

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Reihenherausgeber	xxv
Geleitwort	xxvii
Vorwort zur 3. deutschen Auflage	xxxi
Über die Reihe	xxxv
Über die Reihenherausgeber	xxxvii
Über den Autor	xxxix
1	Aufgaben und Ziele der Historiografie der Baustatik 1
1.1	Wissenschaftsinterne Aufgaben 3
1.2	Ingenieurpraktische Aufgaben 9
1.3	Didaktische Aufgaben 12
1.4	Kulturelle Aufgaben 14
1.5	Ziele 15
1.6	Einladung zur Suche nach dem Gleichgewicht von Tragwerken auf Zeitreisen 15
2	Lernen aus der Geschichte: Zwölf Einführungsvorträge in die Baustatik 17
2.1	Was ist Baustatik? 18
2.1.1	Vorbereitungsperiode (1575–1825) 18
2.1.1.1	Orientierungsphase (1575–1700) 18
2.1.1.2	Applikationsphase (1700–1775) 20
2.1.1.3	Initialphase (1775–1825) 21
2.1.2	Disziplinbildungsperiode (1825–1900) 22
2.1.2.1	Konstituierungsphase (1825–1850) 22
2.1.2.2	Etablierungsphase (1850–1875) 24
2.1.2.3	Vollendungsphase (1875–1900) 25
2.1.3	Konsolidierungsperiode (1900–1950) 26
2.1.3.1	Akkumulationsphase (1900–1925) 27
2.1.3.2	Inventionsphase (1925–1950) 28
2.1.4	Integrationsperiode (1950 bis heute) 29
2.1.4.1	Innovationsphase (1950–1975) 30
2.1.4.2	Diffusionsphase (1975 bis heute) 31

2.2	Vom Hebel zum Fachwerk	32
2.2.1	Hebelgesetz nach Archimedes	33
2.2.2	Prinzip der virtuellen Verschiebungen (PdvV)	34
2.2.3	Allgemeiner Arbeitssatz	35
2.2.4	Prinzip der virtuellen Kräfte	35
2.2.5	Parallelogramm der Kräfte	36
2.2.6	Von Newton zu Lagrange	37
2.2.7	Das Kräftepaar	39
2.2.8	Kinematische oder geometrische Richtung der Statik?	40
2.2.9	Labil oder stabil, bestimmt oder unbestimmt?	41
2.2.10	Statische Synthesen	42
2.2.11	Schwedlers Dreigelenkrahmen	45
2.3	Die Entwicklung der höheren technischen Bildung	47
2.3.1	Die Fach- und Militärschulen des Ancien Régimes	48
2.3.2	Wissenschaft und Aufklärung	49
2.3.3	Wissenschaft und Erziehung in der Französischen Revolution (1789–1794)	50
2.3.4	Monges Lehrplan für die École Polytechnique	51
2.3.5	Die Nachläufer der École Polytechnique in Österreich, Deutschland und Russland	52
2.3.6	Ingenieurbildung in den Vereinigten Staaten	56
2.4	Eine Studie über Erddruck auf Stützmauern	61
2.4.1	Erddruckermittlung nach Culmann	63
2.4.2	Erddruckermittlung nach Poncelet	65
2.4.3	Spannungs- und Standsicherheitsnachweise	65
2.5	Einblicke in den Brückenbau und die Baustatik des 19. Jahrhunderts	68
2.5.1	Hängebrücken	69
2.5.1.1	Österreich	70
2.5.1.2	Böhmen und Mähren	71
2.5.1.3	Deutschland	72
2.5.1.4	Vereinigte Staaten	73
2.5.2	Holzbrücken	74
2.5.3	Mischsysteme	77
2.5.4	Die Göltzschtal- und die Elstertalbrücke (1845–1851)	79
2.5.5	Die Britannia-Brücke (1846–1850)	81
2.5.6	Die erste Dirschauer Weichselbrücke (1850–1857)	86
2.5.7	Der Garabit-Viadukt (1880–1884)	88
2.5.8	Baustatische Brückentheorien	92
2.5.8.1	Reichenbachs Bogentheorie	93
2.5.8.2	Youngs Gewölbetheorie	94
2.5.8.3	Naviers Theorie der Hängebrücken	98
2.5.8.4	Naviers <i>Résumé des Leçons</i>	99
2.5.8.5	Die Fachwerktheorie Culmanns und Schwedlers	99
2.5.8.6	Balkentheorie und Spannungsnachweis	101

2.6	Industrialisierung des Stahlbrückenbaus von 1850 bis 1900	102
2.6.1	Deutschland und Großbritannien	102
2.6.2	Frankreich	104
2.6.3	Vereinigte Staaten	106
2.7	Einflusslinien	110
2.7.1	Eisenbahnzüge und Brückenbau	110
2.7.2	Herausbildung des Begriffs der Einflusslinie	113
2.8	Der elastisch gebettete Balken	116
2.8.1	Die Winklersche Bettung	117
2.8.2	Die Theorie des Eisenbahnoberbaus	118
2.8.3	Von der Eisenbahnoberbautheorie zur Theorie des elastisch gebetteten Balkens	120
2.8.4	Erweiterungen durch die Geotechnik	122
2.9	Deformationsverfahren	124
2.9.1	Analyse eines Dreieckrahmens	125
2.9.1.1	Stabendmomente	126
2.9.1.2	Zwangskräfte	127
2.9.1.3	Superposition heißt, die Zustandsgrößen linear mit der Lösung zu kombinieren	129
2.9.2	Deformationsverfahren und Fachwerktheorie bei rahmenartigen Systemen im Vergleich	130
2.10	Theorie II. Ordnung	130
2.10.1	Der Beitrag Josef Melans	131
2.10.2	Hängebrücken werden steifer	132
2.10.3	Bogenbrücken werden weicher	132
2.10.4	Die Differentialgleichung des querbelasteten Druck- und Zugstabes	133
2.10.5	Die Integration der Theorie II. Ordnung in das Deformationsverfahren	134
2.10.6	Wozu dienen fiktive Kräfte?	134
2.11	Traglastverfahren	140
2.11.1	Erste Ansätze	141
2.11.2	Grundlegung des Traglastverfahrens	143
2.11.2.1	Josef Fritsche	143
2.11.2.2	Karl Girkmann	144
2.11.2.3	Andere Autoren	147
2.11.3	Das Paradoxon des Fließgelenkverfahrens	148
2.11.4	Durchsetzung des Traglastverfahrens	150
2.11.4.1	Sir John Fleetwood Baker	151
2.11.4.2	Exkurs: Ein Rechenbeispiel	151
2.11.4.3	Berechnung von Verformungen	153
2.11.4.4	Die britisch-amerikanische Schule der Traglasttheorie	154
2.11.4.5	Kontroverse um das Traglastverfahren	156
2.12	Baugesetz – Statisches Gesetz – Bildungsgesetz	158
2.12.1	Die fünf platonischen Körper	158
2.12.2	Anmut und Gesetz	160

