

Karl-Eugen Kurrer

GESCHICHTE AUF DER SUCHE NACH DEM GLEICHGEWICHT DER BAUSTATIK



2. Auflage

Geschichte der Baustatik

Karl-Eugen Kurrer

GESCHICHTE

Auf der Suche nach dem Gleichgewicht

DER BAUSTATIK

2. Auflage

Dr.-Ing. Karl-Eugen Kurrer
Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
Rotherstr. 21
10245 Berlin

Dieses Buch enthält 957 Abbildungen.

Umschlagbilder unter Verwendung eines Fotos der schlaich bergemann partner sbp gmbh, Stuttgart und von historischen Quellen (im Buch nachgewiesen)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2016 Wilhelm Ernst & Sohn,
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung und Layout: Sophie Bleifuß, Berlin
Satz: Uta-Beate Mutz, Leipzig
Zeichnungen: Peter Palm, Berlin
Druck: BGZ, Berlin
Bindung: Stein + Lehmann, Berlin

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

2., stark erweiterte Auflage

Print ISBN: 978-3-433-03134-6
ePDF ISBN: 978-3-433-60642-1
oBook ISBN: 978-3-433-60643-8

Zum Geleit

Dreizehn Jahre nach der 1. Auflage erscheint Kurrers *Geschichte der Baustatik* in wesentlich erweiterter Form, nunmehr mit dem Untertitel *Auf der Suche nach dem Gleichgewicht*. Der Zusatz weist natürlich auf die Bedeutung des wichtigsten aller mechanischen Grundsätze hin: Ohne Gleichgewicht keine tragende Struktur. Er drückt aber auch die ständige Suche nach der Balance zwischen der Baustatik als Wissenschaftsdisziplin und ihrer zentralen Aufgabe in der praktischen Anwendung aus, ganz im Sinne von Leibniz' *Theoria cum Praxi*. Dieses Wechselspiel hat beide Seiten zu allen Zeiten ganz wesentlich befruchtet, was sich als roter Faden durchgängig im gesamten Buchwerk zeigt.

Neue Inhalte der 2. Auflage sind: Erddrucktheorie, Traglastverfahren, historische Lehrbuchanalyse, Stahlbrückenbau, Leichtbau, Platten- und Schalentheorie, Computerstatik, Computergestützte Graphostatik und Historische Technikwissenschaft.

Gleich zu Anfang lesen wir, dass die erste Tagung über die Geschichte der Baustatik 2005 in Madrid stattgefunden hat. Das Thema, in Teilbereichen vielfach behandelt, wartet geradezu auf eine umfassende Darstellung. Das vorliegende Werk ist allerdings kein Geschichtsbuch, in der die Beiträge unserer Vorfahren zum Thema in chronologischer Folge aufgelistet und systematisch beschrieben werden. Es ist Kurrers Geschichte der Baustatik mit seinen Interpretationen und Einordnungen; glücklicherweise, denn so ist es eine spannende Zeitreise geworden, stark subjektiv geprägt, eher thematisch und nur grob chronologisch gegliedert, mit einer Vorliebe zum Wissenschaftstheoretischen, eben die Beschreibung der Evolution einer wichtigen technikwissenschaftlichen Grundlagendisziplin mit ihren vielen Facetten in Lehre, Forschung und vor allem Praxis.

Und was ist überhaupt Baustatik? Der Begriff in dieser Kurzform wird wohl erst am Beginn des 20. Jahrhunderts entstanden sein. Gerstners erstes Buch aus dem Jahr 1789 spricht noch von der *statischen Baukunst*; Emil Winkler verwendet um 1880 den Begriff *Statik der Baukonstruktionen*. Darin schließt Winkler auch die Erddrucktheorie ein, deren Entwicklungsgeschichte Kurrer von 1700 bis heute erstmals im umfangreichen Kapitel 5 gültig zusammenfasst. Die Geschichte der Baustatik ist zunächst einmal eine Geschichte der Mechanik und der Mathematik, die sich ja früher als ausgesprochen angewandte Wissenschaften verstanden. Kurrer nennt diesen Zeitraum von 1575 bis 1825 die Vorbereitungsperiode, die für den Bauwerksentwurf noch stark von der Empirie beherrscht wird. Dennoch müssen wir feststellen, dass hier die Grundlagen vieler Tragwerkstheorien gelegt werden. Gemeinhin wird das statische Gutachten der drei Mathematiker zur Sanierung der Peterskuppel (1742/43) als erste statische Berechnung im heutigen Sinne betrachtet, bei der eine Bauaufgabe durch Anwendung wissenschaftlicher Methoden angegangen wird,

bezeichnenderweise begleitet durch den wohl ewig anhaltenden Streit zwischen Theorie und Praxis (s. Abschnitt 13.2.5). Heute belegen wir den Jahrhunderte alten Vorgang der gedanklichen Abstraktion natürlicher und technischer Prozesse in fast allen wissenschaftlichen Disziplinen mit den Vokabeln *Modellierung* und *Simulation*, so als ob er erst mit dem Aufkommen des Computers und der Informationsverarbeitung eingeführt worden sei, dabei war er schon lange Triebkraft menschlichen Denkens und Handelns. Die Abbildung der tragenden Eigenschaften von Baukonstruktionen in ein Gedankenmodell ist ein typischer Fall. Als klassisches Beispiele seien die Entwicklung der Gewölbe-, Bogen- und Kuppeltheorien (s. Kapitel 4) sowie die kontinuumsmechanischen Erddruckmodelle eines Rankine und Boussinesq (s. Abschn. 5.4 und 5.5) genannt. Es hat sich eingebürgert, diesen rechnerorientierten Teilbereich in den einzelnen Wissenschaften mit dem Zusatz Computational zu bezeichnen, hier eben *Computational Mechanics*.

Das Jahr 1825 als der Beginn einer *Disziplinbildungsperiode* der Baustatik (s. Kapitel 7) ist sicher treffend gewählt. Baustatik reduziert sich nicht auf das Lösen einer Gleichgewichtsaufgabe und einen Rechenprozess. Navier, dessen Bedeutung als »Mechaniker« wir heute noch mit seinem Namenszusatz bei zahlreichen Theorien anerkennen (*Naviersche Spannungsverteilung*, *Navier-Lamé-* und *Navier-Stokes-Gleichungen* u. a. m.), war ein ausgesprochener Praktiker. Als Professor für Angewandte Mechanik an der École des Ponts et Chaussées hat er die Gebiete der Angewandten Mechanik und Festigkeitslehre zusammengeführt, um sie auf praktische Aufgaben des Bauwesens anzuwenden. So beschreibt er in seiner *Mechanik der Baukunst* 1826 die Arbeit der Ingenieure: *nachdem das Project eines Werkes entworfen und aufgezeichnet ist, untersuchen sie, ob sie allen Bedingungen genügt haben, und verbessern ihren Entwurf so lange, bis dies geschehen ist. Unter diesen Bedingungen ist die Oekonomie eine der wesentlichsten; die Solidität und die Dauerhaftigkeit sind nicht weniger wichtig (...)* (s. Abschnitt 2.1.2.1). Mit Navier hob die Durchsetzung der Baustatik als eigenständige wissenschaftliche Disziplin an. Wichtige Tragwerkstheorien und Berechnungsmethoden werden in der Folgezeit entwickelt, verbunden mit Namen wie Clapeyron, Lamé, Saint-Venant, Rankine, Maxwell, Cremona, Castigliano, Mohr, Winkler, um nur einige zu nennen. Die graphische Statik von Culmann und ihre Weiterentwicklung zur Graphostatik sind Meilensteine in der Geschichte der Baustatik.

Bereits an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Entwicklung nicht immer ohne Kontroversen abging, sei es aus inhaltlichen Gründen, aus einem disziplinären Wettbewerb oder einem Prioritätenstreit. Das spannende Thema wird an 13 Beispielen in Kapitel 13 vertieft.

Die Methodenentwicklung der Baustatik bekam in den folgenden Jahren eine starke Ausrichtung auf spezielle Tragwerkssysteme und damit auch in natürlicher Weise auf die eingesetzten Baustoffe wie Eisen (Stahl) und später den Eisenbeton (Stahlbeton) (s. Kapitel 8, 9 und 10). Eigenständige werkstoffspezifische Systeme und Methoden wurden entwickelt; vereinfacht ausgedrückt: Der Stahlbau konzentrierte sich aufgrund seiner Modu-

larität und der Fertigungsverfahren zuerst auf Stabtragwerke, erst seit den 1950er-Jahren kamen die Flächentragwerke dazu. Dagegen entfaltete der Betonbau seine ihm eigene Sprache in Form von flächenhaften Tragwerken wie Platten, Scheiben und Schalen. So erfahren in der 2. Auflage des vorliegenden Werkes die Kapitel 8 und 10 eine starke Erweiterung durch Flächentragwerke. Die in Kapitel 9 behandelten räumlichen Fachwerke stellen gewissermaßen ein Scharnier dar.

