

# Inhalt

<b>Vorwort zur fünften Auflage .....</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Das grundsätzliche Vorgehen .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Etwas Elastizitätstheorie .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Verschiebungen und Verzerrungen .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.1 Beim Zugstab .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.2 Bei der Scheibe .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.3 Im Raum .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.4 Bei der Platte .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Spannungs-Dehnungs-Relationen .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Grundlagen der thermo-mechanischen Beanspruchung .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 Grundlagen Eigenschwingung .....</b>	<b>47</b>
<b>3.5 Grundlagen nichtlinearer Berechnungen .....</b>	<b>50</b>
<b>4 Finite Elemente und Elementmatrizen .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1 Grundlagen von Element-Steifigkeits-Matrizen .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2 Materialmatrizen .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3 B-Matrix .....</b>	<b>70</b>
<b>4.4 Formfunktionen .....</b>	<b>71</b>
<b>4.5 Integration .....</b>	<b>81</b>
<b>4.6 Das Aufbringen von Lasten, Lastvektoren .....</b>	<b>88</b>
<b>4.6.1 Das grundsätzliche Vorgehen .....</b>	<b>88</b>
<b>4.6.2 Plattenelemente .....</b>	<b>91</b>
<b>4.6.3 Volumenelemente .....</b>	<b>93</b>
<b>4.6.4 Ebener und axialsymmetrischer Spannungszustand .....</b>	<b>104</b>
<b>4.6.5 Streckenlasten bei Balken .....</b>	<b>106</b>
<b>4.6.6 Gerbergelenke bei Balken .....</b>	<b>108</b>
<b>4.7 Eine fertige Element-Steifigkeitsroutine .....</b>	<b>112</b>

<b>4.8</b>	<b>Einige Bemerkungen zur Modellbildung .....</b>	<b>121</b>
4.8.1	Wahl der Elementtypen .....	121
4.8.2	Kunststoffe und Materialgesetze .....	129
4.8.3	Strukturoptimierung .....	130
<b>4.9</b>	<b>Einige Bemerkungen über Schalen .....</b>	<b>134</b>
<b>4.10</b>	<b>Elementmatrizen für Thermoanalyse .....</b>	<b>148</b>
<b>4.11</b>	<b>Elementmatrizen für Schwingungen .....</b>	<b>150</b>
<b>4.12</b>	<b>Elementmatrizen der nichtlinearen Finite Elemente Analyse .....</b>	<b>152</b>
<b>5</b>	<b>Compilation, Speicherverfahren und Randbedingungen .....</b>	<b>163</b>
<b>5.1</b>	<b>Compilation .....</b>	<b>163</b>
<b>5.2</b>	<b>Speicherverfahren .....</b>	<b>174</b>
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
<b>5.3</b>	<b>Randbedingungen .....</b>	<b>197</b>
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 .....	206
5.3.6	Randbedingungen bei der nichtlinearen Finite Elemente Analyse ..	207
<b>6</b>	<b>Gleichungslöser .....</b>	<b>209</b>
<b>6.1</b>	<b>Direkte Verfahren .....</b>	<b>210</b>
6.1.1	Das Cholesky-Verfahren .....	212
<b>6.2</b>	<b>Kondition und Skalierung .....</b>	<b>214</b>
<b>6.3</b>	<b>Iterative Verfahren .....</b>	<b>223</b>
6.3.1	Das Jacobi-Verfahren .....	225
6.3.2	Das Gauß-Seidel-Verfahren .....	226
6.3.3	Das SOR-Verfahren und das JOR-Verfahren .....	226
6.3.4	Das Verfahren der Konjugierten Gradienten .....	227
6.3.5	Das Verfahren der Konjugierten Gradienten mit Vorkonditionierung	229
<b>6.4</b>	<b>Solver für thermomechanische Probleme .....</b>	<b>244</b>
<b>6.5</b>	<b>Solver für Schwingungsprobleme .....</b>	<b>244</b>
<b>6.6</b>	<b>Gleichungslöser für die nichtlineare Finite Elemente Analyse .....</b>	<b>255</b>
<b>7</b>	<b>Spannungen und Knotenkräfte .....</b>	<b>259</b>
<b>7.1</b>	<b>Spannungen .....</b>	<b>259</b>
<b>7.2</b>	<b>Vergleichsspannungen .....</b>	<b>266</b>
<b>7.3</b>	<b>Knotenkräfte .....</b>	<b>273</b>