- 2.12.2.1 Baugesetz 163
- 2.12.2.2 Statisches Gesetz 163
- 2.12.2.3 Bildungsgesetz 164

3 Die ersten technikwissenschaftlichen Grundlagendisziplinen: Baustatik und Technische Mechanik 165

- 3.1 Was ist Technikwissenschaft? 166
 - 3.1.1 Erste Annäherung 167
 - 3.1.2 Nobilitierung der Technikwissenschaften durch den philosophischen Diskurs 169
 - 3.1.2.1 Der Beitrag der Systemtheorie 171
 - 3.1.2.2 Der Beitrag des Marxismus 174
 - 3.1.2.3 Die Theorie der Technikwissenschaften 175
 - 3.1.3 Technik und Technikwissenschaften 178
- 3.2 Die Aufhebung des Enzyklopädischen im System der klassischen Technikwissenschaften: fünf Fallbeispiele aus der Technischen Mechanik und der Baustatik 184
 - 3.2.1 Zur Aktualität des Enzyklopädischen 186
 - 3.2.2 Franz Joseph Ritter von Gerstners Beitrag zur Mathematisierung der Bauwissenschaften 188
 - 3.2.2.1 Gerstners Gegenstandsbestimmung der Technischen Mechanik 189
 - 3.2.2.2 Festigkeit des Eisens 191
 - 3.2.2.3 Theorie und Praxis des Hängebrückenbaus im *Handbuch der Mechanik* 195
 - 3.2.3 Weisbachs Enzyklopädie der Technischen Mechanik 198
 - 3.2.3.1 Das Lehrbuch 199
 - 3.2.3.2 Die Erfindung des Handbuchs für Ingenieure 201
 - 3.2.3.3 Die Zeitschrift 204
 - 3.2.3.4 Die Festigkeitslehre in Weisbachs *Lehrbuch* 205
 - 3.2.3.4.1 Biegefestigkeit 206
 - 3.2.3.4.2 Zugfestigkeit 207
 - 3.2.4 Rankines *Manuals* oder: Die Harmonie zwischen Theorie und Praxis 207
 - 3.2.4.1 Rankines *Manual of Applied Mechanics* 208
 - 3.2.4.2 Rankines *Manual of Civil Engineering* 211
 - 3.2.5 Föppls *Vorlesungen über Technische Mechanik* 212
 - 3.2.5.1 Ursprung und Ziel der Mechanik 213
 - 3.2.5.2 Aufbau der *Vorlesungen* 214
 - 3.2.5.3 Die wichtigsten deutschsprachigen Lehrbücher der Technischen Mechanik 215
 - 3.2.6 Das *Handbuch der Ingenieurwissenschaften* als Enzyklopädie der klassischen Bauingenieurwissenschaften 216
 - 3.2.6.1 Eiserne Balkenbrücken 219
 - 3.2.6.2 Eiserne Bogen- und Hängebrücken 221

4	Vom Gewölbe zum Bogen	223
4.1	Das Gewölbegeleichenis	226
4.2	Das geometrische Denken in der Theorie gewölbter Brücken	227
4.2.1	Der Ponte S. Trinità in Florenz	227
4.2.1.1	Galilei und Guidobaldo del Monte	230
4.2.1.2	Hypothesen	233
4.2.2	Die Etablierung des neuen Denkens in der Brückenbaupraxis am Beispiel der Nürnberger Fleischbrücke	233
4.2.2.1	Entwürfe zum Bau der Fleischbrücke	234
4.2.2.2	Entwürfe und Überlegungen zum Lehrgerüst	236
4.2.2.3	Das Tragverhalten der Fleischbrücke	237
4.3	Vom Keil zum Gewölbe – oder: Das Additionstheorem der Keiltheorie	239
4.3.1	Zwischen Mechanik und Architektur: Die Gewölbetheorie an der <i>Académie Royale d'Architecture de Paris</i> (1687–1718)	241
4.3.2	La Hire und Bélidor	242
4.3.3	Epigonen	244
4.4	Von der Bruchbildanalyse in Gewölben zur Kantungstheorie	244
4.4.1	Baldi	245
4.4.2	Fabri	248
4.4.3	La Hire	249
4.4.4	Couplet	250
4.4.5	Brückenbau – noch immer Empirie	252
4.4.6	Coulombs Kantungstheorie	254
4.4.7	Monasterios <i>Nueva Teórica</i>	255
4.5	Die Stützlinientheorie	257
4.5.1	Präludium	257
4.5.2	Gerstner	260
4.5.3	Auf der Suche nach der wahren Stützlinie	263
4.6	Die Durchsetzung der Elastizitätstheorie	266
4.6.1	Der Dualismus von Gewölbe- und Bogentheorie bei Navier	266
4.6.2	Zwei Schritte vorwärts – ein Schritt zurück	267
4.6.3	Von Poncelet zu Winkler	269
4.6.4	Ein Rückfall	274
4.6.5	Das Gewölbe ist nichts, der Bogen ist alles: der Sieg der Theorie des elastischen Bogens über die Gewölbetheorie	275
4.6.5.1	Grandes Voûtes	278
4.6.5.2	Zweifel	280
4.6.5.3	Modellversuche	280
4.7	Die Traglasttheorie der Gewölbe	282
4.7.1	Von Rissen und der wahren Stützlinie im Gewölbe	284
4.7.2	Versagen von Gewölben	285
4.7.3	Die Grenzlastsätze der Traglasttheorie für Gewölbe	286
4.7.4	Die Sicherheit von Gewölben	287

