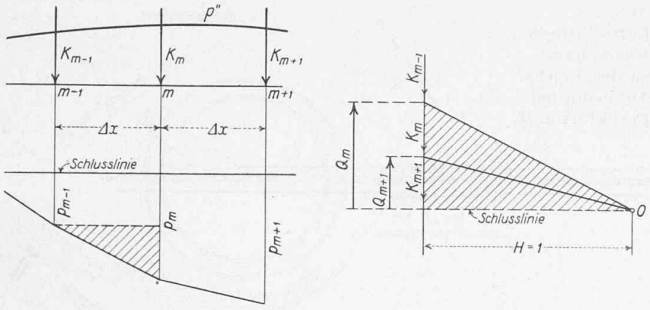


Abb. 2

kungen auf die Tragwerksicherheit überprüfen zu können, während in der mathematischen Mechanik solche Voraussetzungen als gegebene Grundlagen des Gedankenbaues eingeführt werden dürfen. Aus diesem Unterschied kann sich das Paradoxon ergeben, dass eine mathematisch exakte Lösung für die Baustatik eine Näherungslösung darstellt.

5. Zur Lösung einer statischen Aufgabe stehen fast immer zwei oder mehr verschiedene Wege zur Verfügung. So beschreibt schon Leonhard Euler im erwähnten Anhang «De curvis elasticis» zwei hübsche Beispiele, nachdem er den Unterschied zwischen direkter Methode, per causas efficientes, und der indirekten, per causas finales, allgemein auseinandergesetzt hat:

«Die Krümmung eines Seiles oder einer aufgehängten Kette ist so auf doppeltem Wege bestimmt worden, zuerst a priori, aus der Wirkung der Schwerkraft, dann zweitens durch die Methode der Maxima und Minima, weil leicht einzusehen ist, dass ein solches Seil diejenige Krümmung annehmen muss, bei der sein Schwerpunkt die tiefstmögliche Lage einnimmt. Aehnlich ist die Krümmung der durch durchsichtige Medien verschiedener Dichte durchgehenden Lichtstrahlen sowohl a priori bestimmt worden, als auch daraus, dass sie in kürzester Zeit durch das Medium durchgehen müssen.»

Die Baustatik wird die Unterscheidung der zweckmässigen Lösung nicht nach der mehr philosophischen Klassifizierung des a priori und a posteriori treffen, sondern danach, *ob sie ihren spezifischen Mitteln angepasst ist oder nicht*. Das Können des Statikers zeigt sich zum guten Teil gerade darin, dass er die Lösung eines neuen Problems von derjenigen Seite aus anpackt, von der aus es für die baustatischen Mittel am einfachsten und übersichtlichsten zugänglich ist.

Ich möchte nun eines der typischen baustatischen Mittel zur näheren Beleuchtung herausgreifen, nämlich das *Seilpolygon*. Seine ursprüngliche Verwendung (Stevin, Varignon) beschränkte sich auf die Zusammensetzung von Kräften. Die Weiterentwicklung wurde insbesondere durch Prof. Culmann durch die Bestimmung statischer Momente (Biegungsmomente, Trägheitsmomente, Schwerpunktsbestimmung) nachhaltig gefördert. Eine bedeutende Vergrösserung des Anwendungsbereichs verdankt das Seilpolygon Otto Mohr durch seine Darstellung der elastischen Linie. Diese Erweiterung stellt eine Umdeutung des Zusammenhangs zwischen Belastung und Biegungsmoment dar, oder besser eine Verallgemeinerung auf die diesen Zusammenhang beherrschende Differentialbeziehung. Durch diesen Schritt wird praktisch das Seilpolygon oder die Seilkurve mit dem zugehörigen Kräftepolygon zum baustatischen Repräsentanten für den Zusammenhang zwischen einer Funktion p und ihrer zweiten Ableitung p''. Eine wertvolle Weiterführung dieser Anwendungsmöglichkeiten bedeutet das Verfahren von L. Vianello zur Berechnung der kritischen Belastung gedrückter Stäbe mit beliebig veränderlichen Querschnitten und beliebiger Stützung. Das Verfahren von Vianello stellt, allgemeiner ausgedrückt, die praktische Lösung der homogenen linearen Differentialgleichung zweiter Ordnung dar, in einer Form allerdings, die vielleicht im Sinne der Mathematik nicht einmal mehr als bestimmte Methode bezeichnet werden darf. Man schätzt eine Lösung gefühlsmässig und untersucht, ob sie mit den Gleichgewichts- und Formänderungsbedingungen verträglich ist. Durch diese Verträglichkeitsuntersuchung wird man der genauen Lösung immer näher geführt. Diese Art des Vorgehens entspricht ihrem Wesen nach dem Denkvorgang, der sich beim Entwurf eines Ingenieurbauwerkes im Konstrukteur abspielt. Ich glaube, dass wir gerade wegen dieser innern Uebereinstimmung des Denkvorgangs das Verfahren von Vianello als eines der klassischen baustatischen Mittel bezeichnen dürfen.

