



## Leseprobe

Frank Rieg, Reinhard Hackenschmidt, Bettina Alber-Laukant

Finite Elemente Analyse für Ingenieure

Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora

ISBN (Buch): 978-3-446-44283-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-44318-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44283-2>

sowie im Buchhandel.

# Vorwort zur fünften Auflage

Unser Ziel mit diesem Buch ist wie bereits in der ersten Auflage:

*Einem Studenten der Ingenieurwissenschaften ab dem 3. Semester und dem schon im Beruf stehenden Ingenieur ausgewählte Aspekte der Finite Elemente so zu vermitteln, dass er dieses Wissen sofort zur Lösung praktischer Probleme umsetzen kann.*

Deshalb sprechen wir schon im Buchtitel von Finite Elemente *Analyse* und nicht von der Finite Elemente Methode – weil dieses riesige Fachgebiet schon lange den etwas zweifelhaften Touch einer Methode hinter sich gelassen hat und heute *das* Ingenieurtool ist, um Tragwerke zu *analysieren*. Natürlich kann man mit diesem Verfahren viel mehr unternehmen, als nur Mechanik zu betreiben – Wärmeflüsse, Elektro- und Magnetfelder, ja eigentlich allgemein Differentialgleichungen und Randwertaufgaben für verschiedene Felder – das alles kann man heute damit lösen.

Aber begonnen hat alles mit der Berechnung von mechanischen Strukturen und wir wollen uns in diesem Werk daher auch auf lineare und nichtlineare Statik, stationäre Wärmeleitung und Eigenschwingungen beschränken. Sehr wesentlich scheint uns der Ingenieurspekt zu sein – er steht nicht umsonst im Buchtitel: Das Vorgehen wurde in den fünfziger Jahren einigermaßen „intuitiv“ von den Flugzeug-Ingenieuren für statische Berechnungen von Flugzeugstrukturen entwickelt. Es ist ein Verfahren von Ingenieuren für Ingenieure!

Wir gehen daher wie folgt vor: Nach einer wirklich einfachen Darstellung des grundlegenden Vorgehens werden wir die wichtigsten Punkte der Elastizitätstheorie, der Technischen Mechanik und der Thermodynamik, soweit sie die FEA betreffen, abhandeln, um mit diesem Wissen an die Herleitung der Elementsteifigkeitsmatrizen zu gehen. Dieses theoretische Wissen ist tatsächlich unabdingbar, um FE-Rechenprogramme gezielt und gekonnt einsetzen zu können. Sodann betrachten wir den Compilationsprozeß, die Speicherverfahren und das Lösen der Gleichungssysteme, um die Unbekannten zu berechnen.

Damit Sie nun Ihr Wissen praktisch umsetzen können, fügen wir dem Buch zwei FE-Programme auf DVD bei: Das vom Erstautor programmierte Open-Source Finite-Elemente-Programm für statische Berechnungen Z88® sowie das weit darüber hinausgehende und sehr komfortable Freeware Finite-Elemente-Programm Z88Aurora®, das dann auch nichtlineare Berechnungen, stationäre Wärmeflüsse und Eigenschwingungen beherrscht. Beides sind Vollversionen, mit der *beliebig große Strukturen* gerechnet werden können – die Grenzen werden nur durch Ihren Computer hinsichtlich Hauptspeicher und Plattenplatz und Ihr Vorstellungsvermögen gezogen.

Z88 und Z88Aurora kommen lauffertig für Windows, LINUX sowie Mac OS X. Bei Z88 liefern wir auch direkt die Quellen mit, sodass Sie die theoretischen Aspekte im Programmcode studieren und gegebenenfalls erweitern können. Natürlich können Sie so auch nachvollziehen, wie Speicherverfahren, Gleichungslöser usw. in der Rechenpraxis arbeiten. Z88 ist für den Anwender absolut transparent durch Ein- und Ausgabe mit Textdateien. Es ist also ein FEA-Programm im ganz klassischen und ursprünglichen Sinne. Und wir meinen: Nur mit einem solchen Programm, bei dem Sie jeden Zahlenwert noch selbst kontrollieren können und müssen, können Sie das Grundlegende lernen. Wenn Sie dann das grundlegende Vorgehen verstanden haben, können Sie mit Z88Aurora arbeiten, das bei uns am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD mit Förderung durch die Oberfranken-Stiftung entwickelt wurde. Z88Aurora steht in *Look and Feel* den kommerziellen FEA-Programmen nicht nach und erlaubt ein sehr professionelles und zeitgemäßes Arbeiten, direkt von CAD-Daten ausgehend. Auf die bekannten kommerziellen FEA-Programme beziehen wir uns hier nicht, weil es davon kostenlos nur sehr stark eingeschränkte Versionen hinsichtlich der Strukturgrößen gibt, mit denen Sie mehrere der folgenden Beispiele gar nicht rechnen könnten. Und Quellcodes könnten wir dazu auch nicht präsentieren. Im späteren Buchteil kommen viele Praxisbeispiele, die Sie dann nachrechnen sollten. Die DVD enthält natürlich auch die Eingabedateien für alle Beispiele. Die Beispiele sind so gewählt, dass sie schrittweise die verschiedenen Aspekte der Berechnung von Tragwerken und mechanischen Strukturen erläutern.

Unser Finite Elemente Analyse Buch wurde anlässlich der vierten Auflage vollständig überarbeitet: Der Theorie teil wurde gegenüber der dritten Auflage hinsichtlich Schalenelementen (von F. Rieg), nichtlinearer Berechnung (von Dr.-Ing. C. Wehmann), stationärer Wärmeleitung (von M. Frisch, M.Sc.) und Eigenschwingungen (von Dr.-Ing. M. Neidnicht) erweitert. Der Beispielteil wurde stark erweitert und aktualisiert. Unsere Mitarbeiter M. Frisch, M.Sc., Dr.-Ing. M. Neidnicht, Dipl.-Ing. F. Nützel, Dr.-Ing. C. Wehmann und Dipl.-Ing. M. Zimmermann übernahmen das Programmieren und Testen von Z88Aurora Version 2b und lasen Korrektur. Ihnen allen sei herzlich gedankt.

Dem Hanser-Verlag danken wir für die wie immer vorbildliche Ausführung.

Wir dürfen uns ganz herzlich bei unseren Lesern bedanken, die nach wenigen Jahren eine fünfte Auflage fordern. Auch die Arbeit an diesem Buch war uns wieder ein Vergnügen und wir hoffen, dass Sie großen Nutzen aus diesem Buch ziehen werden.

*Frank Rieg, Reinhard Hackenschmidt und Bettina Alber-Laukant*

Bayreuth, im Juni 2014

# Inhalt

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

4.8	Einige Bemerkungen zur Modellbildung .....	121
4.8.1	Wahl der Elementtypen .....	121
4.8.2	Kunststoffe und Materialgesetze .....	129
4.8.3	Strukturoptimierung .....	130
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 .....	152
<b>5</b>	<b>Compilation, Speicherverfahren und Randbedingungen .....</b>	<b>163</b>
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 .....	206
5.3.6	Randbedingungen bei der nichtlinearen Finite Elemente Analyse ..	207
<b>6</b>	<b>Gleichungslöser .....</b>	<b>209</b>
6.1	Direkte Verfahren .....	210
6.1.1	Das Cholesky-Verfahren .....	212
6.2	Kondition und Skalierung .....	214
6.3	Iterative Verfahren .....	223
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
6.4	Solver für thermomechanische Probleme .....	244
6.5	Solver für Schwingungsprobleme .....	244
6.6	Gleichungslöser für die nichtlineare Finite Elemente Analyse .....	255
<b>7</b>	<b>Spannungen und Knotenkräfte .....</b>	<b>259</b>
7.1	Spannungen .....	259
7.2	Vergleichsspannungen .....	266
7.3	Knotenkräfte .....	273