<b>8</b>	<b>Netzgenerierung krummlinig berandeter Finiter Elemente .....</b>	<b>277</b>
8.1	Vorgehensweise .....	277
8.2	Mathematische Grundlagen .....	279
8.3	Beschreibung eines einfachen Netzgenerators .....	283
<b>9</b>	<b>Z88: Grundlagen .....</b>	<b>291</b>
9.1	Allgemeines .....	291
9.1.1	Die Z88-Element-Bibliothek im Überblick .....	292
9.2	Das Open Source FE-Programm Z88 .....	304
9.2.1	Die Z88-Module im Überblick .....	304
9.2.2	Dynamischer Speicher Z88 .....	307
9.2.3	Die Ein- und Ausgabe von Z88: .....	310
9.3	Das Freeware FE-Programm Z88Aurora .....	314
9.3.1	Die Z88Aurora-Module im Überblick .....	314
9.3.2	Speicherbedarf Z88Aurora .....	317
9.3.3	Die Ein- und Ausgabe von Z88Aurora .....	318
<b>10</b>	<b>Die Z88-Module .....</b>	<b>321</b>
10.1	Der lineare Solver Z88R .....	321
10.1.1	Z88R: Der direkte Cholesky Solver .....	322
10.1.2	Z88R: Der Sparsesmatrix Solver .....	323
10.1.3	Z88R: Der direkte Sparsesmatrix Solver in Z88Aurora .....	325
10.1.4	Welchen Solver nehmen? .....	326
10.1.5	Erläuterungen zur Spannungsberechnung .....	326
10.1.6	Erläuterungen zur Knotenkraftberechnung .....	327
10.2	Der Netzgenerator Z88N .....	327
10.3	Der Superelementgenerator in Z88Aurora .....	330
10.3.1	Verwendung von Z88N in Z88Aurora .....	330
10.3.2	Tetraederverfeinerer Z88MTV .....	331
10.3.3	2D-Schalenaufdicker Z88MVS .....	333
10.4	Das OpenGL Plotprogramm Z88O bei Z88 V14 OS bzw. der Postprozessor von Z88Aurora .....	333
10.5	Der DXF-Konverter Z88X .....	337
10.6	Der 3D-Konverter Z88G .....	346
10.7	Der Ansys-Konverter Z88ASY in Z88Aurora .....	349
10.8	Der Abaqus-Konverter Z88INP in Z88Aurora .....	351
10.9	Das Cuthill-McKee Programm Z88H .....	352
10.10	Der Step-Import Z88GEOCON (Step) in Z88Aurora .....	354
10.11	Der Stl-Konverter Z88GEOCON (Stl) in Z88Aurora .....	356
10.12	Der Tetraedervernetzer in Z88Aurora .....	357
10.13	Das Pickingmodul in Z88Aurora .....	358
10.14	Die Materialdatenbank in Z88Aurora .....	360
10.15	Die Randbedingungen in Z88Aurora .....	360