Es lässt sich nun leicht zeigen, dass der durch das Seilpolygon dargestellte Zusammenhang zwischen einer Funktion und ihrer zweiten Ableitung uns auf einfache Weise erlaubt, eine weitere Gruppe von statischen Problemen übersichtlich und mit praktisch beliebiger Genauigkeit zu lösen, nämlich alle jenen Aufgaben, die durch die lineare inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung beherrscht sind. In Abb. 2 ist ein Ausschnitt des zur Belastungsfunktion p'' mit der Poldistanz $H = 1$ gezeichneten Seilpolygons mit den Ordinaten p dargestellt. Ueblicherweise wird die Spannweite l des betrachteten Trägers in n gleiche Teile Δx eingeteilt und die Belastungsfunktion durch die in den Teilpunkten wirkenden Knotenlasten K_m ersetzt. Für den näherungsweise meist trapezförmig angenommenen Verlauf von p'' ergibt sich die Grösse der Knotenlast K_m zu

$$K_m = \frac{\Delta x}{6} (p''_{m-1} + 4 p''_m + p''_{m+1}) \quad . \quad . \quad . \quad \text{(a)}$$

Bei stetigem Funktionsverlauf von p'' ergibt sich ein genaueres Verfahren dadurch, dass p'' über je zwei Felder Δx als Parabel angenommen wird. Dafür wird

$$K_m = \frac{\Delta x}{12} (p''_{m-1} + 10 p''_m + p''_{m+1})$$

Wir verfolgen hier die nur erste Form.

Aus der Aehnlichkeit der im Seil- und Kräftepolygon schraffierten Dreiecke ergibt sich

$$p_m = p_{m-1} + Q_m \Delta x$$

und analog

$$p_{m+1} = p_m + Q_{m+1} \Delta x .$$

Aus der Subtraktion dieser beiden Gleichungen und unter Beachtung, dass $Q_m - Q_{m+1} = - K_m$ folgt

$$\frac{p_{m-1} - 2 p_m + p_{m+1}}{\Delta x} = K_m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(b)}$$

Die zu lösende Differentialgleichung liege in der Form

$$p'' + a p + F(x) = 0$$

vor. Setzen wir daraus p'' in Gleichung (a) ein, so erhalten wir aus den Gleichungen (a) und (b) mit der Abkürzung

$$c = \frac{6}{\Delta x^2} = \frac{6 n^2}{l^2}$$

ein System dreigliedriger Gleichungen

$$- p_{m-1} (c + a) + p_m (2c - 4a) - p_{m+1} (c + a) = F_{m-1} + 4 F_m + F_{m+1} .$$

Ebenso einfach lassen sich auf ähnliche Weise die Randbedingungen ausdrücken. So fällt z. B. für $p_A = 0$ einfach die Gleichung für $m = A$ aus.

Die Lösung ist insofern allgemein, als die Koeffizienten a veränderlich oder konstant sein können und von positivem oder negativem Vorzeichen. Aehnlich ist auch eine Lösung mit ungleichen Teilen Δx möglich.

Die Auflösung derartiger dreigliedriger Gleichungssysteme ist in der Baustatik eine sehr häufig vorkommende Rechenoperation. Stellen sich doch die Elastizitätsbedingungen einer Grosszahl von statisch unbestimmten Tragwerken in dieser Form dar. Die hier skizzierte baustatische Auflösung von Differentialgleichungen der betrachteten Art bietet deshalb dem Statiker nicht nur keine Schwierigkeiten, sondern ist von ihm mit dem üblichen Auflösungsverfahren, dem abgekürzten Gauss'schen Algorithmus, in einem Minimum von Zeit durchzuführen.

Von praktisch bedeutsamen Anwendungen seien hier nur die Berechnung von Hängebrücken unter Berücksichtigung der elastischen Formänderungen und das Torsionsproblem von I-Trägern (Stabilität der auf Biegung beanspruchten I-Träger, Kranbahnen, Kreisträger mit I-Querschnitt) erwähnt.