4.7.5	Analyse von gewölbten Brücken	289
4.7.6	Erweiterungen der Gewölbetheorie von Heyman	292
4.8	Finite-Elemente-Methode	294
4.9	Die Untersuchungen von Holzer	298
4.10	Zum epistemologischen Status der Gewölbetheorien	300
4.10.1	Keiltheorie	301
4.10.2	Bruchbildanalyse und Kantungstheorie	301
4.10.3	Stützlinientheorie und Elastizitätstheorie der Gewölbe	302
4.10.4	Traglasttheorie der Gewölbe als Gegenstand der Historischen Baustatik	303
4.10.5	Finite-Elemente-Analyse von Gewölben	304
5	Geschichte der Erddrucktheorie	307
5.1	Stützmauern im Festungsbau	310
5.2	Erddrucktheorie als Gegenstand des Militäringenieurwesens	313
5.2.1	Am Anfang war die schiefe Ebene	314
5.2.1.1	Bullet	315
5.2.1.2	Gautier	317
5.2.1.3	Couplet	317
5.2.1.4	Weitere Ansätze	319
5.2.1.5	Reibung reduziert den Erddruck	320
5.2.2	Von der schiefen Ebene zur Keiltheorie	323
5.2.3	Charles Augustin Coulomb	326
5.2.3.1	Erscheinungsformen der Adhäsion	328
5.2.3.2	Bruchverhalten von Mauerpfeiler	328
5.2.3.3	Der Übergang zur Erddrucktheorie	330
5.2.3.4	Der aktive Erddruck	331
5.2.3.4.1	Prisma des größten Druckes	333
5.2.3.4.2	Eine aktuelle Fehldeutung	333
5.2.3.4.3	Erddruck als Funktion des Gleitwinkels ϑ	334
5.2.3.4.4	Einfluss der Wandreibung	334
5.2.3.4.5	Eine aktuelle Verallgemeinerung	334
5.2.3.5	Der passive Erddruck	335
5.2.3.6	Bemessung	336
5.2.4	Ein Magazin für Ingenieuroffiziere	337
5.3	Erweiterungen der Coulombschen Erddrucktheorie	338
5.3.1	Die Trigonometrisierung der Erddrucktheorie	338
5.3.1.1	Prony	339
5.3.1.2	Mayniel	340
5.3.1.3	Français, Audoy und Navier	341
5.3.1.4	Martony de Kőszegh	344
5.3.2	Der geometrische Weg	346
5.3.2.1	Jean-Victor Poncelet	346
5.3.2.2	Hermann Schefflers Kritik an Poncelet	348

5.3.2.3	Karl Culmann	349
5.3.2.4	Georg Rebhann	351
5.3.2.5	Treibende Widersprüche	353
5.4	Der Beitrag der Kontinuumsmechanik	355
5.4.1	Das hydrostatische Erddruckmodell	356
5.4.2	Die neue Theorie des Erddrucks	358
5.4.2.1	Carl Holtzmann	360
5.4.2.2	Der Geniestreich Rankines	361
5.4.2.3	Emil Winkler	362
5.4.2.4	Otto Mohr	365
5.5	Die Erddrucktheorie von 1875 bis 1900	367
5.5.1	Coulomb oder Rankine?	368
5.5.2	Erddrucktheorie als Gewölbetheorie	369
5.5.3	Erddrucktheorie à la française	371
5.5.4	Kötters mathematische Erddrucktheorie	375
5.6	Experimentelle Erddruckforschung	378
5.6.1	Vorläufer der experimentellen Erddruckforschung	378
5.6.1.1	E. Cramer	378
5.6.1.2	B. Baker	379
5.6.1.3	A. Donath und H. Engels	380
5.6.2	Eine Sternstunde der Baugrundforschung	381
5.6.3	Erddruckversuche an der Versuchsanstalt für Statik der Baukonstruktion der TH Berlin	383
5.6.4	Fehlerdiskussionen in der Endlosschleife	386
5.6.5	Die schwedische Schule des Erdbaus	388
5.6.6	Entstehung der Bodenmechanik	390
5.6.6.1	Drei Entwicklungslinien	391
5.6.6.2	Die disziplinäre Konstruktion der Bodenmechanik	392
5.6.6.3	Konturen der phänomenologischen Erddrucktheorie	393
5.7	Erddrucktheorie in der Disziplinbildungsperiode der Geotechnik	396
5.7.1	Terzaghi	399
5.7.2	Rendulic	401
5.7.3	Ohde	401
5.7.4	Irrungen und Wirrungen	403
5.7.5	Ein publizistischer Schnellschuss	405
5.7.6	Grundbau + Bodenmechanik = Geotechnik	405
5.7.6.1	Der Bauingenieur als Soldat	406
5.7.6.2	Komplementäres	408
5.8	Erddrucktheorie in der Konsolidierungsperiode der Geotechnik	410
5.8.1	Neue Subdisziplinen der Geotechnik	410
5.8.2	Erddruckbestimmung in der praktischen Baustatik	411
5.8.2.1	Die erweiterte Culmannsche E-Linie	412
5.8.2.2	Neue Erkenntnisse über den passiven Erddruck	413