Die werkstofforientierte Trennung spiegelte sich auch bei der Lehre der Baustatik in getrennten Lehrveranstaltungen wider. Erst sehr viel später wurden die Teile zu einer einheitlichen Baustatik zusammengeführt, dann allerdings häufig »neutralisiert«, d. h. nicht mehr auf die besonderen Eigenschaften der Werkstoffe bezogen; eine Entwicklung, die aus heutiger Sicht kritisch zu beurteilen ist. Natürlich sind die Methoden der Baustatik im Grundsatz werkstoffübergreifend: Sie müssen aber im konkreten Fall die besonderen Eigenschaften der Werkstoffe mit einbeziehen.

Nach Kurrer geht die Disziplinbildungsperiode mit ihren großen Erfolgen durch die Graphische Statik und die Systematisierung der Berechnungsmethoden der Stabstatik in Gestalt des Kraftgrößenverfahrens um 1900 in eine Konsolidierungsperiode (bis 1950) über; diese ist geprägt durch Verfeinerung und Erweiterung, wie beispielsweise die Zuwendung zu den Flächentragwerken und die Berücksichtigung nichtlinearer Effekte. Erst dann beginnt die »Moderne« der Baustatik, hier *Integrationsperiode* genannt. Sie ist gekennzeichnet durch den Einsatz des Computers und leistungsfähiger numerischer Methoden: Die Baustatik wird in den Tragwerksplanungsprozess Entwurf – Analyse – Bemessung – Konstruktion – Ausführung integriert. Ist damit die Evolution abgeschlossen? Verliert die Baustatik etwa mit dieser Entwicklung als eigenständige Technikwissenschaft ihr Profil und ihre Berechtigung? Die Tendenzen der letzten Jahre zeigen allerdings das Gegenteil.

Die Geschichte von gestern und heute ist auch die Geschichte von morgen. Die Baustatik hat durch die Daten- und Informationsverarbeitung eine rasante Entwicklung durchgemacht, verbunden mit zahlreichen Paradigmenwechseln. Nicht mehr der Rechenprozess und Verfahrensfragen, sondern Grundlagen, Modellbildung, Realitätsnähe, Qualitätssicherung u. a. m. stehen im Mittelpunkt. Zum Aufgabengebiet gehören neben der Statik die Dynamik, Flächentragwerke spielen eine mindest ebenso große Rolle wie die Stabtragwerke, die Berücksichtigung realen Werkstoffverhaltens ist heute zwingend. Die Baustatik war in ihrer Lebensgeschichte immer ein Aushängeschild des konstruktiven Ingenieurbaus; sie war nie die Disziplin von Rechenknechten, auch wenn dies bei Einführung einschlägiger Rechenprogramme gelegentlich so verkündet wurde und noch wird. Sie spielt auch heute noch eine wichtige Mittlerrolle zwischen der Mechanik einerseits und den entwerfenden konstruierenden Fächern andererseits in der Lehre, Forschung und Anwendung. Die Statik und Dynamik sind mittlerweile zu dem avanciert, was man international als *Computational Structural Mechanics*, als eine moderne anwendungsbezogene Tragwerksmechanik, bezeichnet.

Der Autor reflektiert diese wichtige Entwicklung in den Kapiteln 11 und 12. Er erwähnt die starke Rationalisierung und Formalisierung – Grundsteine für die dann folgende Automatisierung. So war es kein Wunder, dass der Bauingenieur Konrad Zuse bereits in den 1930er-Jahren damit begann, den ersten Computer zu entwickeln (s. Abschnitt 11.3). Die später einsetzende rasante Entwicklung numerischer Methoden für Tragwerksberechnungen war allerdings noch nicht abzusehen. J. H. Argyris, einer der Väter der modernen Methode der Finiten Elemente, hat es in seiner visionären Feststellung *The Computer Shapes the Theory* (1965) frühzeitig erkannt: Neben Theorie und Experiment gibt es eine neue Säule, die numerische Simulation (s. Abschnitt 12.1).

Computer und Programme haben naturgemäß die Arbeit des konstruktiven Ingenieurs revolutioniert. Haben wir nicht endlich den Zustand erreicht, wo wir uns vom handwerklichen, kochrezepthaften Geschäft befreit haben, um uns auf das Wesentliche konzentrieren zu können? In Abschnitt 14.1 wird die Rolle der »modernen Baustatik« diskutiert, u. a. im Kontext des Verhältnisses zwischen Bauingenieur und Architekt. Eine neue graphische Statik ist entstanden, nicht im Sinne der Automatisierung und visuellen Darstellung der Culmannschen graphischen Statik, vielmehr in Form von Visualisierungen und Animationen von mechanischen Zusammenhängen und Prozessen; dies ist ein entscheidender Schritt zur Evolution von Konstruktionen und zur Tragwerkssynthese, zu einer neuen Art von Tragwerkslehre (s. Abschnitt 14.2.4). Dieses Potenzial als lebendiges Interpretations- und Konstruktionswerkzeug ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Erwähnen sollten wir noch, dass die Grenzen zu den anderen konstruierenden Ingenieurdisziplinen (Maschinen-, Anlagen-, Fahrzeug- und Schiffbau, Luft- und Raumfahrt, Biomechanik) im Bereich der *Computational Mechanics* mehr und mehr verwischt werden; einschlägige Konferenzen machen hier keine Unterschiede mehr. Die Konzepte, Methoden und Werkzeuge sind eben universell. Auch in der Lehre deuten sich ähnliche Entwicklungen an. Nicht zuletzt wendet sich Kurrer auch an Vertreter dieser Disziplinen. Das wird besonders deutlich im 15. Kapitel, das 243 Kurzbiografien von Protagonisten der Baustatik enthält. Neben Bauingenieuren und Architekten finden sich dort Mathematiker und Mechaniker sowie Vertreter der genannten Ingenieurdisziplinen.

Diese 2. Auflage der *Geschichte der Baustatik* geht qualitativ und quantitativ weit über die 1. Auflage hinaus. Vorliegendes Werk konnte nur von einem Fachmann, einem Ingenieur, der die Disziplin von innen her kennt, geschrieben werden. Selten genug, dass sich Technikwissenschaftler so intensiv mit ihrer Geschichte auseinandersetzen. Ein solcher Glücksfall liegt hier vor. Wir können Herrn Dr.-Ing. K.-E. Kurrer für sein Opus Magnum, aber auch »seinem« Verlag Ernst & Sohn sehr dankbar sein.

Stuttgart, September 2015
Ekkehard Ramm
Universität Stuttgart

Ermutigt durch die positive Resonanz der Fachwelt auf die 1. Auflage meiner *Geschichte der Baustatik* (2002) und auf die erweiterte englische Ausgabe *The History of the Theory of Structures* (2008) stellte ich mich vor drei Jahren der Aufgabe, die *Geschichte der Baustatik* umzuarbeiten, nochmals wesentlich zu erweitern und auf den neuesten Stand zu bringen. Die vorliegende 2. Auflage entspricht zwar im Kern der englischen Ausgabe, geht aber weit über sie hinaus. Die hierfür erforderliche Umfangssteigerung um knapp 50 % war notwendig, da ich nunmehr eine Gesamtdarstellung des Entwicklungsganges der Baustatik anstrebe.

