

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
	<b>Autoren</b>	<b>VII</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung und Übersicht</b>	<b>1</b>
1.1	Erforderliche Nachweise und Nachweisverfahren	1
1.2	Verfahren zur Schnittgrößenermittlung	2
1.3	Elementtypen und Anwendungsbereiche	4
1.4	Lineare und nichtlineare Berechnungen	6
1.5	Bezeichnungen und Annahmen	9
1.6	Grundlegende Beziehungen	15
1.7	Linearisierung	18
1.8	Software/Downloads	21
<b>2</b>	<b>Grundlagen der FEM</b>	<b>22</b>
2.1	Allgemeines	22
2.2	Grundideen und Methodik	22
2.3	Ablauf der Berechnungen	28
2.4	Gleichgewicht	30
2.4.1	Vorbemerkungen	30
2.4.2	Prinzip der virtuellen Arbeit	31
2.4.3	Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie	33
2.4.4	Differentialgleichungen	35
2.5	Ansatzfunktionen für die Verformungen	37
2.5.1	Grundsätzliches	37
2.5.2	Polynomfunktionen für Stabelemente	38
2.5.3	Trigonometrische und Hyperbelfunktionen für Stabelemente	41
2.5.4	Ansatzfunktionen für das Plattenbeulen	46
2.5.5	Eindimensionale Funktionen für Querschnitte	50
2.5.6	Zweidimensionale Funktionen für Querschnitte	53
<b>3</b>	<b>FEM für lineare Berechnungen von Stabtragwerken</b>	<b>58</b>
3.1	Vorbemerkungen	58
3.2	Stabelemente für lineare Berechnungen	58
3.2.1	Verknüpfung der Verformungs- und Schnittgrößen	58
3.2.2	Normalkraftbeanspruchungen	60
3.2.3	Biegebeanspruchungen	63

3.2.4	Torsionsbeanspruchungen	66
3.2.5	Beliebige Beanspruchungen	70
3.3	Knotengleichgewicht im globalen Koordinatensystem	73
3.4	Bezugssysteme und Transformationen	76
3.4.1	Problemstellung	76
3.4.2	Stabelemente in der X-Z-Ebene	81
3.4.3	Stabelemente im räumlichen X-Y-Z-KOS	84
3.4.4	Lastgrößen	87
3.4.5	Verdrillung und Wölbmoment	89
3.4.6	Finite Elemente für beliebige Bezugssysteme	95
3.5	Gleichungssystem	96
3.5.1	Ziel	96
3.5.2	Gesamtsteifigkeitsmatrix	96
3.5.3	Gesamtlastvektor	98
3.5.4	Geometrische Randbedingungen	100
3.6	Berechnung der Verformungsgrößen	102
3.7	Ermittlung der Schnittgrößen	103
3.8	Ermittlung der Auflagerreaktionen	105
3.9	Einwirkungen/Lastgrößen	106
3.9.1	Einzellasten	106
3.9.2	Streckenlasten	106
3.9.3	Stützensenkungen	107
3.9.4	Temperatureinwirkungen	108
3.10	Federn und Schubfelder	109
3.11	Gelenke und Gelenkfedern	113
3.12	Einflusslinien	117
3.13	Übertragungsmatrizenverfahren	121
3.14	Schubweiche Stabelemente	126
<b>4</b>	<b>FEM für nichtlineare Berechnungen von Stabtragwerken</b>	<b>133</b>
4.1	Allgemeines	133
4.2	Gleichgewicht am verformten System	133
4.3	Ergänzung der virtuellen Arbeit	137
4.4	Knotengleichgewicht unter Berücksichtigung von Verformungen	143
4.5	Geometrische Steifigkeitsmatrix	145
4.6	Sonderfall: Biegung mit Druck- bzw. Zugnormalkraft	150
4.7	Vorverformungen und geometrische Ersatzimperfektionen	154
4.8	Berechnungen nach Theorie II. Ordnung und Nachweis-schnittgrößen	158
4.9	Stabilitätsuntersuchungen/Verzweigungslasten	165
4.10	Eigenformen/Knickbiegelinien	167
4.11	Fließgelenktheorie	171