5.9	Erddrucktheorie in der Integrationsperiode der Geotechnik	415
5.9.1	Computergestützte erdstatische Berechnungen	417
5.9.2	Geotechnische Kontinuumsmodelle	418
5.9.3	Von der Kunst des Schätzens	422
5.9.4	Die Geschichte der Geotechnik als Gegenstand der Bautechnikgeschichte	423
6	Die Anfänge der Baustatik	427
6.1	Was ist Festigkeitslehre?	429
6.2	Zum Entwicklungsstand der Statik und Festigkeitsbetrachtung in der Renaissance	432
6.3	Galileis <i>Discorsi</i>	438
6.3.1	Erster Tag	439
6.3.2	Zweiter Tag	442
6.4	Die Entwicklung der Festigkeitslehre bis 1750	450
6.5	Das Bauingenieurwesen im ausgehenden 18. Jahrhundert	457
6.5.1	Die Vollendung der Balkentheorie	459
6.5.2	Franz Joseph Ritter von Gerstner	461
6.5.3	Einleitung in die statische Baukunst	466
6.5.3.1	Gerstners Analyse und Synthese von Tragstrukturen	467
6.5.3.1.1	Erste Entwicklungsstufe	467
6.5.3.1.2	Zweite Entwicklungsstufe	467
6.5.3.1.3	Dritte Entwicklungsstufe	469
6.5.3.1.4	Vierte Entwicklungsstufe	470
6.5.3.2	Methodisierung des Tragwerksentwurfes bei Gerstner	473
6.5.3.3	Die <i>Einleitung in die statische Baukunst</i> als Lehrbuch der Analysis	473
6.5.4	Vier Bemerkungen zur Bedeutung von Gerstners <i>Einleitung in die statische Baukunst</i> für die Baustatik	474
6.6	Die Herausbildung der Baustatik: Eytelwein und Navier	475
6.6.1	Navier	476
6.6.2	Eytelwein	479
6.6.3	Die Analyse des Durchlaufträgers bei Eytelwein und Navier	481
6.6.3.1	Der Durchlaufträger in Eytelweins <i>Statik fester Körper</i>	481
6.6.3.2	Der Durchlaufträger in Naviers <i>Résumé des Leçons</i>	486
6.7	Rezeption von Naviers Analyse des Durchlaufträgers	490
7	Die Disziplinbildungsperiode der Baustatik	493
7.1	Clapeyrons Beitrag zur Herausbildung der klassischen Technikwissenschaften	495
7.1.1	Les Polytechniciens: Gefesselter revolutionärer Elan der Polytechniker in der nachrevolutionären Zeit	495
7.1.2	1820 bis 1831: Clapeyron und Lamé in St. Petersburg	498
7.1.3	Clapeyrons Konstruktion des energetischen Imperativs der klassischen Technikwissenschaften	501

7.1.4	Brückenbau und Dreimomentengleichung	504
7.2	Die Vollendung der Technischen Balkentheorie	507
7.3	Von der graphischen Statik zur Graphostatik	511
7.3.1	Die Begründung der graphischen Statik durch Culmann	512
7.3.2	Zwei graphische Integrationsmaschinen	514
7.3.3	Rankine, Maxwell, Cremona und Bow	515
7.3.4	Differenzen zwischen graphischer Statik und Graphostatik	518
7.3.5	Die Durchsetzung der Graphostatik	519
7.3.5.1	Graphostatische Untersuchung räumlicher Gewölbe	521
7.3.5.2	Graphostatik im Ingenieurbau	524
7.4	Die Vollendungsphase der Baustatik	527
7.4.1	Der Beitrag Winklers	527
7.4.1.1	Die elastizitätstheoretische Fundierung der Baustatik	530
7.4.1.2	Die Theorie des elastischen Bogens als Grundlage des Brückenbaus	533
7.4.2	Die Anfänge des Kraftgrößenverfahrens	539
7.4.2.1	Beiträge zur Theorie statisch unbestimmter Fachwerke	539
7.4.2.1.1	Maxwell	540
7.4.2.1.2	Mohr	542
7.4.2.2	Von der Fachwerktheorie zur allgemeinen Theorie der Stabwerke	545
7.4.2.2.1	Die neueren Methoden der Festigkeitslehre	546
7.4.2.2.2	Einführung der δ -Symbolik	548
7.4.2.2.3	Das Kraftgrößenverfahren	550
7.4.2.2.4	Der Reduktionssatz	553
7.4.3	Das Tragwerk als kinematische Maschine	556
7.4.3.1	Das Fachwerk als Maschine	556
7.4.3.2	Die Theoretische Kinematik Reuleaux' und die Dresdener Schule der Kinematik	557
7.4.3.3	Kinematischer oder energetischer Imperativ in der Baustatik?	560
7.4.3.3.1	Satz von Land	561
7.4.3.3.2	Kinematische Theorie der statisch bestimmten Träger	562
7.4.3.4	Der Pyrrhussieg des energetischen Imperativs in der Baustatik	565
7.5	Die Baustatik am Übergang von der Disziplinbildungsperiode zur Konsolidierungsperiode	565
7.5.1	Castigliano	566
7.5.2	Grundlegung der klassischen Baustatik	570
7.5.3	Der Grundlagenstreit der klassischen Baustatik als Wiederaufnahmeverfahren	574
7.5.3.1	Der Anlass	574
7.5.3.2	Der Streit der Stellvertreter	575
7.5.3.3	Der Streit um den Geltungsanspruch der Theoreme von Castigliano	577
7.5.3.3.1	Weingarten gegen Föppl	577
7.5.3.3.2	Die Debatte zwischen Hertwig und Weingarten	581
7.5.3.3.3	Die Polemik zwischen Hertwig und Mehrrens	582
7.5.3.3.4	Die Polemik zwischen Weingarten und Weyrauch	582