Mein Ziel bestand nicht nur darin, die in den letzten Jahren gewonnenen Forschungsergebnisse mit zu berücksichtigen, sondern die Entwicklungsgeschichte der modernen numerischen Methoden der Baustatik und der Strukturmechanik, aber auch den Zusammenhang zwischen baustatischer Theoriebildung und konstruktiv-technischem Fortschritt umfassender und schärfer herauszuarbeiten. Aus diesem Grund wurde beispielsweise der Platten-, Schalen- und Stabilitätstheorie besondere Aufmerksamkeit geschenkt, spielten doch diese Theorien bei der Herausbildung der konstruktiven Sprache des Stahl-, Stahlbeton-, Flugzeug-, Automobil- und des Schiffbaus eine bedeutende Rolle. So erfuhren die Kapitel über Stahlbau (Kapitel 8) und Stahlbetonbau (Kapitel 10) eine erhebliche Erweiterung. Ohne Zweifel ist die Finite-Elemente-Methode (FEM) die wichtigste Geistes-technologie der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts, welche von der Strukturmechanik und numerischen Mathematik hervorgebracht wurde. Deshalb stelle ich die historisch-logischen Quellen der Computerstatik, ihre Herausbildung und Etablierung detailliert in einem selbständigen Kapitel dar (Kapitel 12). Neu ist auch das 108 Seiten umfassende Kapitel über die 300-jährige Geschichte der Erddrucktheorie. Die Erddrucktheorie ist die erste genuin technikwissenschaftliche Theorie, die das wissenschaftliche Selbstverständnis des im Frankreich des 18. Jahrhundert entstehenden modernen Bauingenieurs prägte: Sie ist Referenztheorie dieser Profession – und nicht die Balkentheorie, wie vielfach angenommen wird. Erst im letzten Jahrhundert löste sich die Erddrucktheorie allmählich von der Baustatik ab. Wie in der Erddrucktheorie, so fällt auch in der Gewölbetheorie die Suche nach dem Gleichgewicht historisch-logisch ins Auge. Deshalb wurde das Kapitel *Vom Gewölbe zum Bogen* weiter ausgebaut. Dasselbe gilt für das Kapitel über die Herausbildung der Baustatik und Technischen Mechanik als erste technikwissenschaftliche Grundlagendisziplinen. Dort wird nicht nur erstmals eine Lehrbuchanalyse dieser beiden Wissenschaften im 19. und 20. Jahrhundert gegeben, sondern versucht, die wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Besonderheiten der Baustatik und Technischen Mechanik herauszuschälen. Damit ist auch ein Ausgangspunkt für das Kapitel *Perspektiven der Historischen Baustatik* benannt, der integraler Bestandteil meines Konzepts der Historischen Technikwissenschaft ist und in diesem Buch konkret entfaltet wird. Hier sei nur auf aktuelle Forschungen zur graphischen Statik verweisen, die ich unter dem Namen *Computer-Aided Graphic Statics* (CAGS) zusammenfasse. Eine erhebliche Erweiterung erfuhren auch die Kurzbiogra-

fien von Protagonisten der Baustatik und Strukturmechanik auf 243 sowie die Bibliografie.

Wohl die größte Freude bei der Erarbeitung des vorliegenden Buches bereitete die Unterstützung, die ich durch Freunde, Kolleginnen und Kollegen erfuhr. Bedanken möchte ich mich bei William Baker (Chicago), Ivan Baláz (Bratislava), Jennifer Beal (Chichester), Norbert Becker (Stuttgart), Antonio Becchi (Berlin), Alexandra R. Brown (Hoboken), José Calavera (Madrid), Christopher R. Calladine (Cambridge/UK), Kostas Chatzis (Paris), Mike Chrimes (London), Ilhan Citak (Lehigh), Zbigniew Cywiński (Gdańsk), René de Borst (Glasgow), Giovanni Di Pasquale (Florenz), Cengiz Dicleli (Konstanz), Werner Dirschmid (Ingolstadt), Albert Duda (Berlin), Holger Eggemann (Brühl), Bernard Espion (Brüssel), Jorun Fahle (Göteborg), Amy Flessert (Minneapolis), Hubert Flomenhoft (Palm Beach Gardens), Peter Groth (Pfullingen), Carl-Eric Hagentoft (Göteborg), Hans-Joachim Haubold (Darmstadt), Eva Haubold-Marguerre (Darmstadt), Torsten Hoffmeister (Berlin), Santiago Huerta (Madrid), Andreas Kahlow (Potsdam), Christiane Kaiser (Potsdam), Sándor Kaliszky (Budapest), Andreas Kirchner (Würzburg), Klaus Knothe (Berlin), Winfried B. Krätzig (Bochum), Eike Lehmann (Lübeck), Werner Lorenz (Cottbus/Berlin), Andreas Luetjen (Braunschweig), Stephan Luther (Chemnitz), René Maquoi (Lüttich), William J. Maher (Urbana), Gleb Mikhailov (Moskau), Juliane Mikoletzky (Wien), Klaus Nippert (Karlsruhe), John Ochsendorf (Cambridge/Mass.), Eberhard Pelke (Mainz), Christian Petersen (Ottobrunn), Ines Prokop (Berlin), Frank Purtak (Dresden), Ekkehard Ramm (Stuttgart), Patricia Radelet-de Grave (Louvain-la-Neuve), Anette Rühlmann (London), Jan Peter Schäfermeyer (Berlin), Lutz Schöne (Rosenheim), Sabine Schroyen (Düsseldorf), Luigi Sorrentino (Rom), Valery T. Troshchenko (Kiew), Stephanie Van de Voorde (Brüssel), Gernot Wekherlin (Berlin), Volker Wetz (Cottbus), Jutta Wiese (Dresden), Erwin Wodarczak (Vancouver) und Ine Wouters (Brüssel).

Für die die hohe Qualität in der technischen und gestalterischen Realisierung meiner Buchveröffentlichung danke ich Sophie Bleifuß (Gestaltung), Siegmar Hiller (Herstellungsbetreuung), Uta-Beate Mutz (Satz und Herstellung) und Peter Palm (Zeichnungen). Ohne den Rückhalt, den ich in meiner Familie gefunden habe, wäre dieses Buch nicht möglich gewesen. Meine liebe Frau und Lektorin Claudia Ozimek brachte das Buchprojekt im Verlag Ernst & Sohn auf den Weg und meine Kollegin Ute-Marlen Günther steuerte es sicher bis zu seiner erfolgreichen Vollendung. Schließlich danke ich all jenen Kolleginnen und Kollegen des Verlages Ernst & Sohn, die das Buchprojekt unterstützten und sich für die Verbreitung meines Buches engagieren.

Mögen Sie, liebe Leserin und lieber Leser, Erkenntnisse aus dem in diesem Buch ausgebreiteten Wissen gewinnen, die Ihnen nicht nur Nutzen stiften, sondern auch reine Freude am Wissen und Erkennen bereiten sollen.

Berlin, September 2015

Karl-Eugen Kurrer

Das vorliegende Buch resultiert aus meinem seit 25 Jahren sich entwickelnden Interesse an der Geschichte der Baustatik. War ich anfangs bestrebt, Sicherheit in der Aufdeckung und Entdeckung des logischen Aufbaus der Baustatik zu finden, so suchte ich später die historischen Quellen jener Wissenschaft zu erschließen. Allmählich entstand aus der Zusammenführung didaktischer, wissenschaftstheoretischer, technikkundenschafts-, bautechnik- und kulturhistorischer, ästhetischer, biographischer und bibliographischer Zugänge zur Geschichte der Baustatik ein Bild ihrer Entwicklung. Die Leserinnen und Leser seien zur aktiven Bildbetrachtung, Bilddeutung und Bildung eigener Bilder über die Baustatik eingeladen.

Auf dem Weg zur Erschließung dieser Zugänge begegnete ich zahlreichen Persönlichkeiten, denen ich meinen Dank für ihre Aufmerksamkeit, Aufgeschlossenheit und Anregungen aussprechen möchte, ohne sie alle namentlich nennen zu können. Beim Verfassen dieses Buches wurde ich beraten und mit Texten und Bildern in großzügiger Weise unterstützt von:

- Dr. Bill Addis, London (Kurzbiographien britischer Baustatiker),
- Dr. Antonio Becchi, Genua (allgemeine Unterstützung bei den Kurzbiographien und der Bibliographie),
- em. Prof. Dr. Zbigniew Cywiński, Gdańsk (Kurzbiographien polnischer Baustatiker),
- Prof. Dr. Ladislav Fryba, Prag (Kurzbiographien tschechoslowakischer Baustatiker),
- Prof. Dr. Santiago Huerta, Madrid (Kurzbiographie Saavedra, E.),
- Prof. Dr. René Maquoi, Lüttich (Kurzbiographien belgischer Baustatiker),
- Dr. Gleb Mikhailov, Moskau (Kurzbiographien russischer Baustatiker),
- Prof. Dr. Ekkehard Ramm, Stuttgart (Geleitwort),
- Prof. Dr. Enrico Straub, Berlin (Kurzbiographie seines Vaters Hans Straub),
- em. Prof. Dr. Minoru Yamada, Kyoto (Kurzbiographien japanischer Baustatiker).