10.16	Die Benutzerunterstützung Spider in Z88Aurora .....	361
10.17	Das Thermomodul in Z88Aurora .....	362
10.18	Das Eigenschwingungsmodul in Z88Aurora .....	365
10.19	Das Modul Z88NL für nichtlineare Berechnungen in Z88Aurora .....	368
<b>11</b>	<b>Eingabe-Dateien erzeugen .....</b>	<b>373</b>
11.1	Allgemeines .....	373
11.2	Allgemeine Strukturdaten Z88I1.TXT .....	375
11.3	Randbedingungsdatei Z88I2.TXT .....	376
11.4	Flächenlast-Datei Z88I5.TXT .....	379
11.5	Materialsteuerdatei Z88MAT.TXT .....	384
11.6	Materialdatei *.TXT .....	385
11.7	Elementparameterdatei Z88ELP.TXT .....	385
11.8	Integrationsordnungs-Datei Z88INT.TXT .....	387
11.9	Netzgenerator-Datei Z88NI.TXT .....	388
11.10	Solversteuerdatei Z88MAN.TXT .....	392
11.11	Vergleich der Z88-Dateiformate .....	395
<b>12</b>	<b>Die Finiten Elemente von Z88 und Z88Aurora .....</b>	<b>397</b>
12.1	Hexaeder Nr.1 mit 8 Knoten .....	397
12.2	Balken Nr.2 mit 2 Knoten im Raum .....	400
12.3	Scheibe Nr.3 mit 6 Knoten .....	402
12.4	Stab Nr.4 im Raum .....	403
12.5	Welle Nr.5 mit 2 Knoten .....	404
12.6	Torus Nr.6 mit 3 Knoten .....	406
12.7	Scheibe Nr.7 mit 8 Knoten .....	407
12.8	Torus Nr.8 mit 8 Knoten .....	409
12.9	Stab Nr.9 in der Ebene .....	411
12.10	Hexaeder Nr.10 mit 20 Knoten .....	413
12.11	Scheibe Nr.11 mit 12 Knoten .....	416
12.12	Torus Nr.12 mit 12 Knoten .....	418
12.13	Balken Nr.13 in der Ebene .....	420
12.14	Scheibe Nr.14 mit 6 Knoten .....	421
12.15	Torus Nr.15 mit 6 Knoten .....	423
12.16	Tetraeder Nr.16 mit 10 Knoten .....	426
12.17	Tetraeder Nr.17 mit 4 Knoten .....	429
12.18	Platte Nr.18 mit 6 Knoten .....	431
12.19	Platte Nr.19 mit 16 Knoten .....	433
12.20	Platte Nr.20 mit 8 Knoten .....	436
12.21	Schale Nr.21 mit 16 Knoten .....	438
12.22	Schale Nr.22 mit 12 Knoten .....	440
12.23	Schale Nr.23 mit 8 Knoten .....	442

12.24	Schale Nr.24 mit 6 Knoten .....	444
12.25	Element / Solverübersicht Z88Aurora V2 .....	446
<b>13</b>	<b>Beispiele .....</b>	<b>447</b>
13.1	Schraubenschlüssel aus Scheiben Nr. 7 .....	454
13.1.1	Mit Z88V14 .....	455
13.1.2	Mit Z88AuroraV2 .....	463
13.2	Kranträger aus Stäben Nr. 4 .....	473
13.2.1	Mit Z88V14 .....	474
13.2.2	Mit Z88AuroraV2 .....	479
13.3	Getriebewelle mit Welle Nr. 5 .....	484
13.3.1	Mit Z88V14 .....	486
13.3.2	Mit Z88AuroraV2 .....	489
13.4	Biegeträger mit Balken Nr. 13 .....	493
13.4.1	Mit Z88V14 .....	494
13.4.2	Mit Z88AuroraV2 .....	498
13.5	Plattensegment aus Hexaedern Nr. 1 und Nr. 10 .....	502
13.5.1	Mit Z88V14 .....	503
13.5.2	Mit Z88AuroraV2 .....	509
13.6	Rohr unter Innendruck, Scheibe Nr. 7 .....	512
13.6.1	Mit Z88V14 .....	513
13.6.2	Mit Z88AuroraV2 .....	520
13.7	Rohr unter Innendruck, Tori Nr. 8 .....	522
13.7.1	Mit Z88V14 .....	523
13.7.2	Mit Z88AuroraV2 .....	529
13.8	Zweitaktmotor-Kolben .....	531
13.8.1	Mit Z88V14 .....	532
13.8.2	Mit Z88AuroraV2 .....	536
13.9	RINGSPANN-Scheibe und Tellerfeder .....	541
13.9.1	Mit Z88V14 .....	543
13.9.2	Mit Z88AuroraV2 .....	546
13.10	Flüssiggas-Tank .....	548
13.10.1	Mit Z88V14 .....	548
13.10.2	Mit Z88AuroraV2 .....	552
13.11	Motorrad-Kurbelwelle .....	554
13.11.1	Mit Z88V14 .....	556
13.11.2	Mit Z88AuroraV2 .....	561
13.12	Drehmoment-Messnabe .....	565
13.12.1	Mit Z88V14 .....	566
13.12.2	Mit Z88AuroraV2 .....	567
13.13	Ebene Rahmen .....	568
13.13.1	Mit Z88V14 .....	569
13.13.2	Mit Z88AuroraV2 .....	589
13.14	Zahnrad .....	591