- 7.5.4 Geltungsbereich der Sätze von Castigliano 584
- 7.6 Lord Rayleighs *The Theory of Sound* und Kirpichevs Grundlegung der klassischen Baustatik 585
 - 7.6.1 Der Rayleigh-Koeffizient und der Ritz-Koeffizient 586
 - 7.6.2 Kirpichevs kongeniale Adaption 589
 - 7.7 Die Berliner Schule der Baustatik 592
 - 7.7.1 Zum Begriff der wissenschaftlichen Schule 593
 - 7.7.2 Der Vollender der klassischen Baustatik: Heinrich Müller-Breslau 594
 - 7.7.3 Die klassische Baustatik bemächtigt sich des Konstruierens im Ingenieurbau 597
 - 7.7.4 Die Schüler Müller-Breslaus 601
 - 7.7.4.1 August Hertwig 603
 - 7.7.4.2 Die Nachfolger August Hertwigs 606
- 8 Vom Eisenbau zum modernen Stahlbau 611**
 - 8.1 Die Torsionstheorie im Eisenbau und in der Baustatik von 1850 bis 1900 614
 - 8.1.1 Die Saint-Venantsche Torsionstheorie 614
 - 8.1.2 Das Torsionsproblem in Weisbachs *Lehrbuch* 619
 - 8.1.3 Die Torsionsversuche von Bach 622
 - 8.1.4 Die Rezeption der Torsionstheorie durch die klassische Baustatik 625
 - 8.2 Der Kranbau im Schnittpunkt von Maschinenbau, Elektrotechnik, Eisenbau und Baustatik 629
 - 8.2.1 Rudolph Bredt – ein bekannter Unbekannter 629
 - 8.2.2 Die Firma Ludwig Stuckenholz in Wetter a. d. Ruhr 630
 - 8.2.2.1 Bredts Aufstieg zum Maestro des Kranbaus 631
 - 8.2.2.2 Kran-Typen der Firma Ludwig Stuckenholz 636
 - 8.2.2.2.1 Krane für Maschinenfabriken, Gießereien und Kesselschmieden 637
 - 8.2.2.2.2 Krane für Fabrikhöfe, Eisenbahnen und Steinbrüche 639
 - 8.2.2.2.3 Krane für Stahlwerke und Walzwerke 639
 - 8.2.2.2.4 Krane für Häfen 641
 - 8.2.2.2.5 Laufkrane in der Fabrikorganisation der Hochindustrialisierung 641
 - 8.2.3 Bredts wissenschaftlich-technische Veröffentlichungen 643
 - 8.2.3.1 Prüfmaschine 643
 - 8.2.3.2 Das Prinzip der Funktionstrennung im Kranbau 644
 - 8.2.3.3 Kranhaken 644
 - 8.2.3.4 Druckstäbe 645
 - 8.2.3.5 Fundamentanker 645
 - 8.2.3.6 Druckzylinder 645
 - 8.2.3.7 Stark gekrümmte Stäbe 647
 - 8.2.3.8 Elastizitätstheorie 647
 - 8.2.3.9 Ingenieurpädagogik 647
 - 8.2.3.10 Torsionstheorie 648
 - 8.2.4 Die Maschinenbauindustrie bemächtigt sich der klassischen Baustatik 650

- 8.3 Die Torsionstheorie in der Konsolidierungsperiode der Baustatik (1900–1950) 653
 - 8.3.1 Die Einführung eines technikkwissenschaftlichen Begriffs: Das Torsionsträgheitsmoment 654
 - 8.3.2 Die Entdeckung des Schubmittelpunktes 656
 - 8.3.2.1 Carl von Bach 658
 - 8.3.2.2 Louis Poterat 658
 - 8.3.2.3 Adolf Eggenschwyler 659
 - 8.3.2.4 Robert Maillart 659
 - 8.3.2.5 Nachhutgefechte in der Debatte um den Schubmittelpunkt 661
 - 8.3.3 Die Torsionstheorie im Stahlbau von 1925 bis 1950 662
 - 8.3.4 Resümee 664
- 8.4 Auf der Suche nach der wahren Knicktheorie im Stahlbau 665
 - 8.4.1 Die Knickversuche des Deutschen Stahlbau-Verbandes (DStV) 665
 - 8.4.1.1 Der Welt größte Versuchsmaschine 666
 - 8.4.1.2 Die perfekte Knicktheorie auf Basis der Elastizitätstheorie 668
 - 8.4.2 Die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft und die technisch-wissenschaftliche Gemeinschaftsarbeit im Stahlbau 670
 - 8.4.2.1 Vereinheitlichung der Vorschriften des Stahlbaus 670
 - 8.4.2.2 Gründung des Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DASt) 672
 - 8.4.3 Exkurs: Die Olympischen Spiele des Konstruktiven Ingenieurbaus 674
 - 8.4.4 Paradigmenwechsel in der Knicktheorie 676
 - 8.4.5 Die Standardisierung der neuen Knicktheorie in der deutschen Stabilitätsnorm DIN 4114 677
- 8.5 Stahlbau und Stahlbauwissenschaft von 1925 bis 1975 679
 - 8.5.1 Vom Stab- zum ebenen Flächentragwerk 681
 - 8.5.1.1 Theorie der mittragenden Breite 682
 - 8.5.1.2 Konstruktive Neuerungen im deutschen Brückenbau der 1930er-Jahre 684
 - 8.5.1.3 Theorie des Trägerrostes 687
 - 8.5.1.4 Die orthotrope Platte als Patent 689
 - 8.5.1.5 Der Stahlbau zeichnet eine Anleihe beim Stahlbetonbau: Die Hubersche Plattentheorie 691
 - 8.5.1.6 Das Verfahren von Guyon-Massonnet 694
 - 8.5.1.7 Theoriendynamik in der Stahlbauwissenschaft der 1950er- und 1960er-Jahre 695
 - 8.5.2 Der Aufstieg des Stahlverbundbaus 697
 - 8.5.2.1 Stahlverbundstützen 698
 - 8.5.2.2 Stahlverbundträger 700
 - 8.5.2.2.1 Der Kavaliertart in der Bundesrepublik Deutschland 701
 - 8.5.2.2.2 Wird die baustatische Theoriebildung den Verbundbau erheben helfen? 702
 - 8.5.2.2.3 Technologischer Durchbruch und Paradigmenwechsel in der Bemessung 703
 - 8.5.2.3 Verbundbrückenbau 704
 - 8.5.2.3.1 Schweiz 704