In meinen Dank einschließen möchte ich Prof. Dr. Massimo Corradi, Genua, Mike Chrimes, London, Dr. Federico Foce, Genua, Prof. Dr. Mario Fontana, Zürich, Prof. Dr. Wolfgang Graße, Dresden, Prof. Dr. Werner Guggenberger, Graz und Prof. Dr. Patricia Radelet-de Grave, Louvain-la-Neuve, die mich mit Literaturquellen unterstützten.

Das Buch wäre ohne meine liebe Freundin Claudia Ozimek nicht zustande gekommen – sie zeichnet für die umsichtige Betreuung durch das Lektorat verantwortlich. Auch bei allen anderen Kolleginnen und Kollegen des Verlages Ernst & Sohn bedanke ich mich für ihre Hilfe zur Realisierung des vorliegenden Buches.

Den Leserinnen und Lesern wünsche ich eine gewinnende Lektüre.

Berlin, September 2002

Dr.-Ing. *Karl-Eugen Kurrer*

Inhaltsverzeichnis

V	Zum Geleit
IX	Vorwort zur 2. Auflage
XI	Vorwort zur 1. Auflage
2	1 Aufgaben und Ziele der Historiografie der Baustatik
4	1.1 Wissenschaftsinterne Aufgaben
8	1.2 Ingenieurpraktische Aufgaben
9	1.3 Didaktische Aufgaben
11	1.4 Kulturelle Aufgaben
12	1.5 Ziele
12	1.6 Einladung zur Suche nach dem Gleichgewicht von Tragwerken in Zeitreisen
14	2 Lernen aus der Geschichte: Zwölf Einführungsvorträge in die Baustatik
15	2.1 Was ist Baustatik?
15	2.1.1 Vorbereitungsperiode (1575–1825)
15	2.1.1.1 Orientierungsphase (1575–1700)
16	2.1.1.2 Applikationsphase (1700–1775)
17	2.1.1.3 Initialphase (1775–1825)
18	2.1.2 Disziplinbildungsperiode (1825–1900)
18	2.1.2.1 Konstituierungsphase (1825–1850)
19	2.1.2.2 Etablierungsphase (1850–1875)
20	2.1.2.3 Vollendungsphase (1875–1900)
21	2.1.3 Konsolidierungsperiode (1900–1950)
22	2.1.3.1 Akkumulationsphase (1900–1925)
23	2.1.3.2 Inventionsphase (1925–1950)
24	2.1.4 Integrationsperiode (1950 bis heute)
24	2.1.4.1 Innovationsphase (1950–1975)
25	2.1.4.2 Diffusionsphase (1975 bis heute)
26	2.2 Vom Hebel zum Fachwerk
27	2.2.1 Hebelgesetz nach Archimedes
27	2.2.2 Prinzip der virtuellen Verschiebungen
28	2.2.3 Allgemeiner Arbeitssatz
28	2.2.4 Prinzip der virtuellen Kräfte
29	2.2.5 Parallelogramm der Kräfte
30	2.2.6 Von Newton zu Lagrange
31	2.2.7 Das Kräftepaar
31	2.2.8 Kinematische oder geometrische Richtung der Statik?
32	2.2.9 Labil oder stabil, bestimmt oder unbestimmt?
33	2.2.10 Statische Synthesen

36	2.2.11	Schwedlers Dreigelenkrahmen
38	2.3	Die Entwicklung der höheren technischen Bildung
38	2.3.1	Die Fach- und Militärschulen des Ancien Régimes
39	2.3.2	Wissenschaft und Aufklärung
40	2.3.3	Wissenschaft und Erziehung in der Französischen Revolution (1789–1794)
41	2.3.4	Monges Lehrplan für die <i>École Polytechnique</i>
42	2.3.5	Die Nachläufer der <i>École Polytechnique</i> in Österreich, Deutschland und Russland
46	2.3.6	Ingenieurbildung in den Vereinigten Staaten
52	2.4	Eine Studie über Erddruck auf Stützmauern
54	2.4.1	Erddruckermittlung nach Culmann
55	2.4.2	Erddruckermittlung nach Poncelet
56	2.4.3	Spannungs- und Standsicherheitsnachweise
58	2.5	Einblicke in den Brückenbau und die Baustatik des 19. Jahrhunderts
60	2.5.1	Hängebrücken
61	2.5.1.1	Österreich
62	2.5.1.2	Böhmen und Mähren
62	2.5.1.3	Deutschland
63	2.5.1.4	Vereinigte Staaten
65	2.5.2	Holzbrücken
67	2.5.3	Mischsysteme
69	2.5.4	Die Göltzschtal- und die Elstertalbrücke (1845–1851)
71	2.5.5	Die Britannia-Brücke (1846–1850)
74	2.5.6	Die erste Dirschauer Weichselbrücke (1850–1857)
76	2.5.7	Der Garabit-Viadukt (1880–1884)
80	2.5.8	Baustatische Brückentheorien
80	2.5.8.1	Reichenbachs Bogentheorie
82	2.5.8.2	Youngs Gewölbetheorie
85	2.5.8.3	Naviers Theorie der Hängebrücken
86	2.5.8.4	Naviers <i>Résumé des Leçons</i>
87	2.5.8.5	Die Fachwerktheorie Culmanns und Schwedlers
88	2.5.8.6	Balkentheorie und Spannungsnachweis
89	2.6	Industrialisierung des Stahlbrückenbaus von 1850 bis 1900
89	2.6.1	Deutschland und Großbritannien
92	2.6.2	Frankreich
93	2.6.3	Vereinigte Staaten
97	2.7	Einflusslinien
97	2.7.1	Eisenbahnzüge und Brückenbau
100	2.7.2	Herausbildung des Begriffs der Einflusslinie
102	2.8	Der elastisch gebettete Balken
103	2.8.1	Die Winklersche Bettung

104	2.8.2	Die Theorie des Eisenbahnoberbaus
106	2.8.3	Von der Eisenbahnoberbautheorie zur Theorie des elastisch gebetteten Balkens
107	2.8.4	Erweiterungen durch die Geotechnik
109	2.9	Deformationsverfahren
109	2.9.1	Analyse eines Dreieckrahmens
110	2.9.1.1	Stabendmomente
111	2.9.1.2	Zwangskräfte
113	2.9.1.3	Superposition heißt, die Zustandsgrößen linear mit der Lösung zu kombinieren
113	2.9.2	Deformationsverfahren und Fachwerktheorie bei rahmenartigen Systemen im Vergleich
114	2.10	Theorie II. Ordnung
114	2.10.1	Der Beitrag Josef Melans
115	2.10.2	Hängebrücken werden steifer
116	2.10.3	Bogenbrücken werden weicher
116	2.10.4	Die Differentialgleichung des querbelasteten Druck- und Zugstabes
117	2.10.5	Die Integration der Theorie II. Ordnung in das Deformationsverfahren
118	2.10.6	Wozu dienen fiktive Kräfte?
121	2.11	Traglastverfahren
122	2.11.1	Erste Ansätze
124	2.11.2	Grundlegung des Traglastverfahrens
124	2.11.2.1	Josef Fritsche
125	2.11.2.2	Karl Girkmann
128	2.11.2.3	Andere Autoren
128	2.11.3	Das Paradoxon des Fließgelenkverfahrens
131	2.11.4	Durchsetzung des Traglastverfahrens
131	2.11.4.1	Sir John Fleetwood Baker
132	2.11.4.2	Exkurs: ein Rechenbeispiel
134	2.11.4.3	Die britisch-amerikanische Schule der Traglasttheorie
135	2.11.4.4	Kontroverse um das Traglastverfahren
138	2.12	Baugesetz – statisches Gesetz – Bildungsgesetz
138	2.12.1	Die fünf platonischen Körper
139	2.12.2	Anmut und Gesetz
142	2.12.2.1	Baugesetz
142	2.12.2.2	Statisches Gesetz
143	2.12.2.3	Bildungsgesetz
144	3	Die ersten technikwissenschaftlichen Grundlagendisziplinen: Baustatik und Technische Mechanik
145	3.1	Was ist Technikwissenschaft?
146	3.1.1	Erste Annäherung
148	3.1.2	Nobilitierung der Technikwissenschaften durch den philosophischen Diskurs
150	3.1.2.1	Der Beitrag der Systemtheorie
152	3.1.2.2	Der Beitrag des Marxismus
154	3.1.2.3	Die Theorie der Technikwissenschaften

