

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1	Linearelastische Theorie und ihre Praxis .....	4
2.2	Kinematische Beziehungen zwischen Verformungen und Verzerrungen .....	7
2.3	Spannungszustand / Verzerrungszustand .....	9
2.4	Das Materialverhalten .....	11
2.5	Gleichgewicht im deformierten Zustand: zugehörige Prinzipien .....	14
2.5.1	Prinzip der virtuellen Verschiebungen .....	14
2.5.2	Minimumsprinzip der potentiellen Energie .....	15
2.5.3	Das "Schnittprinzip" .....	16
2.6	Deformationsmethode ("direkte Steifigkeitsmethode") .....	18
2.7	Charakteristische Eigenschaften typischer Strukturen .....	20
2.7.1	Dreidimensionale, zweidimensionale und eindimensionale Kontinua .....	20
2.8	Ein eindimensionaler elastischer Körper: Feder .....	27
2.9	Lösung der Matrizegleichungen in der Mechanik .....	34
2.9.1	Cholesky-Zerlegung .....	34
2.10	Ein weiterer eindimensionaler mechanischer Körper: Balken ("Blattfeder") .....	37
2.11	Ersatz äusserer Kräfte und Momente durch konsistente Knotenbelastung .....	41
<b>3</b>	<b>Finite Elemente als Ersatz für elastische Körper .....</b>	<b>44</b>
3.1	Lineares Stabelement .....	44
3.2	Lineares, rechteckiges Scheibenelement .....	47
3.2.1	Elementsteifigkeitsmatrix .....	47
3.3	Rechteckiges Plattenelement .....	51
<b>4</b>	<b>Rotationssymmetrie .....</b>	<b>56</b>
4.1	Rotationssymmetrischer Spannungszustand .....	57
4.2	Symmetrische und antisymmetrische Belastungen .....	59
4.3	Verzerrungen unter nicht-rotationssymmetrischer Belastung .....	60
4.4	Rotationsschalen .....	60
4.4.1	Rotationsschale mit rotationssymmetrischer Belastung .....	60
4.4.2	Rotationsschalen mit nicht-rotationssymmetrischer Belastung .....	63
<b>5</b>	<b>Modellierung des Materialverhaltens .....</b>	<b>64</b>
5.1	Einige Beispiele für Materialgesetze .....	64
5.1.1	Elasto-plastisches Materialverhalten .....	64
5.1.2	Hyperelastisches Materialverhalten .....	65
5.1.3	Unterschiedliches Verhalten im Zug- und Druckbereich .....	65
5.1.4	Elastisch-viskoplastisches Materialverhalten .....	66
5.1.5	Kriechen .....	66
5.1.6	Relaxation .....	67
5.2	Versagenskriterien .....	69
5.2.1	Von Misessches Fliesskriterium .....	69
5.2.2	Hillsches Fliesskriterium .....	70
5.2.3	Mohr-Coulombsche Festigkeitshypothese .....	70

<b>6</b>	<b>Stabilitätsuntersuchungen / Nichtlinearitäten .....</b>	<b>72</b>
6.1	Stabilitätsuntersuchungen .....	72
6.2	Materialnichtlinearitäten .....	74
6.3	Geometrische Nichtlinearitäten .....	74
6.3.1	Grosse Verschiebungen und Verzerrungen bei Stäben .....	74
6.3.2	Grosse Verschiebungen und Verzerrungen bei Platten und Schalen .....	77
6.3.3	Allgemeiner Greenscher Ansatz für nichtlineare Kontinua .....	78
6.4	Nichtlineare Randbedingungen .....	78
6.5	FE-Simulation von Kontakt .....	78
<b>7</b>	<b>Dynamische FE-Berechnungen .....</b>	<b>80</b>
7.1	Grundlagen .....	81
7.2	Modale Analyse .....	84
7.3	Methoden zur Lösung der Bewegungsgleichung .....	89
7.3.1	Das Newmark-Verfahren .....	89
<b>8</b>	<b>Thermische FE-Berechnungen .....</b>	<b>91</b>
8.1	Grundlagen aus der Wärmelehre .....	93
8.2	Analogie zwischen thermischer und mechanischer FE-Berechnung .....	94
8.3	Thermisch induzierte Beanspruchung .....	95
8.3.1	Spannungen durch Thermoschock .....	95
8.3.2	Spannungen durch behinderte Krümmung .....	95
<b>9</b>	<b>Regeln für den Umgang mit der FE-Methode .....</b>	<b>97</b>
9.1	Kompetenzen .....	98
9.2	Das FEM-Prozessmodell .....	100
9.2.1	Klären der Aufgabenstellung .....	101
9.2.2	Idealisierung .....	101
9.2.3	Modellbildung .....	105
9.2.4	Analyse .....	107
9.2.5	Auswertung .....	109
9.2.6	Dokumentation .....	109
9.2.7	Qualitätsmanagement .....	109
9.3	Diskretisierungsfehler, Konvergenz .....	110
9.3.1	Einflussgrößen .....	110
9.3.2	Beurteilung des Diskretisierungsfehlers .....	111
9.4	Ursachen möglicher Fehler bei der Modellierung .....	112
9.5	Möglichkeiten zur Überprüfung der Ergebnisse .....	118
9.6	Tipps und Tricks .....	120
<b>10</b>	<b>Übungen .....</b>	<b>124</b>
10.1	Eine finite Elemente Berechnung per Hand .....	124
10.2	Parameterstudie "Kerbwirkung" .....	125
10.3	Einfluss der FE-Vernetzung auf die Genauigkeit .....	126
10.4	Unterschiedliche Elementtypen im Vergleich .....	127
10.5	Anpassung der Netzfeinheit an die Belastung (3D) .....	128
10.6	Anpassung der Netzfeinheit an die Belastung (2D) .....	129
10.7	Optimierung einer Winkelverbindung .....	131
10.8	Schrittweise FE-Berechnung für modular aufgebaute Strukturen .....	134
10.9	Plastisches Materialverhalten / "Fliessgelenk" .....	136
10.10	Verstärkungsvarianten für einen Balken .....	137
10.11	Platte aus Verbundwerkstoff .....	138
10.12	Stabilitätsuntersuchung .....	139
10.13	Rotierende Scheibe .....	140

10.14 Rotorblatt eines Helikopters .....	142
10.15 Untersuchungen an einer Darrieus-Windkraftanlage .....	143
10.16 Eigenschwingungen eines einfachen Fachwerks .....	145
10.17 Eigenschwingungen eines "Balkens" mit konzentrierten Massen .....	146
10.18 Transiente Schwingungen einer Platte unter Stoßbelastung.....	147
10.19 "Beruhigung" einer Fußgängerbrücke mittels Schwingungstilgers .....	150
10.20 Thermoschock bei einer überheizten Dampfleitung .....	152
10.21 Schrumpfverbindung .....	153
10.22 2D-Kontakt-Simulation .....	154
10.23 Plastisches Umformen .....	155
10.24 2D-Simulation einer Projektilbremse .....	156
10.25 Simulation eines Kurbeltriebs.....	157