<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 Sparsematrix Solver .....	323
10.1.3	Z88R: Der direkte Sparsematrix 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 Z88NL.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
13.15	3D-Schraubenschlüssel .....	601
13.15.1	Mit Z88V14 .....	601
13.15.2	Mit Z88AuroraV2 .....	613
13.16	Kraftmesselement, Scheiben Nr. 7 .....	615
13.16.1	Mit Z88V14 .....	615
13.16.2	Mit Z88AuroraV2 .....	625
13.17	Kreisplatte, Platten Nr. 20 .....	626
13.17.1	Mit Z88V14 .....	628
13.17.2	Mit Z88AuroraV2 .....	632
13.18	Rechteckplatte mit 16-Knoten Platten Nr. 19 .....	633
13.18.1	Mit Z88V14 .....	633
13.18.2	Mit Z88AuroraV2 .....	640
13.19	Viertaktmotor-Kolben mit Tetraedern Nr. 16 .....	641
13.19.1	Mit Z88V14 .....	642
13.20	Automotor-Lüfterrad .....	649
13.20.1	Mit Z88V14 .....	651
13.20.2	Mit Z88AuroraV2 .....	652
13.21	Dieselsonnen .....	655
13.21.1	Mit Z88V14 .....	656
13.21.2	Mit Z88AuroraV2 .....	658
13.22	Berechnung einer Formzahl .....	659
13.22.1	Mit Z88V14 .....	660
13.22.2	Mit Z88AuroraV2 .....	665
13.23	Zahnfußbeanspruchung .....	666
13.23.1	Mit Z88V14 .....	668
13.23.2	Mit Z88AuroraV2 .....	670
13.24	Vierkantrohr, Schale Nr. 24 .....	672
13.24.1	Mit Z88V14 .....	674
13.24.2	Mit Z88AuroraV2 .....	675
13.25	U-Boot aus Schalen Nr. 22 .....	678
13.26	Zahnrad aus Tetraedern Nr. 17 .....	684
13.27	Schwingende Trommel .....	687
13.28	Modalanalyse Kurbelwelle .....	691
13.29	Thermomechanische Analyse eines Löffels .....	694
13.30	Thermische Analyse eines Viertakt-Motorkolbens .....	700
13.31	Nichtlineare Berechnung einer Tellerfeder .....	704
13.32	Nichtlineare Berechnung eines Scharniers .....	708
<b>14</b>	<b>Quellen und weiterführende Literatur .....</b>	<b>713</b>
<b>15</b>	<b>Index .....</b>	<b>719</b>

In diesem Kapitel werden 32 Beispiele (mit u.U. weiteren Unterbeispielen) behandelt, wovon die Beispiele 1 bis 24 sowohl in der Open Source Version von Z88 als auch mit der Z88Aurora Free-ware durchgeführt werden können. Die Beispiele 25 bis 32 sind speziell auf die Verwendung mit Z88Aurora ausgelegt. Für alle Beispiele sind die jeweiligen Eingabefiles in den entsprechenden Directories „Z88V14“ und „Z88Aurora“ auf der DVD vorhanden. Lediglich die Berechnung muss noch durchgeführt werden. Sie können alle Dateien von Z88V14 in Aurora einlesen, wie, wird später erklärt. Die Beispiele 4, 6, 7, 13, 17 und 18 sind analytisch leicht nachrechenbar.

Die ersten Beispiele sind sehr ausführlich Schritt für Schritt beschrieben, damit Sie schnell mit dem Vorgehen vertraut werden. Die späteren Beispiele setzen dann die eigentliche Z88-Bedienung voraus, und es wird mehr auf die Hintergründe der jeweiligen Aufgabe eingegangen. Es geht vom Einfachen zum Komplizierten, daher sollten Sie die Beispiele der Reihe nach durcharbeiten.

Falls Beispiele nicht anlaufen, kann ein Speicherproblem vorliegen. Stehen weitere Programme im Speicher, besonders diese fetten und gierigen Speicherfresser wie Office-Pakete? Alle Beispiele wurden auf verschiedensten Computersystemen und Betriebssystemen getestet, und die kleineren Beispiele laufen selbst auf älteren Computern. Aktuelle PCs rechnen sehr große Z88-Strukturen ohne irgendwelche Probleme, wie das Beispiel 21 zeigt. Die bislang größte gerechnete Struktur hatte 12 Mio. Freiheitsgrade und lief auf einem 64-Bit PC mit 64-Bit Windows bzw. mit 64-Bit LINUX. Passen Sie ggf. Z88.DYN an. Beachten Sie die .LOG-Dateien: Hier steht drin, wenn der Speicher nicht reicht.

Nachdem Sie die fertigen Beispiele probiert haben, sollten Sie die Beispiele in Ihrem CAD System entwerfen. Exportieren Sie Ihre Modelle/Zeichnungen bei einem AutoCAD-kompatiblen CAD-System als DXF-Dateien und konvertieren Sie sie mit Z88X in Z88-Dateien für Z88 V14 OS oder als STL- bzw. STEP-Datei für Z88Aurora. Falls der Z88-DXF Konverter Z88X Ihre DXF-Dateien nicht sauber konvertiert, dann wiederholen Sie besonders die Schritte 3 und 5 des Kapitels 10.7.2. Haben Sie die Punkte sauber „geschnappt“? Falls nichts klappt, probieren Sie ein anderes CAD Programm.

Haben Sie ein 3D-CAD-System mit integriertem Automeshesher, dann können Sie FE-Netze im ANSYS-PREP7, COSMOS-oder NASTRAN-Format ausgeben und mit Z88G bzw. Z88ASY in Z88 V14 OS oder mit der Import-Funktion in Z88Aurora in Z88-Eingabedateien konvertieren.

#### **Hinweise Z88V14:**

Die Ein- und Ausgabefiles sind teilweise gekürzt wiedergegeben, um nicht unnötig Seiten zu füllen. Es soll nur das Wesentliche gezeigt werden. Alle Beispiele können Sie jederzeit selbst starten.

Betrachten Sie auch die von den Z88-Modulen erzeugten Protokoll-Dateien .LOG. Variieren Sie die Eingabefiles, insbesondere die Netzgenerator-Eingabefiles der Beispiele 1, 5 und 7. So bekommt man am schnellsten ein Gefühl für Z88.

Beachten Sie, dass bei Gleitkommazahlen in einem Computer 0 (Null) niemals echt Null ist, sondern als Näherung dargestellt wird. Daher können selbst Eingaben, die in Z88I1.TXT als 0 eingegeben wurden, in Ausgabefiles Z88O0.TXT als sehr kleine Zahlen wieder auftauchen, bedingt durch Formatierungen des Laufzeitsystems. Das ist normal. Das gilt natürlich verstärkt für echt berechnete Werte, wie z. B. Verschiebungen in Z88O2.TXT, Spannungen in Z88O3.TXT und Knotenkräften in Z88O4.TXT. Solche Werte sind immer relativ zu anderen Werten zu sehen: Ist in Z88O2.TXT die größte berechnete Verschiebung beispielsweise 0.1 mm, dann ist eine andere Verschiebung mit z. B. 1.234E-006 mm als de-facto-Null anzusehen.

Bei ANSYS-PREP7, COSMOS- oder NASTRAN-Dateien prüfen Sie zunächst mit Z88R im Testmode, welchen Speicher Sie brauchen und wie gut die Knotennummerierung ist. Gegebenenfalls lassen Sie in Z88 V14 OS den Cuthill-McKee-Algorithmus Z88H laufen. Oder Sie nehmen besser gleich einen der Sparsematrix-Solver.

### Hinweise Z88AuroraV2:

Die Beispiele sind jeweils als komplettes Projektverzeichnis zur Betrachtung vorhanden oder es können die Importdateien zur eigenen Erstellung der Beispiele verwendet werden. Der Ablauf der FE-Analyse in Z88Aurora verläuft immer über den dargestellten Workflow.

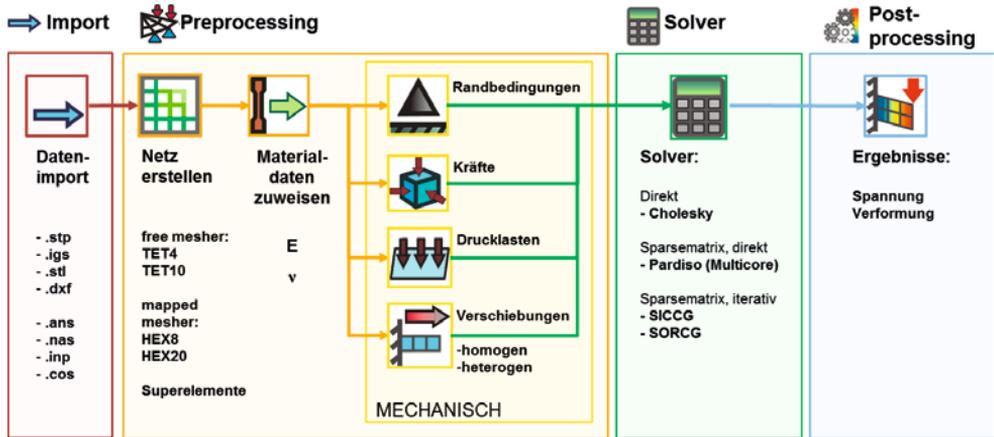


Bild 13.0-1: Vorgehensweise Finite Elemente Analyse am Beispiel einer statischen mechanischen Analyse

Z88Aurora zeichnet sich durch die intuitive Bedienung des Prä- und Postprozessor aus. Das Projektdatenmanagement erfolgt mit einer Projektmappenverwaltung. Eine Statusanzeige sorgt für besseren Bedienkomfort. Bei der Bedienung sind mehrere Menüleisten von Bedeutung. Den Schnellzugriff auf alle Funktionen von Z88Aurora bieten die vier Iconmenüleisten. Die Hauptfunktionen der ersten Iconmenüleiste, wie z.B. Präprozessor, öffnen zusätzliche Seitenmenüs. Die anderen drei Iconmenüleisten enthalten diverse Ansichtsm Manipulationen, Farbeinstellungen, Importoptionen und die Präprozessorfunktionalitäten.