157	3.1.3	Technik und Technikwissenschaften
162	3.2	Die Aufhebung des Enzyklopädischen im System der klassischen Technikwissenschaften: fünf Fallbeispiele aus der Technischen Mechanik und der Baustatik
163	3.2.1	Zur Aktualität des Enzyklopädischen
165	3.2.2	Franz Joseph Ritter von Gerstners Beitrag zur Mathematisierung der Bauwissenschaften
166	3.2.2.1	Gerstners Gegenstandsbestimmung der Technischen Mechanik
168	3.2.2.2	Festigkeit des Eisens
172	3.2.2.3	Theorie und Praxis des Hängebrückenbaus im <i>Handbuch der Mechanik</i>
174	3.2.3	Weisbachs Enzyklopädie der Technischen Mechanik
175	3.2.3.1	Das Lehrbuch
178	3.2.3.2	Die Erfindung des Handbuchs für Ingenieure
180	3.2.3.3	Die Zeitschrift
180	3.2.3.4	Die Festigkeitslehre in Weisbachs <i>Lehrbuch</i>
183	3.2.4	Rankines <i>Manuals</i> oder: die Harmonie zwischen Theorie und Praxis
183	3.2.4.1	Rankines <i>Manual of Applied Mechanics</i>
186	3.2.4.2	Rankines <i>Manual of Civil Engineering</i>
187	3.2.5	Föppls <i>Vorlesungen über Technische Mechanik</i>
188	3.2.5.1	Ursprung und Ziel der Mechanik
189	3.2.5.2	Aufbau der <i>Vorlesungen</i>
190	3.2.5.3	Die wichtigsten deutschsprachigen Lehrbücher der Technischen Mechanik
191	3.2.6	Das <i>Handbuch der Ingenieurwissenschaften</i> als Enzyklopädie der klassischen Bauingenieurwissenschaften
194	3.2.6.1	Eiserne Balkenbrücken
196	3.2.6.2	Eiserne Bogen- und Hängebrücken
198	4	Vom Gewölbe zum Bogen
201	4.1	Das Gewölbegleichnis
202	4.2	Das geometrische Denken in der Theorie gewölbter Brücken
202	4.2.1	Der Ponte S. Trinità in Florenz
205	4.2.1.1	Galilei und Guidobaldo del Monte
207	4.2.1.2	Hypothesen
208	4.2.2	Die Etablierung des neuen Denkens in der Brückenbaupraxis am Beispiel der Nürnberger Fleischbrücke
209	4.2.2.1	Entwürfe zum Bau der Fleischbrücke
210	4.2.2.2	Entwürfe und Überlegungen zum Lehrgerüst
211	4.2.2.3	Das Tragverhalten der Fleischbrücke
213	4.3	Vom Keil zum Gewölbe – oder: das Additionstheorem der Keiltheorie
214	4.3.1	Zwischen Mechanik und Architektur: die Gewölbetheorie an der <i>Académie Royale d'Architecture de Paris</i> (1687–1718)
215	4.3.2	La Hire und Bélidor
216	4.3.3	Epigonen
217	4.4	Von der Bruchbildanalyse in Gewölben zur Kantungstheorie
218	4.4.1	Baldi
220	4.4.2	Fabri
221	4.4.3	La Hire

222	4.4.4	Couplet
224	4.4.5	Brückenbau – noch immer Empirie
225	4.4.6	Coulombs Kantungstheorie
226	4.4.7	Monasterios <i>Nueva Teórica</i>
228	4.5	Die Stützlinientheorie
228	4.5.1	Präludium
231	4.5.2	Gerstner
233	4.5.3	Auf der Suche nach der wahren Stützlinie
235	4.6	Die Durchsetzung der Elastizitätstheorie
235	4.6.1	Der Dualismus von Gewölbe- und Bogentheorie bei Navier
236	4.6.2	Zwei Schritte vorwärts – ein Schritt zurück
238	4.6.3	Von Poncelet zu Winkler
242	4.6.4	Ein Rückfall
243	4.6.5	Das Gewölbe ist nichts, der Bogen ist alles: der Sieg der Theorie des elastischen Bogens über die Gewölbetheorie
244	4.6.5.1	Grandes Voûtes
247	4.6.5.2	Zweifel
248	4.6.5.3	Modellversuche
250	4.7	Die Traglasttheorie der Gewölbe
251	4.7.1	Von Rissen und der wahren Stützlinie im Gewölbe
253	4.7.2	Versagen von Gewölben
254	4.7.3	Die Grenzlastsätze der Traglasttheorie für Gewölbe
254	4.7.4	Die Sicherheit von Gewölben
256	4.7.5	Analyse von gewölbten Brücken
260	4.7.6	Erweiterungen der Gewölbetheorie von Heyman
262	4.8	Finite-Elemente-Methode
266	4.9	Die Untersuchungen von Holzer
267	4.10	Zum epistemologischen Status der Gewölbetheorien
268	4.10.1	Keiltheorie
269	4.10.2	Bruchbildanalyse und Kantungstheorie
270	4.10.3	Stützlinientheorie und Elastizitätstheorie der Gewölbe
271	4.10.4	Traglasttheorie der Gewölbe als Gegenstand der Historischen Baustatik
272	4.10.5	Finite-Elemente-Analyse von Gewölben
274	5	Geschichte der Erddrucktheorie
276	5.1	Stützmauern im Festungsbau
279	5.2	Erddrucktheorie als Gegenstand des Militäringenieurwesens
280	5.2.1	Am Anfang war die schiefe Ebene
281	5.2.1.1	Bullet
282	5.2.1.2	Gautier
282	5.2.1.3	Couplet
283	5.2.1.4	Weitere Ansätze
285	5.2.1.5	Reibung reduziert den Erddruck
287	5.2.2	Von der schiefen Ebene zur Keiltheorie
290	5.2.3	Charles Augustin Coulomb
292	5.2.3.1	Erscheinungsformen der Adhäsion
292	5.2.3.2	Bruchverhalten eines Mauerpfeilers

293	5.2.3.3	Der Übergang zur Erddrucktheorie
295	5.2.3.4	Der aktive Erddruck
297	5.2.3.5	Der passive Erddruck
297	5.2.3.6	Bemessung
298	5.2.4	Ein Magazin für Ingenieuroffiziere
300	5.3	Erweiterungen der Coulombschen Erddrucktheorie
300	5.3.1	Die Trigonometrisierung der Erddrucktheorie
300	5.3.1.1	Prony
301	5.3.1.2	Mayniel
302	5.3.1.3	Français, Audoy und Navier
304	5.3.1.4	Martony de Köszezh
306	5.3.2	Der geometrische Weg
307	5.3.2.1	Jean-Victor Poncelet
308	5.3.2.2	Hermann Schefflers Kritik an Poncelet
309	5.3.2.3	Karl Culmann
311	5.3.2.4	Georg Rebhann
313	5.3.2.5	Treibende Widersprüche
315	5.4	Der Beitrag der Kontinuumsmechanik
316	5.4.1	Das hydrostatische Erddruckmodell
317	5.4.2	Die neue Theorie des Erddrucks
319	5.4.2.1	Carl Holtzmann
320	5.4.2.2	Der Geniestreich Rankines
321	5.4.2.3	Emil Winkler
323	5.4.2.4	Otto Mohr
325	5.5	Die Erddrucktheorie von 1875 bis 1900
326	5.5.1	Coulomb oder Rankine?
327	5.5.2	Erddrucktheorie als Gewölbetheorie
328	5.5.3	Erddrucktheorie à la française
332	5.5.4	Kötters mathematische Erddrucktheorie
335	5.6	Experimentelle Erddruckforschung
335	5.6.1	Vorläufer der experimentellen Erddruckforschung
335	5.6.1.1	E. Cramer
336	5.6.1.2	B. Baker
337	5.6.1.3	A. Donath und H. Engels
338	5.6.2	Eine Sternstunde der Baugrundforschung
339	5.6.3	Erddruckversuche an der Versuchsanstalt für Statik der Baukonstruktion der TH Berlin
342	5.6.4	Fehlerdiskussionen in der Endlosschleife
344	5.6.5	Die schwedische Schule des Erdbaues
347	5.6.6	Entstehung der Bodenmechanik
348	5.6.6.1	Drei Entwicklungslinien
349	5.6.6.2	Die disziplinäre Konstruktion der Bodenmechanik
349	5.6.6.3	Konturen der phänomenologischen Erddrucktheorie
352	5.7	Erddrucktheorie in der Disziplinbildungsperiode der Geotechnik
355	5.7.1	Terzaghi
356	5.7.2	Rendulic
356	5.7.3	Ohde