6. Ich habe zu zeigen versucht, dass wir in der Baustatik eigene Methoden zur rechnerischen Untersuchung von Tragwerken benötigen. Diese Forderung rechtfertigt sich durch gewisse Unterschiede in der Fragestellung gegenüber der theoretischen Mechanik und durch die Rücksichtnahme auf den Konstrukteur. Diese ist nach meiner Auffassung deshalb notwendig, weil Entwurf, Berechnung und Ausführung eines Ingenieurbauwerkes eine untrennbare Einheit bilden müssen.

Es ist selbstverständlich, dass in vielen Fällen keine scharfe Abgrenzung zwischen der baustatischen Denkweise und den Methoden der allgemeinen Mechanik möglich ist, denn die physikalischen Grundlagen sind ja hier wie dort die gleichen. Auch ist ja die Auffassung darüber, ob ein Rechnungsverfahren sich für die Verwendung auf dem Konstruktionstisch eigne oder nicht, weitgehend subjektiv bedingt. Für zahlreiche Probleme oder Problemgruppen besitzen wir heute noch keine Lösungen, die die skizzierten Anforderungen an ein typisch baustatisches Verfahren restlos erfüllen. In den Gebieten der Statik der Platten und Schalen, der Stabilitätsprobleme, von denen ja nur die einfacheren Fälle als endgültig gelöst betrachtet werden dürfen, in der Theorie der Einzelheiten und Verbindungen, bei den räumlichen Tragwerken und in der Berücksichtigung der Einflüsse bewegter Lasten auf unsere Tragwerke liegt noch ein weites Feld vor uns, dessen praktische Bearbeitung die Voraussetzung für eine erfolgreiche Weiterentwicklung des Ingenieurbauwesens auf breitester Grundlage bildet. Es ist selbstverständliche Bedingung, dass der Ausbau unserer baustatischen Methoden nur in voller Uebereinstimmung mit den Grundgesetzen der Mechanik und mit den

Forschungsergebnissen der Materialprüfung erfolgen kann. Aber die Lösung eines baustatischen Problems erscheint mir erst dann abgeschlossen zu sein, wenn sie nach Form und Inhalt eine direkte Umsetzung in unsere Baustoffe Stahl, Beton und Holz erlaubt. Die Beurteilung einer baustatischen Methode auf ihre Zweckmässigkeit wird nie von einem feststehenden Schema aus möglich sein. Fest steht nur der Grundsatz, dass die Baustatik nie Selbstzweck sein darf, sondern dass sie Dienerin sein muss an der Vervollkommnung der Ingenieurbaukunst.

Das Zeppelin-Luftschiff „Hindenburg", LZ 129.

Die «Z. VDI» widmet dem jüngst fertiggestellten Luftschiff «LZ 129» die ganze Nummer vom 28. März mit den Aufsätzen von *W. E. Dörr:* «Das Zeppelinluftschiff LZ 129», *Fritz Sturm:* «Vortriebsanlage des LZ 129», und *A. Kolb:* «Luftschiffhäfen für den Verkehr mit Zeppelinluftschiffen», denen wir folgende Angaben entnehmen.

Das neue Luftschiff besitzt mit maximal 200 000 m³ ein nahezu doppelt so grosses Gasfassungsvermögen wie «Graf Zeppelin»[1]). Seine Form ist wesentlich gedrungener infolge Vergrösserung des Durchmessers um 10 m auf 41,2 m, bei einer Verlängerung des Luftschiffkörpers um ebenfalls 10 m auf 245 m. Die Stabilisatoren sind relativ bedeutend grösser und damit die Fahreigenschaften sowie die Steuerfähigkeit verbessert.

Das Rumpfgerüst besteht wie bei allen bisherigen Luftschiffen aus einem verspannten Gerippe von Leichtmetallträgern zur Aufnahme der 16 Traggaszellen. Ein mittlerer und ein unterer Laufsteg, dieser mit Anschlussstegen zu den Motorgondeln, sowie zwei Seitenlaufstege dienen dem Dienstverkehr. Die äussere Hülle besteht aus dünner Baumwolle oder Leinen je nach Beanspruchung. Sie ist mit Zellon gestrichen, dem zum Schutze gegen Wärmestrahlung Aluminiumpulver beigemischt ist. Die Wandungen der Traggaszellen bestehen aus doppelter Stofflage mit abdichtender Zwischenschicht. Diese Konstruktion hat sich bis heute beim «Graf Zeppelin» bewährt. Die Gasdurchlässigkeit beträgt 1 l in 24 h pro m². Als Traggas wird des geringen Preises wegen Wasserstoff verwendet. Ein System von Entlüftungs- und Gasschächten, sowie die gute Luftdurchlässigkeit der Aussenhülle im untern Teil des Luftschiffes ermöglichen das Entweichen des zu Manöverzwecken abgelassenen Gases, sowie die hinreichende Entlüftung des Raumes zwischen Gaszelle und Aussenhülle.