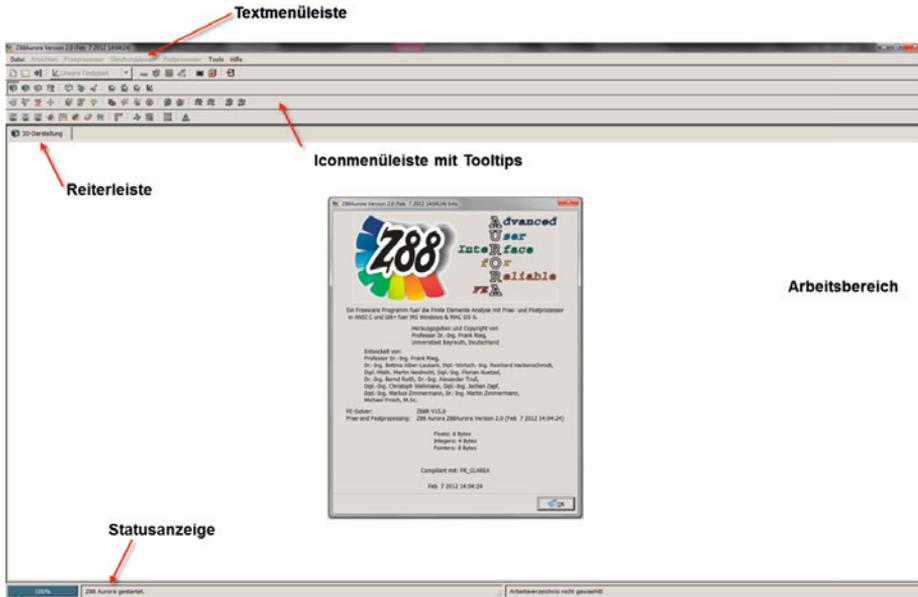


Bild 13.0-2: Grafische Oberfläche von Z88Aurora

In der Textmenüleiste sind alle Funktionalitäten der Iconmenüleiste und der Seitenmenüs enthalten; die jeweiligen Icons sind den Textbefehlen vorangestellt. Je nach dem momentanen Arbeitsschritt, existieren mehrere Reiter in der Reiterleiste, wie z.B. die Materialkarten im Materialmenü, zwischen denen gewechselt werden kann. Mit der Betätigung des „X“ an jeder Reiterleiste kann der Reiter geschlossen werden.

Die Iconmenüleiste ist in verschiedene Bereiche unterteilt: die Projektmappenverwaltung, die Analyseart, die kontextsensitiven Seitenmenüs und den Support. Je nach Stand der Analyse sind einzelne Icons grau hinterlegt, da die Funktionalität zum aktuellen Zeitpunkt nicht verfügbar ist.

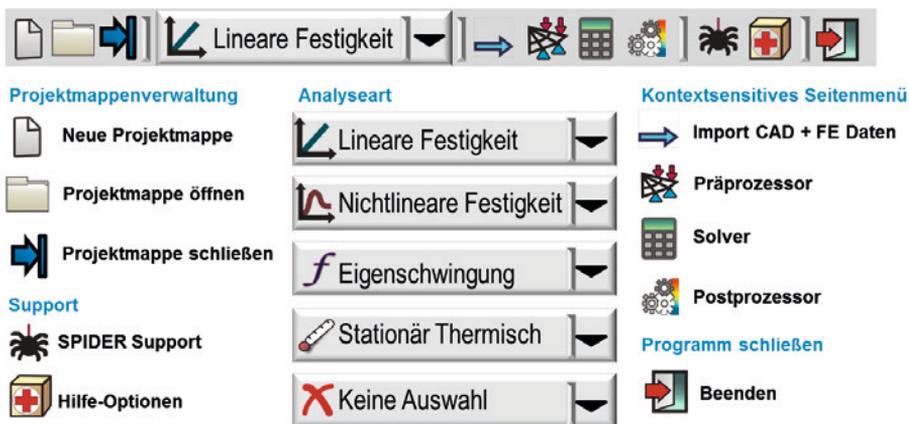


Bild 13.0-3: Haupticonleiste für die Bedienung

## Kurzbeschreibung der Beispiele

**Beispiel 1: Gabelschlüssel.** Ebenes Scheibenproblem mit Scheiben Nr. 7 und Netzgenerator-einsatz.

*Lernziele Z88V14 OS:* CAD- und Netzgeneratoreinsatz bei krummlinigen ebenen Strukturen, Spannungsanzeige im Plotprogramm. Hinweis: Dieses Beispiel steht bereits als erstes Einführungsbeispiel zusätzlich ladefertig bei den Z88V14 OS-Lademodulen in den jeweiligen BIN-Unterverzeichnissen.

*Lernziele Z88Aurora:* Projekterstellung, Import eines Z88V14 OS Modells, Festlegung Scheibendicke, Materialzuweisung, Einführung in das Picking: Element- und Knotenpicking, Darstellung Pickingpunkte, Erstellung der FE-Struktur aus Superelementen, Randbedingungszuweisung, Starten der Berechnung, Auswahl der Analyseverfahren, Darstellungsoptionen im Postprozessor.

**Beispiel 2: Kranträger.** Räumliches Fachwerk mit Stäben Nr. 4.

*Lernziele Z88V14 OS:* Nutzen der verschiedenen Ansichten und räumlichen Rotationsmöglichkeiten im Plotprogramm.

*Lernziele Z88Aurora:* Import einer AUTOCAD-DXF-Struktur, Einrichtung Werkzeuggesten, Verwendung der Workflowunterstützung SPIDER, Knotenpicking, Elementparameterdefinition, Erstellung eines neuen Materials.

**Beispiel 3: Getriebewelle.** Lineare Struktur mit Wellen Nr. 5 und Kraftangriffen in verschiedenen Ebenen, statisch überbestimmt.

*Lernziele Z88V14 OS:* Einsatz der Wellenelemente, Wählen der Randbedingungen bei Finiten Elementen mit 6 Freiheitsgraden/Knoten.

*Lernziele Z88Aurora:* Erstellung von Strukturelementen, Knoten und Elemente Erstellung per Hand, Elementparameter Welle, Randbedingungen.

**Beispiel 4: Ebener Träger, mehrfach statisch überbestimmt.** Beidseitig fest eingespannter Balken Nr. 13.

*Lernziele Z88V14 OS:* Einsatz von Balken Nr. 13, Wahl der Randbedingungen und Interpretieren der Ergebnisse.

*Lernziele Z88Aurora:* Erstellung von Strukturelementen, Knoten- und Elementerstellung per Hand, Elementparameter Welle, Randbedingungen.

**Beispiel 5: Plattensegment in Tortenstückform.** Allgemeines räumliches Problem mit Hexaedern Nr. 10 als Superelemente und Netzgenerierung von Hexaedern Nr. 1.

*Lernziele Z88V14 OS:* Einsatz des Netzgenerators bei krummlinigen, räumlichen Elementen, Nutzen der Spannungsanzeige, verschiedenen Ansichten und räumlichen Rotationsmöglichkeiten im Plotprogramm.

*Lernziele Z88Aurora:* Erstellung des Netzgenerators, Kantenpicking.

Wenn Sie dieses Beispiel gerechnet haben, wäre es eine gute Idee, mit dem Netzgenerator Hexaeder Nr. 10 mit 20 Knoten anstelle der 8-Knoten Hexaeder erzeugen zu lassen (was für ihn ein Kinderspiel ist). Aber Sie müssen dann neue Randbedingungen eingeben, weil sich ja die Knotennummern geändert haben.

**Beispiel 6: Rohr unter Innendruck** von 1.000 bar. Axialsymmetrisches Problem, gelöst als Scheibenproblem mit Scheiben Nr. 7.

*Lernziele Z88V14 OS:* Nutzen von Symmetrieeigenschaften einer Struktur und Wahl der Randbedingungen und Streckenlasten, Spannungsanzeige im Plotprogramm.

*Lernziele Z88Aurora:* Einlesen eines Z88V14 Projektes, Definition Scheibendicke.

**Beispiel 7: Querpreßverband.** Axialsymmetrisches Problem mit Tori Nr. 8 und Netzgenerator.

*Lernziele Z88V14 OS:* Arbeiten mit Toruselementen, Einsatz des Netzgenerators mit Netzverdichtung, Spannungsanzeige im Plotprogramm. Sodann Lösung des Problems mit Toruselementen Nr. 15. Vergleich der Ergebnisse.

*Lernziele Z88Aurora:* Netzgeneratorsteuerung, Knotenpicking mit der Alt-Taste.