358	5.7.4	Irrungen und Wirrungen
359	5.7.5	Ein publizistischer Schnellschuss
360	5.7.6	Grundbau + Bodenmechanik = Geotechnik
360	5.7.6.1	Der Bauingenieur als Soldat
362	5.7.6.2	Komplementäres
364	5.8	Erddrucktheorie in der Konsolidierungsperiode der Geotechnik
364	5.8.1	Neue Subdisziplinen der Geotechnik
365	5.8.2	Erddruckbestimmung in der praktischen Baustatik
366	5.8.2.1	Die erweiterte Culmannsche E-Linie
367	5.8.2.2	Neue Erkenntnisse über den passiven Erddruck
369	5.9	Erddrucktheorie in der Integrationsperiode der Geotechnik
370	5.9.1	Computergestützte erdstatische Berechnungen
372	5.9.2	Geotechnische Kontinuumsmodelle
375	5.9.3	Von der Kunst des Schätzens
377	5.9.4	Die Geschichte der Geotechnik als Gegenstand der Bautechnikgeschichte
380	6	Die Anfänge der Baustatik
382	6.1	Was ist Festigkeitslehre?
385	6.2	Zum Entwicklungsstand der Statik und Festigkeitsbetrachtung in der Renaissance
391	6.3	Galileis <i>Discorsi</i>
392	6.3.1	Erster Tag
395	6.3.2	Zweiter Tag
401	6.4	Die Entwicklung der Festigkeitslehre bis 1750
408	6.5	Das Bauingenieurwesen im ausgehenden 18. Jahrhundert
410	6.5.1	Die Vollendung der Balkentheorie
412	6.5.2	Franz Joseph Ritter von Gerstner
416	6.5.3	Einleitung in die statische Baukunst
417	6.5.3.1	Gerstners Analyse und Synthese von Tragstrukturen
421	6.5.3.2	Methodisierung des Tragwerksentwurfs bei Gerstner
422	6.5.3.3	Die <i>Einleitung in die statische Baukunst</i> als Lehrbuch der Analysis
422	6.5.4	Vier Bemerkungen zur Bedeutung von Gerstners <i>Einleitung in die statische Baukunst</i> für die Baustatik
423	6.6	Die Herausbildung der Baustatik: Eytelwein und Navier
424	6.6.1	Navier
427	6.6.2	Eytelwein
429	6.6.3	Die Analyse des Durchlaufträgers bei Eytelwein und Navier
430	6.6.3.1	Der Durchlaufträger in Eytelweins <i>Statik fester Körper</i>
434	6.6.3.2	Der Durchlaufträger in Naviers <i>Résumé des Leçons</i>
437	6.7	Rezeption von Naviers Analyse des Durchlaufträgers
440	7	Die Disziplinbildungsperiode der Baustatik
442	7.1	Clapeyrons Beitrag zur Herausbildung der klassischen Technikwissenschaften
442	7.1.1	Les Polytechniciens: gefesselter revolutionärer Elan der Polytechniker in der nachrevolutionären Zeit
444	7.1.2	1820 bis 1831: Clapeyron und Lamé in St. Petersburg

447	7.1.3	Clapeyrons Konstruktion des energetischen Imperativs der klassischen Technikwissenschaften
449	7.1.4	Brückenbau und Dreimomentengleichung
452	7.2	Die Vollendung der Technischen Balkentheorie
455	7.3	Von der graphischen Statik zur Graphostatik
456	7.3.1	Die Begründung der graphischen Statik durch Culmann
458	7.3.2	Zwei graphische Integrationsmaschinen
459	7.3.3	Rankine, Maxwell, Cremona und Bow
461	7.3.4	Differenzen zwischen graphischer Statik und Graphostatik
463	7.3.5	Die Durchsetzung der Graphostatik
464	7.3.5.1	Graphostatische Untersuchung räumlicher Gewölbe
466	7.3.5.2	Graphostatik im Ingenieurbau
470	7.4	Die Vollendungsphase der Baustatik
470	7.4.1	Der Beitrag Winklers
473	7.4.1.1	Die elastizitätstheoretische Fundierung der Baustatik
476	7.4.1.2	Die Theorie des elastischen Bogens als Grundlage des Brückenbaus
481	7.4.2	Die Anfänge des Kraftgrößenverfahrens
481	7.4.2.1	Beiträge zur Theorie statisch unbestimmter Fachwerke
486	7.4.2.2	Von der Fachwerktheorie zur allgemeinen Theorie der Stabwerke
493	7.4.3	Das Tragwerk als kinematische Maschine
493	7.4.3.1	Das Fachwerk als Maschine
494	7.4.3.2	Die Theoretische Kinematik Reuleaux' und die Dresdener Schule der Kinematik
497	7.4.3.3	Kinematischer oder energetischer Imperativ in der Baustatik?
501	7.4.3.4	Der Pyrrhussieg des energetischen Imperativs in der Baustatik
501	7.5	Die Baustatik am Übergang von der Disziplinbildungsperiode zur Konsolidierungsperiode
501	7.5.1	Castigliano
505	7.5.2	Grundlegung der klassischen Baustatik
509	7.5.3	Der Grundlagenstreit der klassischen Baustatik als Wiederaufnahmeverfahren
509	7.5.3.1	Der Anlass
510	7.5.3.2	Der Streit der Stellvertreter
511	7.5.3.3	Der Streit um den Geltungsanspruch der Theoreme von Castigliano
517	7.5.4	Geltungsbereich der Sätze von Castigliano
518	7.6	Lord Rayleighs Werk <i>The Theory of Sound</i> und Kirpichevs Grundlegung der klassischen Baustatik
519	7.6.1	Der Rayleigh-Koeffizient und der Ritz-Koeffizient
521	7.6.2	Kirpichevs kongeniale Adaption
524	7.7	Die Berliner Schule der Baustatik
524	7.7.1	Zum Begriff der wissenschaftlichen Schule
525	7.7.2	Der Vollender der klassischen Baustatik: Heinrich Müller-Breslau
528	7.7.3	Die klassische Baustatik bemächtigt sich des Konstruierens im Ingenieurbau
531	7.7.4	Die Schüler Müller-Breslaus
533	7.7.4.1	August Hertwig
535	7.7.4.2	Die Nachfolger August Hertwigs

540	8	Vom Eisenbau zum modernen Stahlbau
542	8.1	Die Torsionstheorie im Eisenbau und in der Baustatik von 1850 bis 1900
542	8.1.1	Die Saint-Venantsche Torsionstheorie
547	8.1.2	Das Torsionsproblem in Weisbachs <i>Lehrbuch</i>
549	8.1.3	Die Torsionsversuche von Bach
552	8.1.4	Die Rezeption der Torsionstheorie durch die klassische Baustatik
556	8.2	Der Kranbau im Schnittpunkt von Maschinenbau, Elektrotechnik, Eisenbau und Baustatik
556	8.2.1	Rudolph Bredt – ein bekannter Unbekannter
557	8.2.2	Die Firma Ludwig Stuckenholz in Wetter a. d. Ruhr
558	8.2.2.1	Bredts Aufstieg zum Maestro des Kranbaus
562	8.2.2.2	Kran-Typen der Firma Ludwig Stuckenholz
568	8.2.3	Bredts wissenschaftlich-technische Veröffentlichungen
568	8.2.3.1	Prüfmaschine
569	8.2.3.2	Das Prinzip der Funktionstrennung im Kranbau
569	8.2.3.3	Kranhaken
569	8.2.3.4	Druckstäbe
570	8.2.3.5	Fundamentanker
570	8.2.3.6	Druckzylinder
571	8.2.3.7	Stark gekrümmte Stäbe
571	8.2.3.8	Elastizitätstheorie
571	8.2.3.9	Ingenieurpädagogik
573	8.2.3.10	Torsionstheorie
574	8.2.4	Die Maschinenbauindustrie bemächtigt sich der klassischen Baustatik
578	8.3	Die Torsionstheorie in der Konsolidierungsperiode der Baustatik (1900–1950)
578	8.3.1	Die Einführung eines technikwissenschaftlichen Begriffs: das Torsionsträgheitsmoment
580	8.3.2	Die Entdeckung des Schubmittelpunktes
581	8.3.2.1	Carl von Bach
582	8.3.2.2	Louis Potterat
582	8.3.2.3	Adolf Eggenschwyler
583	8.3.2.4	Robert Maillart
585	8.3.2.5	Nachhutgefechte in der Debatte um den Schubmittelpunkt
585	8.3.3	Die Torsionstheorie im Stahlbau von 1925 bis 1950
588	8.3.4	Resümee
588	8.4	Auf der Suche nach der wahren Knicktheorie im Stahlbau
588	8.4.1	Die Knickversuche des Deutschen Stahlbau-Verbandes (DStV)
590	8.4.1.1	Der Welt größte Versuchsmaschine
591	8.4.1.2	Die perfekte Knicktheorie auf Basis der Elastizitätstheorie
593	8.4.2	Die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft und die technisch-wissenschaftliche Gemeinschaftsarbeit im Stahlbau
593	8.4.2.1	Vereinheitlichung der Vorschriften des Stahlbaus
595	8.4.2.2	Gründung des Deutschen Ausschuß für Stahlbau (DASt)
597	8.4.3	Exkurs: die Olympischen Spiele des Konstruktiven Ingenieurbaus
599	8.4.4	Paradigmenwechsel in der Knicktheorie

