

Inhalt

Vorwort zur fünften Auflage	V
1 Einleitung	1
2 Das grundsätzliche Vorgehen	5
3 Grundlagen	21
3.1 Verschiebungen und Verzerrungen	21
3.1.1 Beim Zugstab	21
3.1.2 Bei der Scheibe	23
3.1.3 Im Raum	29
3.1.4 Bei der Platte	30
3.2 Spannungs-Dehnungs-Relationen	32
3.3 Thermo-mechanische Beanspruchung	41
3.4 Eigenschwingung	44
3.5 Nichtlineare Berechnungen	47
3.5.1 Geometrische Nichtlinearitäten	48
3.5.2 Materialnichtlinearitäten	58
3.6 Kontaktberechnung	61
4 Finite Elemente und Elementmatrizen	67
4.1 Grundlagen von Element-Steifigkeits-Matrizen	69
4.2 Materialmatrizen	73
4.3 B-Matrix	74
4.4 Formfunktionen	75
4.5 Integration	86
4.6 Das Aufbringen von Lasten, Lastvektoren	92
4.6.1 Das grundsätzliche Vorgehen	92
4.6.2 Plattenelemente	96
4.6.3 Volumenelemente	98
4.6.4 Ebener und axialsymmetrischer Spannungszustand	109
4.6.5 Streckenlasten bei Balken	111
4.6.6 Gerbergelenke bei Balken	113

4.7	Eine fertige Element-Steifigkeitsroutine	117
4.8	Wahl der Elementtypen	126
4.9	Einige Bemerkungen über Schalen	134
4.10	Elementmatrizen für Thermoanalyse	148
4.11	Elementmatrizen für Schwingungen	150
4.12	Elementmatrizen der nichtlinearen Finite Elemente Analyse	151
5	Compilation, Speicherverfahren und Randbedingungen	163
5.1	Compilation	163
5.2	Speicherverfahren	174
5.2.1	Die Bandspeicherung	176
5.2.2	Das Skyline-Speicherverfahren	180
5.2.3	Das Jennings-Speicherverfahren	182
5.2.4	Speicherung der Nicht-Nullelemente	190
5.2.5	Zusammenfassung der Speicherverfahren	196
5.3	Randbedingungen	197
5.3.1	Einzel-Kräfte und Einzel-Verschiebungen	197
5.3.2	Flächenlasten bei Platten	200
5.3.3	Lagerungen von Platten	202
5.3.4	Randbedingungen bei Temperaturanalysen	203
5.3.5	Randbedingungen bei Schwingungen	207
5.3.6	Randbedingungen bei der nichtlinearen Finite Elemente Analyse ..	209
5.3.7	Randbedingungen bei Kontaktberechnungen	210
6	Gleichungslöser	221
6.1	Direkte Verfahren	222
6.1.1	Das Cholesky-Verfahren	224
6.2	Kondition und Skalierung	226
6.3	Iterative Verfahren	234
6.3.1	Das Jacobi-Verfahren	237
6.3.2	Das Gauß-Seidel-Verfahren	237
6.3.3	Das SOR-Verfahren und das JOR-Verfahren	238
6.3.4	Das Verfahren der Konjugierten Gradienten	239
6.3.5	Das Verfahren der Konjugierten Gradienten mit Vorkonditionierung	240
6.3.5.1	Vorkonditionierung mit SOR	241
6.3.5.2	Vorkonditionierung mit partieller Cholesky-Zerlegung ...	242
6.4	Solver für thermomechanische Probleme	254
6.5	Solver für Schwingungsprobleme	255
6.6	Gleichungslöser für die nichtlineare Finite Elemente Analyse	265

7	Spannungen und Knotenkräfte	269
7.1	Spannungen	269
7.2	Vergleichsspannungen	276
7.3	Knotenkräfte	283
8	Strukturoptimierung	287
8.1	Dimensionierung	288
8.1.1	CAD-basierte Dimensionierung	289
8.1.2	FE-basierte Dimensionierung	289
8.1.3	Anwendungen der Dimensionierung	289
8.2	Formoptimierung	290
8.3	Topologieoptimierung	292
8.3.1	Überblick	292
8.3.2	Topologieoptimierung mit Z88Arion	293
9	Z88: Grundlagen	295
9.1	Allgemeines	295
9.1.1	Die Z88-Element-Bibliothek im Überblick	296
9.2	Das Open Source FE-Programm Z88	308
9.2.1	Die Z88-Module im Überblick	309
9.2.2	Dynamischer Speicher Z88	311
9.2.3	Die Ein- und Ausgabe von Z88:	314
9.3	Das Freeware FE-Programm Z88Aurora	318
9.3.1	Die Z88Aurora-Module im Überblick	319
9.3.2	Speicherbedarf Z88Aurora	321
9.3.3	Die Ein- und Ausgabe von Z88Aurora	323
10	Die Z88-Module	325
10.1	Der lineare Solver Z88R	325
10.1.1	Z88R: Der direkte Cholesky Solver	326
10.1.2	Z88R: Der Sparsematrix Solver	327
10.1.3	Z88R: Der direkte Sparsematrix Solver in Z88Aurora	329
10.1.4	Welchen Solver nehmen?	330
10.1.5	Erläuterungen zur Spannungsberechnung	330
10.1.6	Erläuterungen zur Knotenkraftberechnung	331
10.2	Der Netzgenerator Z88N	331
10.2.1	Vorgehensweise	331
10.2.2	Mathematische Grundlagen	333
10.2.3	Beschreibung eines einfachen Netzgenerators	337
10.2.4	Beschreibung des Netzgenerators Z88N	344
10.3	Der Superelementgenerator in Z88Aurora	347
10.3.1	Verwendung von Z88N in Z88Aurora	348
10.3.2	Tetraederverfeinerer Z88MTV	348
10.3.3	2D-Schalenaufdicker Z88MVS	350