**Beispiel 8: Zweitakt-Kolben.** Es soll ein Kolben für einen Zweitakt-Ottomotor berechnet werden. Als Last wirkt der Verbrennungsdruck, die Kolbenbolzenaugen werden als Lager definiert.

*Lernziele Z88V14 OS:* Verwenden komplexer Teile, die ursprünglich aus 3D-Standardsoftware-Programmen stammen und mit den dort vorhandenen Automeshern vernetzt wurden. Da hier die Biegeeinflüsse nicht dominierend gegenüber den Druckkraft-Einflüssen sein werden, sollten für eine erste Studie Tetraeder Nr. 17 mit linearem Ansatz ausreichen. Es wird eine Flächenlastdatei Z88I5.TXT erzeugt.

*Lernziele Z88Aurora:* Import einer NASTRAN-Struktur, Import STL-Geometrie, Erzeugung Tetraedernetz, Netzcheck, Flächenpicking, Druckrandbedingungen bei Volumenelementen, Setmanagement, Solverparameter Pardiso, Auswahl Maschinenparameter.

**Beispiel 9: RINGSPANN-Scheibe.** Es soll eine sog. RINGSPANN-Scheibe berechnet werden, die als Kraftübersetzer wirken soll.

*Lernziele Z88V14 OS:* Berechnung von Federn mit der Finite Elemente Analyse, d. h. große Wege. Hexaeder Nr. 10 mit quadratischem Ansatz.

*Lernziele Z88Aurora:* Import von Z88V14 Projektdaten.

**Beispiel 10: Flüssiggas-Tank.** Es soll ein Druckbehälter für Flüssiggas berechnet werden, der in einen PKW eingebaut ist. Er ist an beiden Seiten an den Böden mit einem Ringflansch befestigt. In einer Seitencrash-Simulation soll geprüft werden, wie stark die Verformungen und Spannungen unter einer Last von 1.200.000 N sind.

*Lernziele Z88V14 OS:* Anbringen von Randbedingungen und Üben des Zusammenspiels mit AutoCAD.

*Lernziele Z88Aurora:* Einlesen von Z88V14 Projektdaten, Anzeige der Knotennummerierung in der Oberfläche.

**Beispiel 11: Motorrad-Kurbelwelle.** Eine Kurbelwelle wird aus einem 3D-CAD-System übernommen.

*Lernziele Z88V14 OS:* Das geschickte Anbringen von Randbedingungen bereits im CAD-Programm. Da starke Biegeeinflüsse zu erwarten sind, werden Tetraeder Nr. 16 mit quadratischem Ansatz genutzt.

*Lernziele Z88Aurora:* STL-Import, Vernetzung mit Tetgen, Zuweisung Vernetzeregeln, Vernetzungsparameter ändern, Projizierte Flächenlast, Verwendung Sparse-Matrix-Iterationsolver, Flächenpicking und Seterstellung.

**Beispiel 12: Drehmoment-Meßnabe.** Es liegt ein Verformungselement für eine Drehmoment-Meßnabe vor.

*Allgemeine Lernziele:* Geschicktes Abbilden der Technischen Mechanik durch die Randbedingungen. Zunächst werden geradlinige Dreiecksscheiben Nr. 3 genutzt, später krummlinige Dreiecksscheiben Nr. 14.

**Beispiel 13: Ebener Rahmen.** Ein Dreigelenkrahmen lässt sich analytisch sehr einfach rechnen. Mit einem FEA-Programm geht das genauso gut, wenn man die fehlenden Elementtypen „Balken mit Gelenk“ geschickt umgeht.

*Lernziele Z88V14 OS:* Berechnung von ebenen Fachwerken, Simulation von biegemomentenfreien Gelenken.

*Lernziele Z88Aurora:* Erstellung Elementsets für gerichtete Netzerstellung, Erstellung FE-Struktur aus Superelementen, Materialdaten und Einheitenkonsistenz.

**Beispiel 14: Zahnrad.** Wir betrachten ein Zahnrad, dessen Nabe auf die Welle aufgepresst wird. Dabei soll der Eigendruck des Preßverbands  $100 \text{ N/mm}^2$  betragen. Es soll die Verformung untersucht werden, die durch die Aufweitung der Nabe bis in die Verzahnung geleitet wird.

*Allgemeine Lernziele:* Kennenlernen des sog. virtuellen Fixpunkts, Beurteilung der mit Automeshern erzeugten Netze.

*Lernziele Z88V14 OS:* Übernahme der in Pro/ENGINEER so benannten Schalenelemente (sind in Wirklichkeit Scheiben) in Z88 V14.

*Lernziele Z88Aurora:* Import Nastran: Einstellung „Scheiben“, Import STEP-Geometrie, Tetraedervernetzung, Druckrandbedingung bei Tetraederelementen, Ergebnisvergleich Scheibe Nr. 7, Scheibe Nr. 14 und Tetraeder Nr. 16.

**Beispiel 15: Schraubenschlüssel aus Pro/ENGINEER.** Ein Schraubenschlüssel im 3D-CAD Programm Pro/ENGINEER wurde als 3D-Modell erzeugt.

*Allgemeine Lernziele:* Hier wird gezeigt, wie die verschiedenen FE-Elementtypen, wie sie von Automeshern verwendet werden, sinnvoll eingesetzt werden. Das Zusammenspiel zwischen Elementanzahl, Elementtyp und Berechnungsergebnis wird hier sehr deutlich gemacht.

*Lernziele Z88Aurora:* Tool „Abstand messen“.

**Beispiel 16: Kraftmeßelement.** Es soll das Verformungselement einer sog. Kraftmeßdose mit Z88 berechnet werden.

*Allgemeine Lernziele:* Die Auswirkungen auf die von Z88 errechneten Verschiebungen bei der Auswahl unterschiedlicher Elementtypen und der schrittweisen Netz-Verfeinerung eines einfachen Körpers sollen dem Leser ein Gefühl für das richtige Maß bei der Voreinstellung von Parametern bei der FE Analyse vermitteln.

*Lernziele Z88V14 OS:* Hier wird sehr ausführlich das Arbeiten mit dem DXF-Konverter Z88X demonstriert.

*Lernziele Z88Aurora:* Erstellung Linienlast.

**Beispiel 17: Kreisplatte.** Es wird eine einfache Kreisplatte berechnet, die zuvor als Pro/ENGINEER-3D-Struktur „konstruiert“ wurde.

*Lernziele Z88V14 OS:* Kennenlernen der Vorgehensweise bei Plattenberechnungen, Übernahme eines fertigen FE-Netzes.

*Lernziele Z88Aurora:* Import einer Nastran-Datei mit Importmöglichkeit Platten

**Beispiel 18: Rechteckplatte.** Ein Plattenproblem mit 16-Knoten Lagrange Platten Nr. 19.

*Allgemeine Lernziele:* Erzeugung einer Superstruktur aus 8-Knoten Platten Nr. 20 mit AutoCAD, DXF-Export mit Z88X, dann Netzgenerierung mit Z88N von Platten Nr. 19. Anschließend Plattenberechnung mit den Sparsematrix-Solvern.

**Beispiel 19: Otto-Viertakt-Kolben.** Es soll ein Kolben für einen BMW-Motorradmotor (vereinfacht) berechnet werden. Als Last wirkt der Verbrennungsdruck durch Einzelkräfte, die Kolbenbolzenaugen werden als Lager definiert.

*Allgemeine Lernziele:* Einsatz des Sparsematrix-Iterations-Solvers für eine größere Struktur.

**Beispiel 20: Automotor-Lüfterrad aus Kunststoff.** Dieses Beispiel weist nicht weniger als 1,2 Millionen Freiheitsgrade auf. Dieses Beispiel verlangt einen modernen, gut ausgestatteten Computer, und Sie können mit dieser Struktur die Grenzen Ihres Computers ausloten.

*Lernziele Z88Aurora:* Schnelle Ansicht für große Bauteile aktivieren, Solverparameter editieren für SORCG und SICCG, Filtern von Ergebnissen im Postprozessor.

**Beispiel 21: Dieselkolben.** Ein räumliches Problem mit Tetraedern Nr. 16.

*Allgemeine Lernziele:* Ausgehend von einer NASTRAN-Datei, die in Pro/ENGINEER erzeugt wurde, werden der Konverter Z88G und der Sparsematrix-Iterations-Solver genutzt. Hier geht es also um das Arbeiten mit einer Struktur, die aus einem CAD-Programm kommt und dabei die Flächenlastdatei Z88I5.TXT verwendet.

**Beispiel 22: Ermittlung einer Formzahl.** Die Maschinenelemente-Literatur gibt für Wellenabsätze sog. Formzahlen  $\alpha_k$  für die Berechnung der Kerbspannungen an. Hier wird gezeigt, wie derartige Formzahlen mittels FEA ermittelt werden. Als Besonderheit wird hier die Superstruktur nicht per CAD-Programm entworfen, sondern sie wird „von Hand“ aufgestellt, um sehr leicht auf verschiedene Kerbradien reagieren zu können.