600	8.4.5	Die Standardisierung der neuen Knicktheorie in der deutschen Stabilitätsnorm DIN 4114
602	8.5	Stahlbau und Stahlbauwissenschaft von 1925 bis 1975
603	8.5.1	Vom Stab- zum ebenen Flächentragwerk
604	8.5.1.1	Theorie der mittragenden Breite
606	8.5.1.2	Konstruktive Neuerungen im deutschen Brückenbau der 1930er-Jahre
609	8.5.1.3	Theorie des Trägerrostes
611	8.5.1.4	Die orthotrope Platte als Patent
613	8.5.1.5	Der Stahlbau zeichnet eine Anleihe beim Stahlbetonbau: die Hubersche Plattentheorie
616	8.5.1.6	Das Verfahren von Guyon-Massonnet
617	8.5.1.7	Theoriendynamik in der Stahlbauwissenschaft der 1950er- und 1960er-Jahre
618	8.5.2	Der Aufstieg des Stahlverbundbaus
619	8.5.2.1	Stahlverbundstützen
621	8.5.2.2	Stahlverbundträger
624	8.5.2.3	Verbundbrückenbau
627	8.5.3	Stahlleichtbau
632	8.5.4	Stahl und Glas gesellt sich gern
637	8.6	Exzentrische Bahnen – Verlust der Mitte
640	9	Die Stabstatik erobert die dritte Dimension: Das Raumfachwerk
641	9.1	Die Entstehung der Theorie des Raumfachwerks
644	9.1.1	Die Reichstagskuppel
645	9.1.2	Die Grundlegung der Theorie des Raumfachwerks durch August Föppl
649	9.1.3	Integration der Theorie des Raumfachwerks in die klassische Baustatik
653	9.2	Das Raumfachwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit
654	9.2.1	Alexander Graham Bell
655	9.2.2	Wladimir Grigorjewitsch Schuchow
655	9.2.3	Walther Bauersfeld und Franz Dischinger
656	9.2.4	Richard Buckminster Fuller
658	9.2.5	Max Mengerlinghausen
659	9.3	Dialektische Synthese von individueller Baugestaltung und serieller Fertigung
659	9.3.1	Die MERO-Bauweise und das Kompositionsgesetz für Raumfachwerke
661	9.3.2	Das Raumfachwerk und der Computer
664	10	Der Einfluss des Stahlbetonbaus auf die Baustatik
666	10.1	Das erste Bemessungsverfahren im Stahlbetonbau
666	10.1.1	Die Anfänge des Stahlbetonbaus
668	10.1.2	Vom deutschen Monier-Patent zur <i>Monier-Broschüre</i>
671	10.1.3	Die <i>Monier-Broschüre</i>
672	10.1.3.1	Die neuartige statisch-konstruktive Qualität des Systems Monier
673	10.1.3.2	Die Anwendungsgebiete des Systems Monier
675	10.1.3.3	Die technikwissenschaftliche Grundlegung des Systems Monier
679	10.2	Der Stahlbetonbau revolutioniert das Bauwesen

681	10.2.1	Das Schicksal des Systems Monier
682	10.2.2	Das Ende der Systemzeit: Stahl + Beton = Stahlbeton
683	10.2.2.1	Der Napoleon des Stahlbetonbaus: François Hennebique
686	10.2.2.2	Der Stammvater des Rationalismus im Stahlbetonbau: Paul Christophe
691	10.2.2.3	Die Vollendung der Triade
696	10.3	Baustatik und Stahlbetonbau
697	10.3.1	Neuartige Tragwerke des Stahlbetonbaus
697	10.3.1.1	Emanzipation des Stahlbetonbaus vom Stahlbau: Rahmentragwerke
700	10.3.1.2	Erste Schritte des Stahlbetonbaus in die zweite Dimension: Plattentragwerke
713	10.3.1.3	Die erste Synthese
715	10.3.2	Statisch-konstruktive Selbstfindung des Stahlbetonbaus
715	10.3.2.1	Scheiben und Faltwerke
718	10.3.2.2	Stahlbetonschalen
753	10.3.2.3	Die zweite Synthese
755	10.3.2.4	Von der Kraft des Kalküls
757	10.4	Der Spannbetonbau: <i>Une révolution dans l'art de bâtir</i> (Freyssinet)
759	10.4.1	Leonhardts <i>Spannbeton für die Praxis</i>
762	10.4.2	Die erste Norm im Spannbetonbau
763	10.4.3	Die Spannbetonvorschriften in der DDR
764	10.4.4	Der unaufhaltsame Aufstieg des Spannbetonbaus im Spiegel der Zeitschrift <i>Beton- und Stahlbetonbau</i>
766	10.5	Es ist vollbracht: Paradigmenwechsel in der Bemessung von Stahlbetonbauteilen auch in der Bundesrepublik Deutschland
768	10.6	Sichtbarmachung des Unsichtbaren: Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau mit Stabwerkmodellen
768	10.6.1	Das Fachwerkmodell von François Hennebique
769	10.6.2	Das Fachwerkmodell von Emil Mörsch
771	10.6.3	Die Kraft der Anschauung: Spannungsbilder von ebenen Flächen-tragwerken
773	10.6.4	Das Konzept der Stabwerkmodelle: Schritte zum ganzheitlichen Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau
776	11	Die Konsolidierungsperiode der Baustatik
777	11.1	Das Verhältnis von Text, Bild und Symbol in der Baustatik
779	11.1.1	Die historischen Stufen der Idee der Formalisierung
786	11.1.2	Der Statiker – ein Symbolarbeiter?
787	11.2	Zur Entwicklung des Deformationsverfahrens
788	11.2.1	Der Beitrag der mathematischen Elastizitätstheorie
789	11.2.1.1	Elimination der Spannungen oder der Verschiebungen – das ist hier die Frage
790	11.2.1.2	Ein Element aus der idealen Objektwelt der mathematischen Elastizitätstheorie: das elastische Stabsystem
791	11.2.2	Vom Gelenkfachwerk zum Fachwerk mit biegesteifen Knoten
792	11.2.2.1	Ein Element aus der realen Objektwelt des Ingenieurs: das Eisenfachwerk mit genieteten Knoten
793	11.2.2.2	Zur Theorie der Nebenspannungen