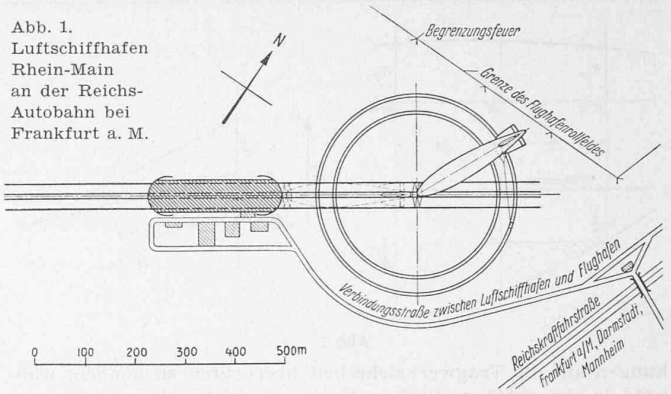
Der Passagierraum im vorderen Drittel ist zweistöckig und bietet 50 Personen Schlafgelegenheit in zweiplätzigen Kabinen. Er enthält neben der elektrischen Küche, den Aufenthalts- und Schlafräumen einen Rauchsalon mit Bar, sowie Lese- und Gesellschaftszimmer für die Passagiere, dazu eine Offiziers- und eine Mannschaftsmesse im Unterdeck. Beide Decks sind durch eine Treppe miteinander verbunden. Bei der Landung kann vom Unterdeck aus ein Fallreep auf den Erdboden abgesenkt werden.

Die Führergondel ist vom Passagierraum getrennt. Sie enthält in drei verschiedenen Räumen alle für die Steuerung und die Navigation erforderlichen Betätigungsorgane, Instrumente und Apparate. Höhen- und Seitensteuer können mittels Handrad oder automatisch durch den Kreiselkompass mittels Servomotor betätigt werden. Ein Maschinentelegraph und eine Telephonanlage mit 24 Anschlüssen dienen der Verständigung zwischen der Bedienungsmannschaft und der Leitung, eine Rohrpost dem Verkehr des Telegraphisten mit den Fahrgästen und der Besatzung. Im Boden der Gondel und in der untern Heckflosse ist je ein Landerad eingebaut. Die Schlafräume der Mannschaft sind seitlich des unteren Laufsteges an verschiedenen Stellen untergebracht, ebenso die Frachtbehälter und die Brennstofftanks. Die Stromerzeugung für Licht, Apparate usw. erfolgt durch eine Dieselanlage mit zwei Maschinensätzen zu 30 kW; neben dem Hauptbeleuchtungsnetz mit 220 V besteht eine Notbeleuchtung mit 24 V. Eine kleine Werkstatt mit Werkbank, Schraubstock und Ersatzteillager dient der Vornahme kleiner Reparaturen während des Fluges.

Der Antrieb erfolgt durch vier umsteuerbare 16-Zylinder-Dieselmotoren von 800 bis 900 PS Dauer- und 1200 PS Höchstleistung. Diese Motoren mit angebautem Untersetzungsgetriebe stammen von Daimler-Benz und wurden eigens für den LZ 129 konstruiert. Die Untersuchung der Schwingungsverhältnisse und der Laufeigenschaften waren Gegenstand besonderer eingehender Dauerversuche. In jeder der vier Motorgondeln sind ausser dem Wasserkühler an der Stirnseite Apparate für die Filtration, Kühlung und Umwälzung des Oeles eingebaut. Die Kühlwasserwärme kann über besondere Lufterhitzer zur Heizung der Fahrgasträume verwendet werden. Ein elektrischer Durchlauferhitzer besorgt im Bedarfsfall das Anwärmen der Motoren durch Heizen des Kühlwassers. Die Propeller sind vierflügelig und haben 6 m Durchmesser. Ihre Axe ist 4° gegen die Längsaxe des Rumpfes geneigt, sodass der Schraubenstrahl vom Luftschiffkörper weg gerichtet ist; die Strömung längs der Oberfläche wird auf diese Weise weniger gestört, als bei parallelen Schraubenaxen. Vor der Landung wird der LZ 129 durch Rückwärtsgang der Propeller gebremst. Der Bremsweg aus 15 m/sec Fahrt misst 300 bis 350 m. Die Reisegeschwindigkeit wird mit 125 km/h angegeben, der Brennstoffverbrauch mit 165 g/PSh.