13.14.1 Mit Z88V14 .....	592
13.14.2 Mit Z88AuroraV2 .....	597
<b>13.15 3D-Schraubenschlüssel .....</b>	<b>601</b>
13.15.1 Mit Z88V14 .....	601
13.15.2 Mit Z88AuroraV2 .....	613
<b>13.16 Kraftmesselement, Scheiben Nr. 7 .....</b>	<b>615</b>
13.16.1 Mit Z88V14 .....	615
13.16.2 Mit Z88AuroraV2 .....	625
<b>13.17 Kreisplatte, Platten Nr. 20 .....</b>	<b>626</b>
13.17.1 Mit Z88V14 .....	628
13.17.2 Mit Z88AuroraV2 .....	632
<b>13.18 Rechteckplatte mit 16-Knoten Platten Nr. 19 .....</b>	<b>633</b>
13.18.1 Mit Z88V14 .....	633
13.18.2 Mit Z88AuroraV2 .....	640
<b>13.19 Viertaktmotor-Kolben mit Tetraedern Nr. 16 .....</b>	<b>641</b>
13.19.1 Mit Z88V14 .....	642
<b>13.20 Automotor-Lüfterrad .....</b>	<b>649</b>
13.20.1 Mit Z88V14 .....	651
13.20.2 Mit Z88AuroraV2 .....	652
<b>13.21 Dieselkolben .....</b>	<b>655</b>
13.21.1 Mit Z88V14 .....	656
13.21.2 Mit Z88AuroraV2 .....	658
<b>13.22 Berechnung einer Formzahl .....</b>	<b>659</b>
13.22.1 Mit Z88V14 .....	660
13.22.2 Mit Z88AuroraV2 .....	665
<b>13.23 Zahndfußbeanspruchung .....</b>	<b>666</b>
13.23.1 Mit Z88V14 .....	668
13.23.2 Mit Z88AuroraV2 .....	670
<b>13.24 Vierkantrohr, Schale Nr. 24 .....</b>	<b>672</b>
13.24.1 Mit Z88V14 .....	674
13.24.2 Mit Z88AuroraV2 .....	675
<b>13.25 U-Boot aus Schalen Nr. 22 .....</b>	<b>678</b>
<b>13.26 Zahnräder aus Tetraedern Nr. 17 .....</b>	<b>684</b>
<b>13.27 Schwingende Trommel .....</b>	<b>687</b>
<b>13.28 Modalanalyse Kurbelwelle .....</b>	<b>691</b>
<b>13.29 Thermomechanische Analyse eines Löffels .....</b>	<b>694</b>
<b>13.30 Thermische Analyse eines Viertakt-Motorkolbens .....</b>	<b>700</b>
<b>13.31 Nichtlineare Berechnung einer Tellerfeder .....</b>	<b>704</b>
<b>13.32 Nichtlineare Berechnung eines Scharniers .....</b>	<b>708</b>
<b>14 Quellen und weiterführende Literatur .....</b>	<b>713</b>
<b>15 Index .....</b>	<b>719</b>