796	11.2.3	Vom Fachwerk zum Rahmentragwerk
798	11.2.4	Die Emanzipation des Deformationsverfahrens von der Fachwerktheorie
799	11.2.4.1	Axel Bendixsen
800	11.2.4.2	George Alfred Maney
801	11.2.4.3	Willy Gehler
801	11.2.4.4	Asger Ostenfeld
802	11.2.4.5	Ludwig Mann
803	11.2.5	Das Deformationsverfahren in der Inventionsphase der Baustatik
804	11.3	Die Rationalisierungsbewegung in der Baustatik
805	11.3.1	Der operative Symbolgebrauch in der Baustatik
808	11.3.2	Rationalisierung des statisch unbestimmten Rechnens
809	11.3.2.1	Orthogonalisierungsverfahren
809	11.3.2.2	Spezielle Verfahren aus der Theorie der linearen Gleichungssysteme
810	11.3.2.3	Baustatische Iterationsverfahren
814	11.3.3	Der duale Bau der Baustatik
816	11.4	Konrad Zuse und die Automatisierung des statischen Rechnens
817	11.4.1	Schematisierung des statisch unbestimmten Rechnens
818	11.4.1.1	Schematisierter Rechengang
821	11.4.1.2	Erster Schritt zum Rechenplan
824	11.4.2	Die Rechenmaschine des Ingenieurs
826	11.5	Der Matrizenkalkül
826	11.5.1	Der Matrizenkalkül in der Mathematik und theoretischen Physik
827	11.5.2	Tensor- und Matrizenalgebra in den technikkwissenschaftlichen Grundlagendisziplinen
830	11.5.3	Zur Integration des Matrizenkalküls in die Ingenieurmathematik
833	11.5.4	Ein baustatisches Matrizenverfahren: das Übertragungsverfahren
836	12	Herausbildung und Etablierung der Computerstatik
837	12.1	<i>The Computer shapes the theory</i> (Argyris): Die historischen Wurzeln der Finite-Elemente-Methode
840	12.1.1	Stabwerkmodelle für elastische Kontinua
840	12.1.1.1	Das räumliche Fachwerkmodell von Kirsch
841	12.1.1.2	Fachwerkmodelle für elastische Scheiben
843	12.1.1.3	Die Entstehung der Gitterrostmethode
845	12.1.1.4	Erste computergestützte Strukturanalysen in der Fahrzeugindustrie
849	12.1.2	Modularisieren und Elementieren von Flugzeugstrukturen
849	12.1.2.1	Vom kastenförmigen Raumfachwerkträger zum Schubfeldträger und Schubfeldschema
856	12.1.2.2	Hochgeschwindigkeits-Aerodynamik, Elementierung des Schubfeldträgers und Matrizenrechnung
860	12.2	Die matrizenalgebraische Reformulierung der Strukturmechanik
860	12.2.1	Die Grundlegung der modernen Strukturmechanik
864	12.2.2	Die ersten Gehversuche der Computerstatik in Europa
864	12.2.2.1	Schweiz
865	12.2.2.2	Großbritannien
867	12.2.2.3	Bundesrepublik Deutschland

871	12.3	Die FEM – eine allgemeine Technologie technikwissenschaftlicher Theoriebildung
871	12.3.1	Zur klassischen Veröffentlichung einer nichtklassischen Methode
875	12.3.2	Von der heuristischen Potenz der FEM: die direkte Steifigkeitsmethode
878	12.4	Die Grundlegung der FEM durch Variationsprinzipien
879	12.4.1	Das Variationsprinzip von Dirichlet und Green
879	12.4.1.1	Ein einfaches Beispiel: der längsbelastete elastische Dehnstab
881	12.4.1.2	Die Göttinger Schule um Felix Klein
882	12.4.2	Die erste Stufe der Synthese: das kanonische Variationsprinzip von Hellinger und Prange
883	12.4.2.1	Pranges Habilitationsschrift
886	12.4.2.2	Im Orkus des Vergessens
887	12.4.2.3	Erste Schritte des Erinnerns
887	12.4.2.4	Eric Reissners Beitrag
889	12.4.3	Die zweite Stufe der Synthese: das Variationsprinzip von Fraeiji de Veubeke, Hu und Washizu
892	12.4.4	Variationsformulierung der FEM
895	12.4.5	Ein folgenschwerer Symmetriebruch
897	12.5	Computational Mechanics
900	13	Dreizehn wissenschaftliche Kontroversen in der Mechanik und Baustatik
901	13.1	Die wissenschaftliche Kontroverse
901	13.2	Dreizehn Streitfälle
901	13.2.1	Galileis <i>Dialogo</i>
902	13.2.2	Galileis <i>Discorsi</i>
903	13.2.3	Der philosophische Streit um das wahre Kraftmaß
904	13.2.4	Der Streit um das Prinzip der kleinsten Aktion
905	13.2.5	Die Peterskuppel im Streit der Theoretiker und Praktiker
907	13.2.6	Diskontinuum oder Kontinuum?
908	13.2.7	Graphische Statik vs. Graphostatik oder: die Verteidigung der reinen Lehre
909	13.2.8	Eine Feindschaft schafft zwei Schulen: Mohr gegen Müller-Breslau
910	13.2.9	Der Stellungskrieg
912	13.2.10	Bis dass der Tod euch scheidet: Fillunger gegen Terzaghi
913	13.2.11	»Im Prinzip ja ... «: der Streit um die Prinzipien
915	13.2.12	Elastisch oder plastisch – das ist hier die Frage
916	13.2.13	Vom Bestand des Klassischen in der Erddrucktheorie
917	13.3	Resümee
918	14	Perspektiven der Historischen Baustatik
920	14.1	Baustatik und Ästhetik
920	14.1.1	Das Schisma der Baukunst
921	14.1.2	Schönheit und Nutzen in der Baukunst – eine Utopie?
925	14.1.3	Alfred Gotthold Meyers <i>Eisenbauten. Ihre Geschichte und Ästhetik</i>
928	14.1.4	Das Ästhetische in der Dialektik von Bauen und Rechnen

933	14.2	Historische Technikwissenschaft – Historische Baustatik
934	14.2.1	Saint-Venants Historische Elastizitätstheorie
935	14.2.2	Historische Gewölbetheorie
936	14.2.3	Historisch-genetische Statiklehre
937	14.2.3.1	Historisch-logische Längsschnittanalyse
938	14.2.3.2	Historisch-logische Querschnittanalyse
938	14.2.3.3	Historisch-logischer Vergleich
938	14.2.3.4	Inhalte, Ziele, Mittel und Charakteristik der historisch-genetischen Statiklehre
938	14.2.4	Computergestützte Graphostatik
944	15	Kurzbiografien von 243 Protagonisten der Baustatik
1062		Bibliografie
1147		Personenregister
1157		Sachregister

Der heutige Tag ist ein Resultat des gestrigen.
Was dieser gewollt hat, müssen wir erforschen,
wenn wir zu wissen wünschen, was jener will.

Heinrich Heine, Französische Zustände (1833, S. 143)



Kapitel 1

Aufgaben und Ziele der Historiografie der Baustatik

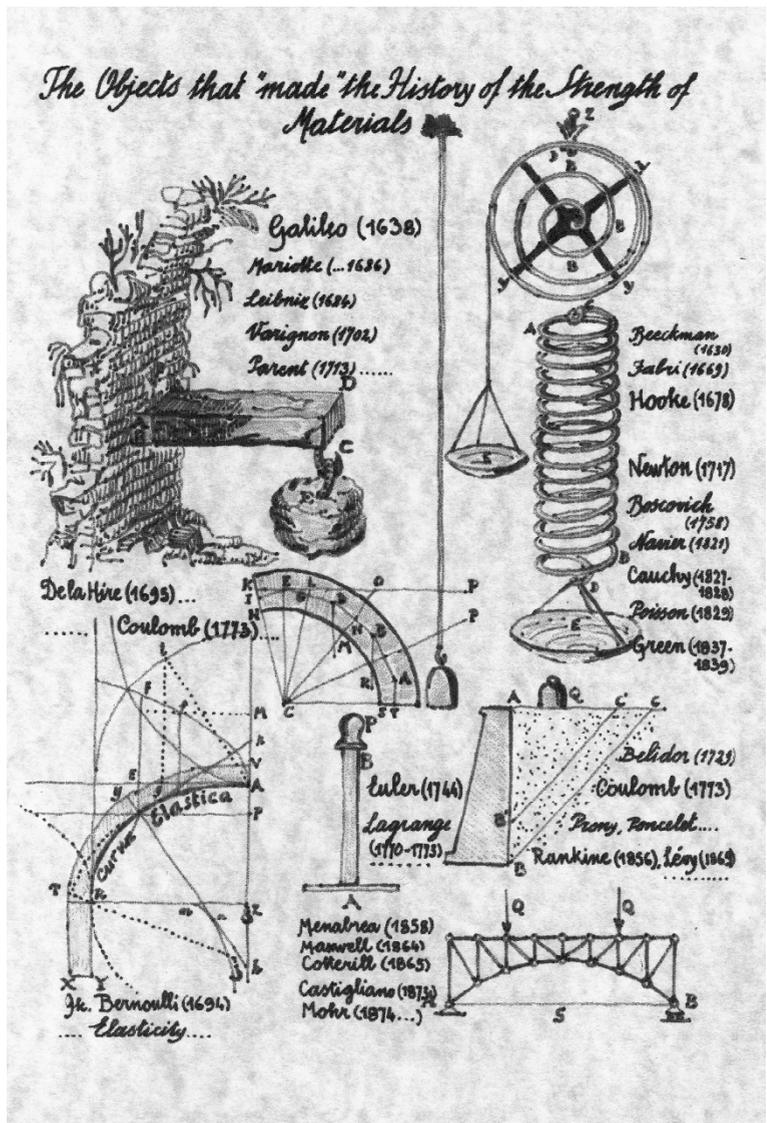


BILD 1-1
Zeichnungen von Edoardo Benvenuto