8.5.2.3.2	Nordamerika	705
8.5.2.3.3	Jugoslawien, Spanien, Frankreich und Deutschland	707
8.5.3	Stahlleichtbau	710
8.5.4	Stahl und Glas gesellt sich gern	715
8.6	Exzentrische Bahnen – Verlust der Mitte	720
9	Die Stabstatik erobert die dritte Dimension: das Raumfachwerk	723
9.1	Die Entstehung der Theorie des Raumfachwerks	724
9.1.1	Die Reichstagskuppel	727
9.1.2	Die Grundlegung der Theorie des Raumfachwerks durch August Föppl	729
9.1.3	Integration der Theorie des Raumfachwerks in die klassische Baustatik	732
9.2	Das Raumfachwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit	737
9.2.1	Alexander Graham Bell	738
9.2.2	Wladimir Grigorjewitsch Schuchow	739
9.2.3	Walther Bauersfeld und Franz Dischinger	740
9.2.4	Richard Buckminster Fuller	741
9.2.5	Max Mengerinhausen	743
9.3	Dialektische Synthese von individueller Baugestaltung und serieller Fertigung	745
9.3.1	Die MERO-Bauweise und das Kompositionsgesetz für Raumfachwerke	745
9.3.2	Das Raumfachwerk und der Computer	748
10	Der Einfluss des Stahlbetonbaus auf die Baustatik	751
10.1	Das erste Bemessungsverfahren im Stahlbetonbau	753
10.1.1	Die Anfänge des Stahlbetonbaus	753
10.1.2	Vom deutschen Monier-Patent zur <i>Monier-Broschüre</i>	755
10.1.3	Die <i>Monier-Broschüre</i>	759
10.1.3.1	Die neuartige statisch-konstruktive Qualität des Systems Monier	760
10.1.3.2	Die Anwendungsgebiete des Systems Monier	761
10.1.3.3	Die technikwissenschaftliche Grundlegung des Systems Monier	762
10.2	Der Stahlbetonbau revolutioniert das Bauwesen	766
10.2.1	Das Schicksal des Systems Monier	768
10.2.2	Das Ende der Systemzeit: Stahl + Beton = Stahlbeton	769
10.2.2.1	Der Napoleon des Stahlbetonbaus: François Hennebique	771
10.2.2.2	Der Stammvater des Rationalismus im Stahlbetonbau: Paul Christophe	773
10.2.2.3	Die Vollendung der Triade	779
10.3	Baustatik und Stahlbetonbau	785
10.3.1	Neuartige Tragwerke des Stahlbetonbaus	786
10.3.1.1	Emanzipation des Stahlbetonbaus vom Stahlbau: Rahmentragwerke	786
10.3.1.2	Erste Schritte des Stahlbetonbaus in die zweite Dimension: Plattentragwerke	791
10.3.1.2.1	Die Plattentheorie als Gegenstand der mathematischen Elastizitätstheorie	791
10.3.1.2.2	Einfache Ingenieurmodelle zur Bemessung von Platten	796