---

<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiele für Stabtragwerke</b>	<b>175</b>
5.1	Übersicht	175
5.1.1	Allgemeines	175
5.1.2	Nachweis ausreichender Querschnittstragfähigkeit	176
5.1.3	Stabilitätsnachweise für Stäbe	183
5.1.4	Auswahl der Elementtypen und -matrizen	187
5.1.5	Tragfähigkeitsmindernde Einflüsse	189
5.2	Träger	190
5.2.1	Vorbemerkungen	190
5.2.2	Einfeldträger mit Kragarm	190
5.2.3	Traglast eines Zweifeldträgers	193
5.2.4	Zweifeldträger mit elastischem Mittelaufleger	197
5.2.5	Träger mit planmäßiger Torsion	199
5.2.6	Kranbahnträger	201
5.3	Stützen und andere Druckstäbe	205
5.3.1	Vorbemerkungen	205
5.3.2	Elastisch eingespannte Rohrstütze	205
5.3.3	Stütze mit planmäßiger Biegung und drei Stabilitätsfällen	207
5.3.4	Giebelwanddeckstütze	210
5.4	Fachwerke	214
5.4.1	Vorbemerkungen	214
5.4.2	Ebener Fachwerkbinder	214
5.4.3	Montagezustand des Torbinders einer Flugzeughalle	218
5.5	Rahmen und Stabwerke	220
5.5.1	Vorbemerkungen	220
5.5.2	Zweigelenrahmen mit Zwischenbühne	221
5.5.3	Rahmen unter Berücksichtigung von Anschlusssteifigkeiten	225
5.5.4	Haupttragwerk einer Stabbogenbrücke	231
5.5.5	Silodachkonstruktion	235
5.6	Trägerroste	239
5.6.1	Vorbemerkungen	239
5.6.2	Fahrbahn einer Stabbogenbrücke	240
<b>6</b>	<b>FEM für ebene Flächentragwerke – Plattenbeulen</b>	<b>242</b>
6.1	Scheiben und Platten	242
6.2	Spannungen und Schnittgrößen	242
6.3	Verschiebungsgrößen	244
6.4	Grundlegende Beziehungen	245
6.5	Prinzip der virtuellen Arbeit	247
6.6	Scheiben und Platten im Stahlbau	249

6.7	Steifigkeitsmatrix für ein Plattenelement	251
6.8	Geometrische Steifigkeitsmatrix für das Plattenbeulen	255
6.9	Längs- und querausgesteifte Platten	256
6.10	Plattenbeulnachweise nach DIN EN 1993-1-5	258
6.11	Berechnung von Beulspannungen und Beulflächen	264
6.12	Anwendungsbeispiele zum Plattenbeulen	271
6.12.1	Vorbemerkungen	271
6.12.2	Einzelfeld mit konstantem $\sigma_x$	271
6.12.3	Ein- und zweiwellige Beulflächen, gleiche Beulspannungen	274
6.12.4	Stegblech einer Verbundbrücke mit Schubbeanspruchung	276
6.12.5	Stegblech mit Biegebeanspruchung	277
6.12.6	Bodenblech mit Längssteife	279
6.12.7	Vollwandträgersteg mit Längssteifen	283
6.12.8	Veränderte Anordnung der Längssteifen	292
<b>7</b>	<b>FEM für Stabquerschnitte</b>	<b>294</b>
7.1	Aufgabenstellungen	294
7.2	Normierte Bezugssysteme und Querschnittskennwerte	296
7.3	Prinzip der virtuellen Arbeit	299
7.4	Eindimensionale Elemente für dünnwandige Querschnitte	304
7.4.1	Virtuelle Arbeit	304
7.4.2	Elementsteifigkeitsbeziehungen	306
7.4.3	Gleichungssysteme	309
7.4.4	Berechnungen der Querschnittswerte und Spannungen	311
7.4.5	Zusammenstellung	314
7.5	Zweidimensionale Elemente für dickwandige Querschnitte	315
7.5.1	Vorbemerkungen	315
7.5.2	Virtuelle Arbeit für dickwandige Querschnittselemente	317
7.5.3	Elementgeometrie	318
7.5.4	Transformationsbeziehungen	321
7.5.5	Steifigkeitsbeziehungen	323
7.5.6	Numerische Integration	325
7.5.7	Querschnittswerte und Spannungen	328
7.5.8	Güte der Näherungslösungen	329
7.5.9	Sonderfall: Rechteckige Elemente	331
7.6	Berechnungsablauf	335
7.7	Anwendungsbeispiele	337
7.7.1	Vorbemerkungen	337
7.7.2	Einzelliger Hohlkastenquerschnitt	337
7.7.3	Brückenquerschnitt mit Trapezsteifen	342
7.7.4	Rechteckiger Vollquerschnitt	345