**Beispiel 23: Zahnfußbeanspruchung.** Hier wird von der Geometrieerzeugung ausgehend ganz grundlegend – ohne die Berücksichtigung der verschiedenen Parameter der DIN 3990 – die qualitative Abschätzung der Zahnfußbeanspruchung bei einem Zahnrad gezeigt.

*Lernziele Z88Aurora:* Anzeige Elementnummerierung und Elementinformationen in der Z88Aurora Oberfläche.

**Beispiel 24: Vierkantrohr als Schalenstruktur.** Ein Vierkantrohr wird tordiert, mit Schalen Nr. 24 berechnet, und die Ergebnisse werden interpretiert.

*Allgemeines Lernziel:* Schalenberechnung.

**Folgende Beispiele sind speziell für Z88AuroraV2 konzipiert:**

**Beispiel 25: U-Boot.** Ein in einem CAD-System als Schale konstruiertes Unterseeboot wird mit Hilfe der NASTRAN-Schnittstelle in Z88Aurora importiert und dort mit dem Mapped-Mesher Z88MVS zur Volumenschale aufgedickt.

*Lernziele Z88Aurora:* Mapped-Mesher für Volumenschalen, Clipping einer großen Struktur.

**Beispiel 26: Zahnrad aus Tetraedern Nr. 17.** In diesem Beispiel wird ein Zahnrad, das als ABAQUS INP-Datei vorliegt, in Z88Aurora importiert und berechnet. Die Berechnung erfolgt mit einer statischen Linienlast, ersetzt aber nicht eine Beanspruchungsberechnung nach DIN 3990.

*Lernziele Z88Aurora:* Import ABAQUS-Datei, Anwendung Linienlasten.

**Beispiel 27: Schwingende Trommel.** Das Fell einer Basstrommel aus Hexaeder-Elementen Nr. 1 wird auf Eigenschwingungen untersucht. Die Kleinste ist hauptverantwortlich für den tiefen Grundklang.

*Lernziele Z88Aurora:* Eigenschwingung mit Randbedingungen.

**Beispiel 28: Modalanalyse Kurbelwelle.** Eine kleine Kurbelwelle aus einem Motorrad-Motor ist aus Tetraedern Nr. 10 zusammengesetzt und wird auf Eigenschwingungen untersucht.

Jedwede zyklische Belastung sollte weit weg des Frequenzbandes liegen, um keine Resonanzen hervorzurufen.

*Lernziele Z88Aurora:* Eigenschwingung ohne Randbedingungen.

**Beispiel 29: Thermische Analyse eines Dieselkolbens.** Der aus Beispiel 21 bekannte Dieselkolben wird mit zwei Temperaturen beaufschlagt, der Temperaturverlauf wird betrachtet.

*Lernziele Z88Aurora:* Thermische Analyse, Wärmeleitung, thermische Randbedingungsauflage, Postprozessor Temperatur.

**Beispiel 30: Thermomechanische Analyse eines Suppenlöffels aus Tetraedern Nr. 16.** Es wird simuliert, dass der Löffel mit einer Hand festgehalten und eine Suppe gegessen wird.

*Lernziele Z88Aurora:* Thermomechanische Analyse, Wärmestromdefinition, thermomechanische Randbedingungsauflage, Material mit thermischen Kennwerten anlegen, Ergebnisinterpretation thermische Dehnungen und Spannungen.

**Beispiel 31: Nichtlineare Berechnung einer Tellerfeder.** Eine Tellerfeder wird unter Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearitäten berechnet. Zum Einsatz kommen Elemente vom Typ Torus Nr. 8.

*Lernziele Z88Aurora:* Durchführung von nichtlinearen Berechnungen, insbesondere der Parametrierung des Gleichungslösers.

**Beispiel 32: Nichtlineare Berechnung eines Scharniers.** Dieses Beispiel hat die nichtlineare Analyse eines Scharniers zum Inhalt. Es wird der komplette Präprozessing-Vorgang beschrieben; der Elementtyp ist Tetraeder Nr. 16.

*Lernziele Z88Aurora:* Durchführung von nichtlinearen Berechnungen und Gewinnung von Erfahrung mit dem Ziel, zu erkennen, wann nichtlineare Analysen erforderlich sind.

## ■ 13.1 Schraubenschlüssel aus Scheiben Nr. 7

Ein Gabelschlüssel soll durch ein Anzugsmoment belastet werden. Dazu wird ein Kräftepaar im Schlüsselmaul entsprechend dem Moment angebracht; die Festlager werden an den Stellen, an denen die Schlosserhand anpackt, angenommen. Der Gabelschlüssel soll durch 7 Superelemente Scheibe Nr. 7 abgebildet werden, mit dem Netzgenerator werden 66 Finite Elemente erzeugt.

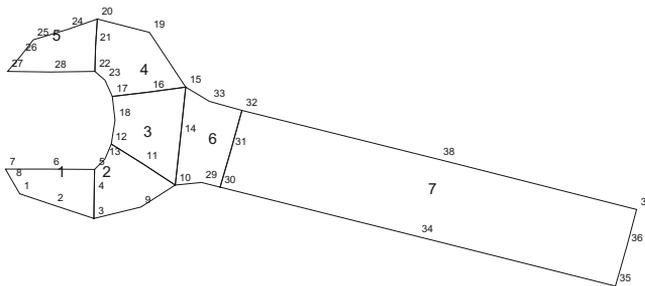


Bild 13.1-1: Superstruktur des Gabelschlüssels

### 13.1.1 Mit Z88V14

Die Beispieldateien dazu finden Sie im Beispieldirectory B1. Kopieren Sie die Dateien in Ihr Z88-Arbeitsdirectory; das ist auf den Z88-Datenträgern bzw. Internetdateien bereits erfolgt, damit Sie sofort starten können:

Z88X.DXF	CAD-Eingabefile
Z88I2.TXT	Randbedingungen
Z88I5.TXT	Flächenlasten (mit einer 0 in der ersten Zeile)
Z88MAN.TXT	Steuerparameter für Solver
Z88MAT.TXT	Materialsteuerdatei
51.TXT	Materialdatei
Z88ELP.TXT	Elementparameter
Z88INT.TXT	Integrationsordnungen

Führen Sie einfach folgende Schritte aus, um Z88 kennenzulernen:

#### CAD:

In diesem ersten Beispiel sollen Sie die CAD-Superstruktur nur betrachten, aber noch nicht erzeugen. Das kommt in späteren Beispielen. Z88X.DXF in Ihr CAD-Programm importieren und betrachten. So würden Sie sie normalerweise selbst gezeichnet haben. Ändern Sie nichts und verlassen Sie Ihr CAD-Programm ohne Speichern, Konvertieren usw. Wenn Sie kein passendes CAD-System haben, lassen Sie diesen Schritt aus.

#### Z88:

**Z88X**, Konvertierung von Z88X.DXF nach Z88NI.TXT. Vorgehen:

Windows: Im Z88-Commander Button Z88X, Button *DXF* → *Z88NI*, *Run-Button*. Programm Z88X beenden.

LINUX/UNIX: Im Z88-Commander unter CAD Konverter: Button *DXF* → *Z88NI*.

**Z88O**, Superstruktur betrachten. Vorgehen:

Windows: Im Z88-Commander *Button Z88O*. Falls Sie gleich auf den Run-Button gehen, braucht Sie die Fehlermeldung nicht zu stören, denn Z88O erwartet als Standard Z88I1.TXT, das noch nicht vorhanden ist. Sie wollen aber ohnehin Z88NI.TXT nutzen: Vorgehen: *Diskettenbutton* > *Z88NI.TXT*, *Run-Button*. Dann Umschalten mit dem *Wireframe-Button* und über *Menü* > *Labels* > *Alles* die Knoten- und Elementnummern anzeigen lassen. Mit der Taste *Bild hoch* zoomen. Programm Z88O beenden.

LINUX/UNIX: Im Z88-Commander *Button Z88O*. Falls Sie gleich auf den Run-Button gehen, braucht Sie die Fehlermeldung nicht zu stören, denn Z88O erwartet als Standard Z88I1.TXT, das noch nicht vorhanden ist. Sie wollen aber ohnehin Z88NI.TXT nutzen: Vorgehen: *Button Datei* > *Z88NI.TXT*, *Run-Button*. Dann Umschalten mit dem *Wireframe-Button* und über *Menü* > *Labels* > *Alles* die Knoten- und Elementnummern anzeigen lassen. Mit der Taste *Bild hoch* zoomen. Programm Z88O beenden.