- 10.3.1.2.3 Innovationsdynamik im Stahlbetonbau: Die Pilzdecke 798
- 10.3.1.2.4 Die Plattentheorie als Gegenstand der Materialforschung und Baustatik 801
- 10.3.1.3 Die erste Synthese 806
- 10.3.2 Statisch-konstruktive Selbstfindung des Stahlbetonbaus 808
- 10.3.2.1 Scheiben und Faltwerke 809
- 10.3.2.2 Stahlbetonschalen 812
- 10.3.2.2.1 Im Anfang war die Theorie 812
- 10.3.2.2.2 Die Praxis behilft sich: von der Behälterformel zur Behältertheorie 816
- 10.3.2.2.3 Schwedler zum Ersten, zum Zweiten und zum Dritten! 820
- 10.3.2.2.4 Gebaute Theorie: die Membranschale der Klosterkirche in St. Blasien 823
- 10.3.2.2.5 Die Biegetheorie der Rotationsschale nimmt Gestalt an 824
- 10.3.2.2.6 Das System Zeiss-Dywidag – ein Markstein der industrieförmigen Wissenschaft im Stahlbetonbau 826
- 10.3.2.2.7 Franz Dischinger – Spiritus rector der baustatischen Schalentheorie 832
- 10.3.2.2.8 Die französischen Pioniere des Schalenbaus 834
- 10.3.2.2.9 Der Beitrag sowjetischer Ingenieure 840
- 10.3.2.2.10 Der Kühlturm als Rotationshyperboloid 844
- 10.3.2.3 Die zweite Synthese 851
- 10.3.2.4 Von der Kraft des Kalküls 853
- 10.4 Der Spannbetonbau: *Une révolution dans l'art de bâtir* (Freyssinet) 856
- 10.4.1 Leonhardts *Spannbeton für die Praxis* 857
- 10.4.2 Die erste Norm im Spannbetonbau 860
- 10.4.3 Die Spannbetonvorschriften in der DDR 861
- 10.4.4 Der unaufhaltsame Aufstieg des Spannbetonbaus im Spiegel der Zeitschrift *Beton- und Stahlbetonbau* 863
- 10.5 Es ist vollbracht: Paradigmenwechsel in der Bemessung von Stahlbetonbauteilen auch in der Bundesrepublik Deutschland 865
- 10.6 Sichtbarmachung des Unsichtbaren: Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau mit Stabwerkmodellen 866
- 10.6.1 Das Fachwerkmodell von François Hennebique 867
- 10.6.2 Das Fachwerkmodell von Emil Mörsch 868
- 10.6.3 Die Kraft der Anschauung: Spannungsbilder von ebenen Flächentragwerken 870
- 10.6.4 Das Konzept der Stabwerkmodelle: Schritte zum ganzheitlichen Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau 872
- 11 Die Konsolidierungsperiode der Baustatik 875**
- 11.1 Das Verhältnis von Text, Bild und Symbol in der Baustatik 877
- 11.1.1 Die historischen Stufen der Idee der Formalisierung 878
- 11.1.1.1 Erstes Beispiel: Etablierungsphase der Baustatik (1850–1875) 879
- 11.1.1.2 Zweites Beispiel: Graphische Statik und Graphostatik zwischen Etablierungsphase und Vollendungsphase der Baustatik 881
- 11.1.1.3 Drittes Beispiel: Vollendungsphase der Baustatik (1875–1900) 882
- 11.1.1.4 Viertes Beispiel: Baustatik in der Konsolidierungsperiode (1900–1950) 883

- 11.1.2 Tragwerksplanung – bloße Symbolarbeit oder struktureles
Komponieren? 886
- 11.2 Zur Entwicklung des Deformationsverfahrens 886
- 11.2.1 Der Beitrag der mathematischen Elastizitätstheorie 887
- 11.2.1.1 Elimination der Spannungen oder der Verschiebungen – das ist hier die
Frage 888
- 11.2.1.2 Ein Element aus der idealen Objektwelt der mathematischen
Elastizitätstheorie: das elastische Stabsystem 889
- 11.2.2 Vom Gelenkfachwerk zum Fachwerk mit biegesteifen Knoten 891
- 11.2.2.1 Ein Element aus der realen Objektwelt des Ingenieurs: das Eisenfachwerk
mit genieteten Knoten 892
- 11.2.2.2 Zur Theorie der Nebenspannungen 893
- 11.2.3 Vom Fachwerk zum Rahmentragwerk 897
- 11.2.3.1 Denken in Verformungen 897
- 11.2.3.2 Vierendeelträger 898
- 11.2.4 Die Emanzipation des Deformationsverfahrens von der
Fachwerktheorie 900
- 11.2.4.1 Axel Bendixsen 902
- 11.2.4.2 George Alfred Maney 903
- 11.2.4.3 Willy Gehler 904
- 11.2.4.4 Asger Ostenfeld 904
- 11.2.4.5 Peter L. Pasternak 906
- 11.2.4.6 Ludwig Mann 906
- 11.2.5 Das Deformationsverfahren in der Inventionsphase der Baustatik 907
- 11.3 Die Rationalisierungsbewegung in der Baustatik 908
- 11.3.1 Der operativen Symbolgebrauch in der Baustatik 910
- 11.3.2 Rationalisierung des statisch unbestimmten Rechnens 913
- 11.3.2.1 Statisch unbestimmte Hauptsysteme 913
- 11.3.2.2 Orthogonalisierungsverfahren 914
- 11.3.2.3 Spezielle Verfahren aus der Theorie der linearen Gleichungssysteme 915
- 11.3.2.4 Baustatischen Iterationsverfahren 916
- 11.3.3 Der duale Bau der Baustatik 920
- 11.4 Konrad Zuse und die Automatisierung des statischen Rechnens 923
- 11.4.1 Schematisierung des statisch unbestimmten Rechnens 923
- 11.4.1.1 Schematisierter Rechengang 924
- 11.4.1.2 Erster Schritt zum Rechenplan 929
- 11.4.2 Die Rechenmaschine des Ingenieurs 930
- 11.5 Der Matrizenkalkül 932
- 11.5.1 Der Matrizenkalkül in der Mathematik und theoretischen Physik 933
- 11.5.2 Tensoralgebra und Matrizenalgebra in den technikkwissenschaftlichen
Grundlagendisziplinen 934
- 11.5.3 Zur Integration des Matrizenkalküls in die Ingenieurmathematik 937
- 11.5.4 Ein baustatisches Matrizenverfahren: das Übertragungsverfahren 940