10.4	Das OpenGL Plotprogramm Z88O bei Z88 V150S bzw. der Postprozessor von Z88Aurora	350
10.5	Der DXF-Konverter Z88X	354
10.6	Der 3D-Konverter Z88G	363
10.7	Der Ansys-Konverter Z88ASY in Z88Aurora	366
10.8	Der Abaqus-Konverter Z88INP in Z88Aurora	368
10.9	Das Cuthill-McKee Programm Z88H	369
10.10	Der Step-Import Z88GEOCON (Step) in Z88Aurora	371
10.11	Der Stl-Konverter Z88GEOCON (Stl) in Z88Aurora	373
10.12	Der Tetraedervernetzer in Z88Aurora	374
10.13	Das Pickingmodul in Z88Aurora	375
10.14	Die Materialdatenbank in Z88Aurora	377
10.15	Die Randbedingungen in Z88Aurora	377
10.16	Die Benutzerunterstützung Spider in Z88Aurora	378
10.17	Das Thermomodul in Z88Aurora	379
10.18	Das Eigenschwingungsmodul in Z88Aurora	382
10.19	Das Modul Z88NL für nichtlineare Berechnungen in Z88Aurora	385
10.20	Das Modul Z88Kontakt für Kontaktberechnungen	388
11	Eingabe-Dateien erzeugen	393
11.1	Allgemeines	393
11.2	Allgemeine Strukturdaten Z88I1.TXT	395
11.3	Randbedingungsdatei Z88I2.TXT	396
11.4	Flächenlast-Datei Z88I5.TXT	399
11.5	Materialsteuerdatei Z88MAT.TXT	404
11.6	Materialdatei *.TXT	405
11.7	Elementparameterdatei Z88ELP.TXT	407
11.8	Integrationsordnungs-Datei Z88INT.TXT	408
11.9	Netzgenerator-Datei Z88NI.TXT	410
11.10	Solversteuerdatei Z88MAN.TXT	414
11.11	Vergleich der Z88-Dateiformate	417
12	Die Finiten Elemente von Z88 und Z88Aurora	419
12.1	Hexaeder Nr. 1 mit 8 Knoten	419
12.2	Balken Nr. 2 mit 2 Knoten im Raum	422
12.3	Scheibe Nr.3 mit 6 Knoten	424
12.4	Stab Nr.4 im Raum	425
12.5	Welle Nr. 5 mit 2 Knoten	427
12.6	Torus Nr. 6 mit 3 Knoten	428
12.7	Scheibe Nr. 7 mit 8 Knoten	430
12.8	Torus Nr. 8 mit 8 Knoten	432
12.9	Stab Nr. 9 in der Ebene	434
12.10	Hexaeder Nr. 10 mit 20 Knoten	435
12.11	Scheibe Nr. 11 mit 12 Knoten	438
12.12	Torus Nr. 12 mit 12 Knoten	440