**Z88N**, Netzgenerator, liest Z88NI.TXT und erzeugt Z88I1.TXT. Vorgehen:

Windows: Im Z88-Commander Button *Z88N*, *Run-Button*. Programm Z88N beenden. Hinweis: Das Beenden des gerade gelaufenen Z88-Moduls sollten Sie grundsätzlich immer machen,

damit bei später größeren Strukturen immer der maximale Hauptspeicher zur Verfügung steht.

LINUX/UNIX: Im Z88-Commander Button *Z88N*.

**Z88O**, finite Elemente Struktur betrachten. Vorgehen:

Windows: Im Z88-Commander Button *Z88O, Run-Button*.

LINUX/UNIX: Im Z88-Commander Button *Z88O, Run-Button*.

**Z88R**, berechnet Verformungen, Spannungen und Knotenkräfte. Vorgehen:

Windows: Im Z88-Commander Button *Z88R, Cholesky-Button, Run-Button*.

LINUX/UNIX: Im Z88-Commander *Radiobutton Berechnung, Button Cholesky*.

**Z88O**, Finite Elemente Struktur verformt betrachten. Vorgehen:

Windows: Im Z88-Commander Button *Z88O, Run-Button, Wireframe-Button, Verformt-Button*. Die Verformungen werden standardmäßig um den Faktor 100 vergrößert, was für dieses Beispiel etwas viel ist. Daher: *Menü > Faktoren > Verschiebungen >* für FUX und FUY je 10 eintragen. Ferner können Sie sich, da ja Z88R bereits gelaufen ist, auch die Vergleichsspannungen anzeigen lassen. Probieren Sie nacheinander: Button *Vergleichsspannungen Eckknoten*, Button *Vergleichsspannungen Element* gemittelt und Button *Vergleichsspannungen Gaußpunkte* (bei diesem nur unverformte Struktur möglich, also *Unverformt-Button*).

LINUX/UNIX: Im Z88-Commander Button *Z88O, Run-Button, Wireframe-Button, Verformt-Button*. Die Verformungen werden standardmäßig um den Faktor 100 vergrößert, was für dieses Beispiel etwas viel ist. Daher: *Menü > Faktoren > Verschiebungen >* für FUX und FUY je 10 eintragen. Ferner können Sie sich, da ja Z88R bereits gelaufen ist, auch die Vergleichsspannungen anzeigen lassen. Probieren Sie nacheinander: Button *Spannungen Eckknoten*, Button *Spannungen pro Element* und Button *Spannungen Gausspunkte* (bei diesem nur unverformte Struktur möglich, also *Unverformt-Button*).

Der Netzgenerator soll nun aus der Superelementstruktur 66 Finite Elemente erzeugen. Elementdicke je 10. Netzgenerierung: In diesem Beispiel sind lokale und globale Achsen nicht richtungsgleich: Lokale  $x$ -Richtung bei Superelement 1 längs der lokalen Knoten 1 und 2, die den globalen Knoten 1 und 3 entsprechen. Die lokale  $y$ -Richtung von SE 1 ist durch lokale Knoten 1 und 4 bestimmt, die den globalen Knoten 1 und 7 entsprechen. Beachte ferner: Superelemente, die eine gemeinsame Seite haben, müssen an dieser Seite eine absolut identische Unterteilung haben. So schließen SE 1 und SE 2 längs der Linie 3-4-5 an: Die Unterteilungen in  $y$ -Richtung müssen genau gleich sein. Hier jeweils 3 Unterteilungen.

Dieses Beispiel, wie oben gezeigt, durchrechnen. Sodann kann man experimentieren: In Z88NI.TXT das SE 7 als sinnvolle Abwandlung wie folgt zerlegen:

```

7 7      („Zerlege Superelement 7 in Finite Element Scheibe Nr. 7
6 L 3 E  und unterteile in x-Richtung 6mal geometrisch aufsteigend und in y-Richtung
           3mal äquidistant“)
```

Ebenso könnten die SE 1 bis SE 5 jeweils nach innen verdichtet werden:

```

1 7
3 L 3 E
```

2 7  
 3 L 3 E  
 .... und so weiter

**HINWEIS:** In jeder Zeile können Kommentare stehen, nachdem alle erforderlichen Daten eingetragen sind. Mindestens ein Leerzeichen trennt das letzte Datum vom Kommentar. Das können Sie in Ihren eigenen Files ebenso machen. Je Zeile maximal 250 Zeichen insgesamt.

## EINGABEN

Bei dem Beispiel soll von einer Superstruktur, also einem sehr groben FE-Netz ausgegangen werden. Der Netzgenerator soll aus der Superstruktur eine FE-Struktur generieren. Also ist zunächst das Netzgenerator-Eingabefile Z88NI.TXT zu entwerfen. Das erfolgt in CAD durch das in Kapitel 10.5 erläuterte Vorgehen. Wenn Sie ohne CAD-System arbeiten, erzeugen Sie die Datei Z88NI.TXT per Editor oder Textverarbeitungs-Programm. Die Superstruktur soll wie folgt aussehen vgl. Bild 13.1\_1:

### mit CAD-Programm:

Gehen Sie nach der Beschreibung Kapitel 10.4 bzw. Z88- bzw. Z88Aurora-Handbuch (vgl. DVD) vor. Vergessen Sie nicht, auf dem Layer Z88EIO die Superelement-Informationen per TEXT-Funktion abzulegen, also

```
SE 1 7 7 3 E 3 E (1. SE, SE Typ 7, FE Typ 7, unterteile in x 3 x gleich, in y 3 x gleich)
SE 2 7 7 3 E 3 E (2. SE, SE Typ 7, FE Typ 7, unterteile in x 3 x gleich, in y 3 x gleich)
SE 3 7 7 3 E 3 E
SE 4 7 7 3 E 3 E
SE 5 7 7 3 E 3 E
SE 6 7 7 1 E 3 E
SE 7 7 7 6 E 3 E
```

und auf dem Layer Z88GEN die allgemeinen Informationen

```
Z88NI.TXT 2 38 7 76 0 0 (2-DIM,38 Knoten,7 SE,76 FG,Flags 0)
```

Exportieren Sie die Zeichnung als DXF-Datei mit dem Namen Z88X.DXF und starten Sie anschließend den CAD-Konverter Z88X mit der Option „von Z88X.DXF nach Z88NI.TXT“. Er wird die Netzgenerator-Eingabedatei Z88NI.TXT erzeugen, die Sie anschließend mit Z880 betrachten sollten

### mit Editor:

Netzgenerator-Eingabefile Z88NI.TXT (vgl. Kapitel 11.9) mit Editor schreiben:

```
2 38      7 76 0 0 (2-DIM, 38 Knoten, 7 Superelemente, 76 FG, Flags 0)
1 2 22.040 32.175 (Knoten 1, 2 FG, X- und Y-Koordinate)
2 2 31.913 28.798 (Knoten 2, 2 FG, X- und Y-Koordinate)
3 2 43.781 24.826
4 2 43.880 32.373
5 2 43.980 39.424
..... (Koordinaten für Knoten 6 ... 36 hier nicht dargestellt)
```



Kräftepaar als Drehmoment erhält und dass sich die Schraube selbst und nicht der Schlüssel dreht), vgl. Bild 13.1-3:

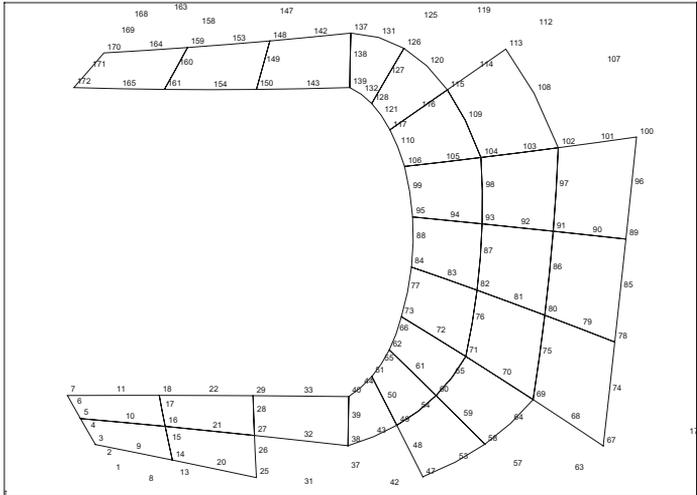


Bild 13.1-3: Schlüsselmaul, vergrößert, um die Knotennummern zu betrachten

Wir lesen die Knoten 11 und 143 ab. Die hier gezeigten Bilder sind direkt mit Z880 erzeugt. Ebenso ermittelt man im Plotprogramm oder CAD-System die Knoten, an denen der Schlüssel festgehalten wird und gibt die Randbedingungen ein:

#### mit Editor:

File der Randbedingungen Z88I2.TXT durch Editieren aufstellen:

16				(16 Randbedingungen gesamt)
11	2	1	-7143	(Knoten 11 am FG 2 Kraft -7143 gegeben)
143	2	1	7143	(Knoten 143 am FG 2 Kraft +7143 gegeben)
216	1	2	0	(Knoten 216 am FG 1 Verschiebung 0 gegeben)
216	2	2	0	
220	1	2	0	
220	2	2	0	
227	1	2	0	
227	2	2	0	
231	1	2	0	
231	2	2	0	
238	1	2	0	
238	2	2	0	
242	1	2	0	
242	2	2	0	
249	1	2	0	
249	2	2	0	

Nun müssen noch begleitend die Materialsteuerdatei Z88MAT.TXT, die Materialdatei 51.TXT, die Elementparameterdatei Z88ELP.TXT, die Integrationsordnungsdatei Z88INT.TXT sowie die Solversteuerdatei Z88MAN.TXT editiert werden (was für Sie bereits in den jeweiligen Beispieldateien erfolgt ist):

**Z88MAT.TXT:**

1                    *(insgesamt ein Materialgesetz)*  
 1 66 51.txt   *(es gilt von Element 1 bis 66 und heißt 51.txt, vgl. 11.5)*

**51.TXT:**

206000 0.3   *(E-Modul 206.000, Querkontraktionszahl 0.3, vgl. 11.6)*

**Z88ELP.TXT:**

1                                    *(insgesamt nur ein Satz Elementparameter)*  
 1 66 10 0 0 0 0 0 0   *(er gilt von Element 1 bis 66, Dicke 10, Rest ohne Belang, vgl. 11.7)*

**Z88INT.TXT:**

1                    *(insgesamt nur ein Satz Integrationsordnungen)*  
 1 66 3 3   *(er gilt von Element 1 bis 66, INTORD=3, INTOS=3, vgl. 11.8)*

**Z88MAN.TXT:** Hier sind nur wichtig, vgl. 11.10:

IBFLAG 0        *(keine Balken in der Struktur)*  
 IPFLAG 0        *(keine Platten in der Struktur)*  
 IHFLAG 0        *(keine Schalen in der Struktur)*  
 KDFLAG 0        *(keine Berechnung von Radial- und Tangentialspannungen)*  
 ISFLAG 1        *(Vergleichsspannungen nach GEH)*

Diese Datenstrukturen sind auf mehrere Dateien verteilt, damit unser Prä- und Postprozessor Z88Aurora V2 damit optimal arbeiten kann – für Z88 V14 erscheint dies etwas umständlich, wurde aber aus Gründen der Kompatibilität derart angelegt.

Nunmehr können der Cholesky-Solver Z88R -choly gestartet werden. Während des Laufs von Z88R stellen wir fest, dass 14.848 Speicherplätze in der Gesamtsteifigkeitsmatrix GS benötigt werden. NKOI, also benötigte Plätze im Koinzidenzvektor KOI, wird mit 540 ausgewiesen. Reicht also ebenfalls. Wo kommt die Zahl 540 her? Es liegen 66 Finite Elemente vom Typ Scheibe Nr. 7 mit je 8 Knoten vor, also  $66 \times 8 = 528$ . Die 540 kommen dadurch zustande, weil Z88R immer aus Sicherheitsgründen für das letzte Finite Element 20 Knoten ansetzt. Also wird NKOI hier:  $65 \times 8 + 20 = 540$ .

## AUSGABEN

Der Solver Z88R liefert folgende Ausgabefiles:

**Z8800.TXT** die aufbereiteten Strukturwerte. Ist hauptsächlich für Dokumentationszwecke vorgesehen, zeigt aber auch, ob das, was man mit Z88NI.TXT dem Netzgenerator aufgetragen hat, richtig „rübergekommen“ ist.

**Z8801.TXT** aufbereitete Randbedingungen: Für Dokumentationszwecke. Und: Ist das, was Sie in **Z88I2.TXT** an Randbedingungen eingegeben haben, richtig interpretiert worden?

**Z8803.TXT** die berechneten Spannungen: Welche Spannungen in Z8803.TXT gegeben werden, hängt von den Steuerparametern in Z88MAN.TXT ab.

**Z8804.TXT** die berechneten Knotenkräfte.

Das OpenGL-Plotprogramm **Z880** kann Vergleichsspannungen auf drei verschiedene Methoden anzeigen: knotenbezogen, gemittelt pro Element und direkt in den Gaußpunkten. Die Anzeigen sind, wie ersichtlich, sehr unterschiedlich. Das liegt daran, dass hier sehr starke Spannungsspitzen auftreten, die Sie am besten im dritten Bild sehen können. Das ist nicht immer so: Es gibt durchaus FE-Strukturen, die für alle drei Darstellungsvarianten in etwa die gleichen Maximalspannungen anzeigen. Dies ist dann ein Hinweis auf ausgeglichene Spannungsverläufe.

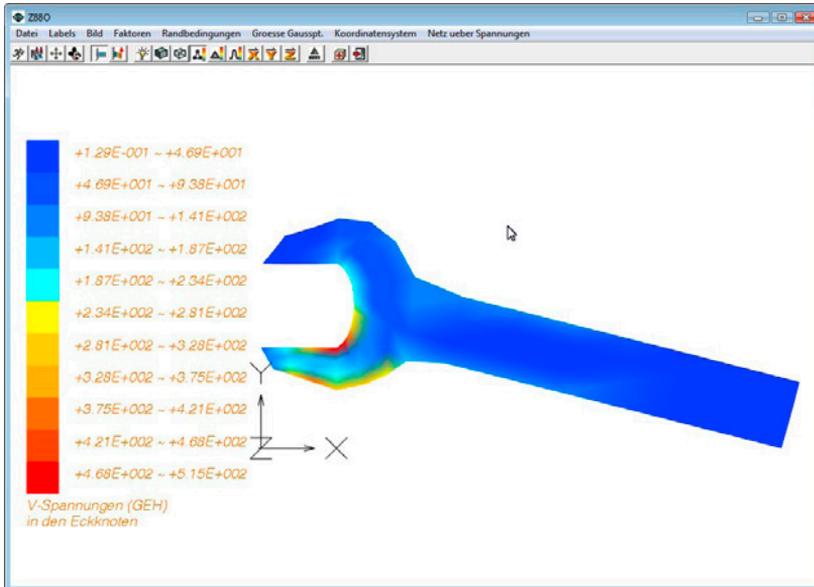


Bild 13.1-4: 1. Darstellungsmethode: Spannungen in Eckknoten (die in Wahrheit aus den um den Knoten gruppierten Gaußpunkten berechnet werden)

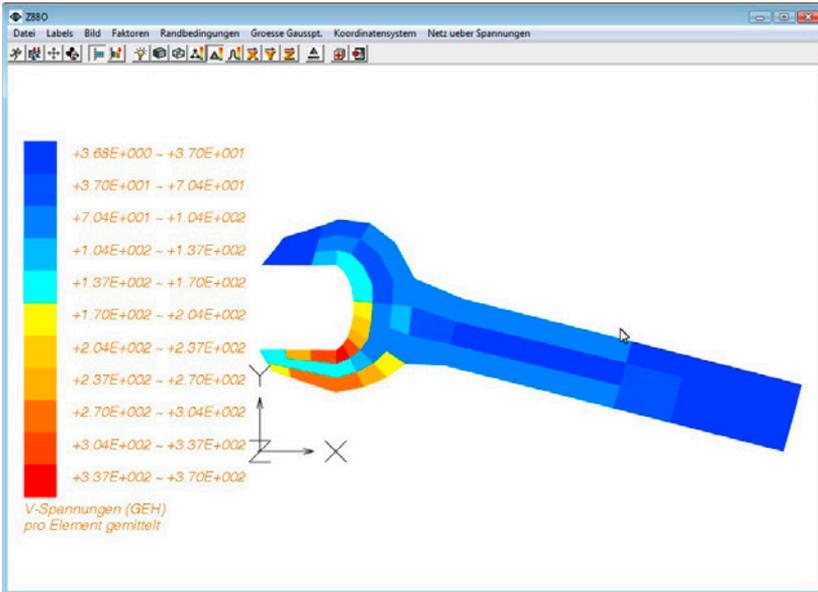


Bild 13.1-5: 2. Darstellungsmethode: Spannungen über die Gaußpunkte eines jeweiligen Elements gemittelt