- 12 **Herausbildung und Etablierung der Computerstatik** 947**
- 12.1 *The Computer shapes the theory* (Argyris): Die historischen Wurzeln der Finite-Elemente-Methode 948
- 12.1.1 Stabwerkmodelle für elastische Kontinua 952
- 12.1.1.1 Das räumliche Fachwerkmodell von Kirsch 952
- 12.1.1.2 Fachwerkmodelle für elastische Scheiben 953
- 12.1.1.3 Die Entstehung der Gitterrostmethode 955
- 12.1.1.4 Erste computergestützte Strukturanalysen in der Fahrzeugindustrie 958
- 12.1.2 Modularisieren und Elementieren von Flugzeugstrukturen 962
- 12.1.2.1 Vom kastenförmigen Raumbachwerkträger zum Schubfeldträger und Schubfeldschema 963
- 12.1.2.1.1 Tragwirkung des Schubfelds 966
- 12.1.2.1.2 Erste Stufe: Zugfeldtheorie für ebene Blechwandträger mit sehr dünnem Stegblech 967
- 12.1.2.1.3 Zweite Stufe: Vollwandiger Kastenträger 967
- 12.1.2.1.4 Dritte Stufe: Versteifte Schalenträgerwerke 968
- 12.1.2.1.5 Vierte Stufe: Schubfeldträger und Schubfeldtheorie 969
- 12.1.2.2 Hochgeschwindigkeits-Aerodynamik, Elementierung des Schubfeldträgers und Matrizenrechnung 971
- 12.2 Die matrizenalgebraische Reformulierung der Strukturmechanik 974
- 12.2.1 Die Grundlegung der modernen Strukturmechanik 975
- 12.2.2 Die ersten Gehversuche der Computerstatik in Europa 978
- 12.2.2.1 Schweiz 978
- 12.2.2.2 Großbritannien 980
- 12.2.2.3 Bundesrepublik Deutschland 981
- 12.3 Die FEM – eine allgemeine Technologie technikwissenschaftlicher Theoriebildung 986
- 12.3.1 Zur klassischen Veröffentlichung einer nichtklassischen Methode 986
- 12.3.2 Von der heuristischen Potenz der FEM: die Direkte Steifigkeitsmethode 990
- 12.4 Die Grundlegung der FEM durch Variationsprinzipien 994
- 12.4.1 Das Variationsprinzip von Dirichlet und Green 994
- 12.4.1.1 Ein einfaches Beispiel: der längsbelastete elastische Dehnstab 995
- 12.4.1.2 Die Göttinger Schule um Felix Klein 997
- 12.4.2 Die erste Stufe der Synthese: das kanonische Variationsprinzip von Hellinger und Prange 998
- 12.4.2.1 Pranges Habilitationsschrift 1000
- 12.4.2.2 Im Orkus des Vergessens 1002
- 12.4.2.3 Erste Schritte des Erinnerns 1003
- 12.4.2.4 Eric Reissners Beitrag 1004
- 12.4.3 Die zweite Stufe der Synthese: das Variationsprinzip von Fraeijs de Veubeke, Hu und Washizu 1005
- 12.4.4 Variationsformulierung der FEM 1008

- 12.4.5 Ein folgenschwerer Symmetriebruch 1012
- 12.5 Back to the roots 1013
- 12.5.1 Mathematische Begründung geht vor 1015
- 12.5.2 Einflussfunktionen 1017
- 12.5.3 Einflussfunktionen und FEM – ein Beispiel 1018
- 12.5.4 Praktischer Nutzen der Einflussfunktionen 1019
- 12.5.5 Grundlagendenken in der Baustatik 1019
- 12.6 Computational Mechanics 1019

- 13 Dreizehn wissenschaftliche Kontroversen in der Mechanik und Baustatik 1025**
- 13.1 Die wissenschaftliche Kontroverse 1026
- 13.2 Dreizehn Streitfälle 1026
 - 13.2.1 Galileis *Dialogo* 1027
 - 13.2.2 Galileis *Discorsi* 1027
 - 13.2.3 Der philosophische Streit um das wahre Kraftmaß 1028
 - 13.2.4 Der Streit um das Prinzip der kleinsten Aktion 1029
 - 13.2.5 Die Peterskuppel im Streit der Theoretiker und Praktiker 1032
 - 13.2.6 Diskontinuum oder Kontinuum? 1034
 - 13.2.7 Graphische Statik vs. Graphostatik oder: die Verteidigung der reinen Lehre 1036
 - 13.2.8 Eine Feindschaft schafft zwei Schulen: Mohr gegen Müller-Breslau 1037
 - 13.2.9 Der Stellungskrieg 1038
 - 13.2.10 Bis dass der Tod euch scheidet: Fillunger gegen Terzaghi 1039
 - 13.2.11 „Im Prinzip ja ...“: der Streit um die Prinzipien 1042
 - 13.2.12 Elastisch oder plastisch – das ist hier die Frage 1045
 - 13.2.13 Vom Bestand des Klassischen in der Erddrucktheorie 1046
- 13.3 Resümee 1048

- 14 Perspektiven der Historischen Baustatik 1049**
- 14.1 Baustatik und Ästhetik 1050
 - 14.1.1 Das Schisma der Baukunst 1051
 - 14.1.2 Schönheit und Nutzen in der Baukunst – eine Utopie? 1052
 - 14.1.3 Alfred Gotthold Meyers *Eisenbauten. Ihre Geschichte und Ästhetik* 1056
 - 14.1.4 Das Ästhetische in der Dialektik von Bauen und Rechnen 1060
- 14.2 Historische Technikwissenschaft – Historische Baustatik 1064
 - 14.2.1 Saint-Venants Historische Elastizitätstheorie 1066
 - 14.2.2 Historische Gewölbetheorie 1067
 - 14.2.3 Historisch-genetische Statiklehre 1068
 - 14.2.3.1 Historisch-logische Längsschnittanalyse 1070
 - 14.2.3.2 Historisch-logische Querschnittsanalyse 1070
 - 14.2.3.3 Historisch-logischer Vergleich 1071

14.2.3.4 Inhalte, Ziele, Mittel und Charakteristik der historisch-genetischen
Statiklehre 1071

14.2.4 Computergestützte Graphostatik 1074

15 Kurzbiografien von 270 Protagonisten der Baustatik 1079

Bibliografie 1273

Personenregister 1409

Sachregister 1425