12.13	Balken Nr. 13 in der Ebene	442
12.14	Scheibe Nr. 14 mit 6 Knoten	443
12.15	Torus Nr. 15 mit 6 Knoten	446
12.16	Tetraeder Nr. 16 mit 10 Knoten	448
12.17	Tetraeder Nr. 17 mit 4 Knoten	451
12.18	Platte Nr. 18 mit 6 Knoten	454
12.19	Platte Nr. 19 mit 16 Knoten	456
12.20	Platte Nr. 20 mit 8 Knoten	459
12.21	Schale Nr. 21 mit 16 Knoten	461
12.22	Schale Nr. 22 mit 12 Knoten	463
12.23	Schale Nr. 23 mit 8 Knoten	465
12.24	Schale Nr. 24 mit 6 Knoten	467
12.25	Balken Nr. 25 mit 2 Knoten im Raum	469
12.26	Element/Solverübersicht Z88Aurora V5	472
13	Beispiele	473
13.1	Schraubenschlüssel aus Scheiben Nr.7	481
13.1.1	Mit Z88V15	482
13.1.2	Mit Z88Aurora	490
13.2	Kranträger aus Stäben Nr. 4	501
13.2.1	Mit Z88V15	502
13.2.2	Mit Z88Aurora	507
13.3	Getriebewelle mit Welle Nr.5	512
13.3.1	Mit Z88V15	513
13.3.2	Mit Z88Aurora	517
13.4	Biegeträger mit Balken Nr.13	521
13.4.1	Mit Z88V15	522
13.4.2	Mit Z88Aurora	526
13.5	Plattensegment aus Hexaedern Nr.1 und Nr.10	530
13.5.1	Mit Z88V15	530
13.5.2	Mit Z88Aurora	537
13.6	Rohr unter Innendruck, Scheibe Nr.7	539
13.6.1	Mit Z88V15	540
13.6.2	Mit Z88Aurora	547
13.7	Rohr unter Innendruck, Tori Nr.8	549
13.7.1	Mit Z88V15	550
13.7.2	Mit Z88Aurora	556
13.8	Zweitaktmotor-Kolben	558
13.8.1	Mit Z88V15	558
13.8.2	Mit Z88Aurora	562
13.9	RINGSPANN-Scheibe und Tellerfeder	567
13.9.1	Mit Z88V15	569
13.9.2	Mit Z88Aurora	572
13.9.2.1	RINGSPANN-Scheibe	572
13.9.2.2	Tellerfeder	573

13.10	Flüssiggas-Tank	574
13.10.1	Mit Z88V15	574
13.10.2	Mit Z88Aurora	578
13.11	Motorrad-Kurbelwelle	580
13.11.1	Mit Z88V15	582
13.11.2	Mit Z88Aurora	587
13.12	Drehmoment-Messnabe	591
13.12.1	Mit Z88V15	592
13.12.2	Mit Z88Aurora	593
13.13	Ebene Rahmen	594
13.13.1	Mit Z88V15	595
13.13.2	Mit Z88Aurora	615
13.14	Zahnrad	617
13.14.1	Mit Z88V15	618
13.14.2	Mit Z88Aurora	623
13.15	3D-Schraubenschlüssel	627
13.15.1	Mit Z88V15	627
13.15.2	Mit Z88Aurora	639
13.16	Kraftmesselement, Scheiben Nr. 7	641
13.16.1	Mit Z88V15	641
13.16.2	Mit Z88Aurora	652
13.17	Kreisplatte, Platten Nr. 20	653
13.17.1	Mit Z88V15	655
13.17.2	Mit Z88Aurora	659
13.18	Rechteckplatte mit 16-Knoten Platten Nr. 19	660
13.18.1	Mit Z88V15	660
13.18.2	Mit Z88Aurora	667
13.19	Viertaktmotor-Kolben mit Tetraedern Nr. 16	668
13.19.1	Mit Z88V15	669
13.19.2	Mit Z88Aurora	673
13.20	Automotor-Lüfterrad	676
13.20.1	Mit Z88V15	678
13.20.2	Mit Z88Aurora	679
13.21	Diesekolben	682
13.21.1	Mit Z88V15	683
13.21.2	Mit Z88Aurora	686
13.22	Berechnung einer Formzahl	686
13.22.1	Mit Z88V15	687
13.22.2	Mit Z88Aurora	693
13.23	Zahnfußbeanspruchung	694
13.23.1	Mit Z88V15	695
13.23.2	Mit Z88Aurora	698
13.24	Vierkantrohr, Schale Nr. 24	700
13.24.1	Mit Z88V15	702
13.24.2	Mit Z88Aurora	703

13.25 U-Boot aus Schalen Nr.22	707
13.26 Zahnrad aus Tetraedern Nr. 17	712
13.27 Schwingende Trommel	715
13.28 Modalanalyse Kurbelwelle	719
13.29 Thermomechanische Analyse eines Löffels	722
13.30 Thermische Analyse eines Viertakt-Motorkolbens	728
13.31 Berechnung der Konvektion an einem Rippenbehälter	732
13.32 Nichtlineare Berechnung einer Tellerfeder	737
13.33 Nichtlineare Berechnung eines Scharniers	741
13.34 Materialplastizität einer Kugelkupplung	745
13.35 Import einer STL-Geometrie und Umwandlung in ein Schalenmodell	753
13.36 Trimmen eines Bauteils	756
13.37 Kontaktanalyse einer Zahnstange	759
13.38 Kontaktanalyse eines Augenstabes	765
13.39 Topologieoptimierung eines Schraubenschlüssels	770
13.40 Optimierung eines Radträgers mit dem SKO-Verfahren	774
Quellen und weiterführende Literatur	779
Index	787