---

7.7.5	Doppelsymmetrischer I-Querschnitt	351
7.7.6	Kranschiene	358
7.7.7	Numerische Erfassung des Schubverzerrungseinflusses auf die Normalspannungsverteilung	360
7.8	Schubkorrekturfaktoren	362
<b>8</b>	<b>Gleichungssysteme</b>	<b>367</b>
8.1	Problemstellung	367
8.2	Lösungsverfahren	368
8.3	<i>Gaußscher</i> Algorithmus	369
8.4	<i>Cholesky</i> -Verfahren	370
8.5	<i>Gaucho</i> -Verfahren	370
8.6	Berechnungsbeispiel	372
8.7	Ergänzende Hinweise	374
<b>9</b>	<b>Lösung von Eigenwertproblemen</b>	<b>375</b>
9.1	Problemstellung	375
9.2	Erläuterungen zum Verständnis	376
9.3	Matrizenerlegungsverfahren	381
9.4	Inverse Vektoriteration	386
9.5	Kombination der Lösungsverfahren	392
<b>10</b>	<b>FEM für nichtlineare Berechnungen von Stäben nach der Fließzonentheorie</b>	<b>395</b>
10.1	Einführung	395
10.1.1	Vorbemerkungen	395
10.1.2	Grundlegende Einführungsbeispiele	395
10.2	Hinweise zu geometrisch nichtlinearen Berechnungen	398
10.3	Berücksichtigung der physikalischen Nichtlinearität	402
10.3.1	Vorbemerkungen	402
10.3.2	Einführungsbeispiel	402
10.3.3	Dehnungsiteration für $\sigma_x$ -Schnittgrößen	406
10.4	Grundlagen und Annahmen für Berechnungen nach der Fließzonentheorie	413
10.4.1	Vorbemerkungen	413
10.4.2	Werkstoffgesetz	413
10.4.3	Imperfektionen	416
10.4.4	Zum Einfluss der Imperfektionen	420
10.5	Gleichgewicht	422
10.5.1	Inkrementelles Gleichungssystem nach Theorie II. Ordnung	422

---

10.5.2	Verallgemeinertes inkrementell-iteratives Verfahren	428
10.5.3	Bogenlängenverfahren	432
10.6	Steifigkeitsmatrix für Bauteile mit Fließzonen	434
10.7	Berechnungsbeispiele	438
10.7.1	Fließzonenberechnungen auf Grundlage von DIN EN 1993	438
10.7.2	Berechnungen mit dem Programm FE-STAB-FZ	439
10.7.3	Bauteile mit doppelsymmetrischen I-Querschnitten	440
10.7.4	Stütze HEA 140 mit Druckkraft und planmäßiger Biegung	443
10.7.5	Einfeldträger IPE 300 mit Druckkraft und planmäßiger Biegung	445
10.7.6	Stütze IPE 300 mit Einspannung am Stützenfuß	447
10.7.7	Einfeldträger IPE 450 mit Kragarm	449
10.7.8	Zweifeldriger Kranbahnträger HEB 300	451
10.7.9	Biegung und Torsion eines Versuchsträgers IPE 200	454
10.7.10	Zweiachsig außermittig belastete Versuchsstütze HEB 200	457
10.7.11	Auswirkungen von Fließzonen auf die Tragfähigkeit	461
<b>11</b>	<b>Grundlagen zur Beschreibung des plastischen Materialverhaltens</b>	<b>465</b>
11.1	Einleitung	465
11.2	Grundlegende mechanische Beziehungen	466
11.2.1	Spannungs- und Verzerrungstensor	466
11.2.2	Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen	469
11.3	Beschreibung der Plastizität	472
11.3.1	Fließkriterium	472
11.3.2	Verfestigungsregel	476
11.3.3	Fließregel	480
11.4	Hinweise zur Berücksichtigung der Plastizität in numerischen Berechnungen	486
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>489</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>495</b>