[1]) Vergl. «SBZ» Bd. 91, S. 318; Bd. 92, Nr. 7* und Nr. 26*; Bd. 94, S. 85, 98, 107, 135; Bd. 95, S. 320; Bd. 98, S. 229; Bd. 105, S. 271.

Abb. 1. Luftschiffhafen Rhein-Main an der Reichs-Autobahn bei Frankfurt a. M.



Die *Ankermastanlage in Pernambuco,* die der Zeppelin-Reederei gehört, ist in den Jahren 1930 bis 1934 auf ihren heutigen Stand nach und nach ausgebaut worden. Sie umfasst einen 16,5 m hohen Ankermast zum Befestigen des «Graf Zeppelin» mit Einholwinde, einen Heckrundlaufwagen auf Geleise von 1 m Spur, ein Lager Propangas zur Belieferung des verankerten Luftschiffes über einen Leitungsanschluss am Ankermast mit 2000 m³/h, ein Lager von komprimiertem Wasserstoff entsprechend 25 000 m³ Gas bei normalem Druck, dem 6 bis 8000 m³/h entnommen werden können. Der Wasserstoff wird fortlaufend mittels einer elektrolytischen Anlage gewonnen und durch Kompressoren auf 150 at verdichtet. Es werden stündlich 88 m³ H_2 erzeugt. Den Strom liefert eine Diesel-elektrische Anlage von 430 bis 561 kW Leistung.

Der Luftschiffhafen Sta. Cruz bei Rio de Janeiro, ebenfalls im Besitz der Zeppelin-Reederei, soll grosse meteorologische Vorzüge haben. Die Halle wurde nach der vorherrschenden Windrichtung orientiert. Sie ist 270 m lang, besteht aus 24 Eisenfachwerk-Dreigelenkbogen in 10 m gegenseitigem Abstand, ist 50 m hoch und breit und wurde des schlechten Baugrundes wegen auf 576 Betonpfählen gegründet. Aus Ersparnisgründen erhielt die Halle nur ein Tor, was bei den Windverhältnissen zulässig erschien. Auf einem Geleise von 6 m Spurweite ist ein von 16,5 auf 21,5 m Höhe ausziehbarer Ankermast fahrbar. Er besitzt eine Vorrichtung, die den Verankerungskegel an der Spitze des Luftschiffes im Verankerungstrichter an der Mastspitze verriegelt, wenn das Schiff mittels der Ankermastwinde an die Mastspitze herangeholt ist. Auf einer Bühne am Ankermast befinden sich auch Anschlüsse für Abgabe von Dieselöl, Wasserstoff und Wasser an das Fahrzeug. Eine Anzeigevorrichtung orientiert über den statischen Zustand des Luftschiffes. Der Heckrundlaufwagen mit Normalspur, der ebenfalls mit einer Waage ausgerüstet ist, kann auf eine Einfahrbrücke aufrollen, die sich auf dem gleichen, axialen Geleise in die Halle hinein bewegt wie der Ankermast. Der sicheren Führung beim Ein- und Ausfahren dienen ferner seitliche Ausfahrbahnen aus T-Trägern, dicht an der Innenseite der Hallenbinderfüsse, mit darauf fahrbaren Laufkatzen, an denen das Luftschiff vertäut wird. Die früher so umständlichen Manöver können so heute mit einem Minimum an Personal durchgeführt werden. Soll das Luftschiff bei Wind in die Halle eingefahren werden, so wird es durch eine Heckaufholwinde mit 8 t Zugkraft bei 20 m/min in die Hallenaxe ausgerichtet. Frei fahrbare Schlepper mit Spillkopf ergänzen die auf Schienen laufenden Führungseinrichtungen.

Auch in Sta. Cruz wird der Wasserstoff auf elektrolytischem Wege gewonnen. Die Anlage arbeitet nach dem Filterpressenverfahren Bamag-Zdansky und liefert bis zu 230 m³/h; die Leistungsaufnahme beträgt dementsprechend bis zu 1100 kW. Eine ölgeheizte Destillationsanlage liefert das Wasser. Der Strom wird von einem eigenen Dieselaggregat von 750 PS und zum kleinen Teil aus dem Hochspannungsnetz von Sta. Cruz bezogen. Ueber einen Zwischenbehälter von 500 m³ gelangt das Gas durch einen Verdichter in die Hochdruckspeicher, die