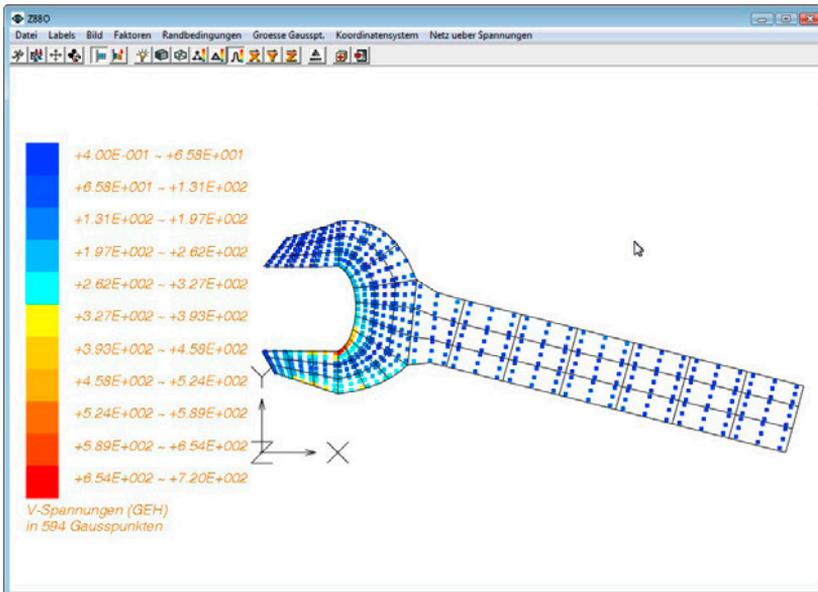


Bild 13.1-6: 3. Darstellungsmethode: Spannungen direkt in den Gaußpunkten – die präziseste Vorgehensweise (vgl. Beispiel 13.7). Liefert aber nicht so schöne bunte Bilder wie die anderen beiden Methoden

# Index

## Symbole

3D-CAD-Programm 122

## A

Algorithmus von Cuthill-McKee 180

AutoCAD 451, 452, 570, 615, 616, 617, 618

Automesher 180, 202, 447, 612

## B

Balken 3, 13, 493

Balkenelement 19, 183, 184, 570

Balkenfachwerk 106, 108, 123

Balken Nr. 2 mit 2 Knoten im Raum 628

Balkentheorie 63, 263

Bandbreite 176, 177, 180

Bandspeicherverfahren 174, 176, 196

Beispiele vi, 3, 20, 65, 72, 73, 182, 185, 290, 447, 448, 449, 451, 453, 503

Biegeträger 493

## C

calloc 165, 171

CG-Verfahren 227

Characterverarbeitung 165

Cholesky-Verfahren 212, 213, 214, 215, 219, 242

Cholesky-Zerlegung 230

Compactmodus 593, 606

Compilation 10, 17, 20, 163, 164, 189, 190, 195, 201, 274

Compilieren 219

Computer Aided Optimization 131

COSMOS-Format 305, 447

COSMOS Konverter 305

C-Programm 165, 170

Crout-Zerlegung 212

Cuthill-McKee 242

Cuthill-McKee-Algorithmus 353, 448, 566, 642, 651

## D

Datei der Randbedingung 619

Diskretisierung 63, 64

Doolittle-Zerlegung 212

Drehmomentmeßnabe 565

Dreieckslast 106

Dreiecksmatrix 177, 211

Dreieckszerlegung 210

Dreigelenkbogen 569

Druckbehälter 451, 551

Durchlaufträger 13, 19, 106, 108, 123, 263, 264

## E

Ebener Spannungszustand 124

Ebener Träger 450

Eigenschwingungen 150

Eigenwertproblem 150

Einzelschrittverfahren 226

Elastizitätsmodul 34, 35, 36, 266

Elastizitätstheorie v, 1, 3, 69, 259

Element-Steifigkeitsmatrix 6, 9, 14, 112, 263

Elementtangentialmatrizen 152

Exportieren 447, 504

## F

Fachwerk 122, 450

Fangmodi 618

Finite Elemente Analyse v, 2, 3, 5, 63, 64, 163, 165, 174, 191, 209, 212, 214, 225, 226, 260, 451

Flächenlast 91, 92, 627

Formänderungsarbeit 67

Formfunktion 72

Fundamentaleigenschaft 72, 73, 280

Funktionale 3

## G

Gabelschlüssel 450

Gauß-Legendre-Quadratur 81, 82, 84

Gaußpunkt 260

Gauß-Seidel-Verfahren 226

Gauß-Verfahren 210

GEH 267

Gesamtproblem 20

Gesamtschrittverfahren 225

Gesamt-Steifigkeitsmatrix 9, 10, 17, 18, 20, 191, 324, 651

Gestaltoptimierung 131

Gestaltsänderungsenergie-Hypothese 267

Getriebewelle 123, 450, 484

Gitterrost-Verfahren 1

Gleichstreckenlast 90, 91

Gleichungslöser vi, 21, 209,  
242, 322  
Gleichungssystem 6, 7, 8, 9, 11,  
12, 19, 20, 164, 209, 210,  
213, 215, 223, 229, 230,  
235, 324

**H**

Hexaeder Nr. 10 mit 20 Knoten  
450  
Hüllenspeicherung 180

**I**

Integration 81  
Integrationsordnung 81  
Interpolationsfunktion 281  
INTORD 81, 336  
Isotropie 36, 37  
Iterationsolver 223, 321  
iterative Verfahren 223

**J**

Jacobi-Determinante 87, 88,  
91, 201  
Jacobi-Matrix 85, 282  
Jacobi-Verfahren 196, 225, 226,  
227  
Jennings-Speicherverfahren  
174, 182, 196  
JOR-Verfahren 227

**K**

Knotenkoordinaten 164, 165  
Knotenkraft 275  
Knotenkräfte 273  
Knotennumerierung 180, 197,  
284  
Knotennumerierung 448  
Knotenzahldifferenz 177, 178  
Koinzidenz 165, 283, 285, 287  
Koinzidenzliste 164, 165, 192,  
284, 287  
Koinzidenzvektor 166, 167, 171,  
261, 277, 283, 286, 643, 651  
Konditionszahl 215, 229  
Konvergenzverhalten 224  
Koordinatensystem 591  
Kraft 259  
Kraftmeßdose 452, 615  
Kraftmeßelement 124, 452,  
615, 620, 625  
Kranträger 123, 450, 473

Kunststoffe 129  
Kurbelwelle 451, 554, 555, 556

**L**

Lager 3, 8, 14, 19, 20, 451,  
453, 591  
Lagrange-Polynom 280  
Lastverteilung 209, 620  
LR-Zerlegung 211  
LU-Zerlegung 175, 180, 196,  
211

**M**

Massenmatrix 150  
Materialgesetz 618  
Materialmatrix 41, 69, 260  
MAXGS 170, 172, 173, 308,  
566, 593, 606, 643, 651  
MAXKOI 170, 172, 173, 308,  
593, 606, 643, 651  
MAXSOR 323  
Methode von Ritz 3  
Motif 713, 714

**N**

NASTRAN-Format 305  
Natürliche Koordinaten 286  
Netzgenerator 283  
Netzgeneratordatei 618  
Netzgenerierung 450, 452  
Newton-Cotes Formel 81  
Nicht-Nullelemente-Speicherung  
174, 190, 196  
NIFLAG 618  
Normalspannungs-Hypothese  
267, 268

**O**

Offsetvektor 166, 167, 261  
OpenGL 333  
Ottomotor 451

**P**

Plattenbiegung 42, 91  
Plattenprobleme 25  
Plattensegment 450, 502, 678,  
684  
Pointer 112, 165, 167, 170,  
171, 184, 186, 191  
Pointervektor 182, 183, 185,  
189, 191, 192, 195, 201,  
215, 219, 274

Polynom 280  
Polynomgrad 72  
positiv definit 212  
Proportionalitätsgrenze 34

**Q**

Querdehnung 35  
Querkontraktionszahl 35, 36,  
266  
Querpreßverband 451, 522

**R**

Rahmen 106, 108  
Randbedingung 8, 9, 12, 13,  
198  
Reaktionskräfte 275  
Relaxationsparameter 227, 230  
Rendern 334  
RINGSPANN-Scheibe 243, 451  
Rohr unter Innendruck 450,  
512, 522  
Rückrechnen 11  
Rückrechnung 210, 259

**S**

Schalen 134  
Schalenelemente 134  
Scheibenproblem 450, 612  
Schraubenschlüssel 64, 288,  
289, 452, 454, 601, 610  
Schubanteil 42  
Schubmodul 35  
Schubspannung 38  
Schubspannungs-Hypothese  
267, 272  
Serendipity-Element 64, 166,  
281, 283, 289, 624, 626  
Serendipity-Hexaeder 261  
Serendipity-Klasse 73  
Serendipity Scheibe 75, 79,  
177, 180, 604, 606, 612  
Serendipity Scheibendreieck  
75  
Serendipity-Tetraeder 74  
Shift-Faktor 231  
SICCG 231  
Skalierungsverfahren 215  
Skyline-Verfahren 174, 180,  
181, 182, 215  
Solver 209, 307, 309, 323  
SORCG 230  
SOR-Verfahren 227  
Spannung 67, 260, 263, 612

Spannungsanzeige 336  
 Spannungsberechnung 259, 266  
 Spannungs-Dehnungs-Schaubild 34  
 Speicherverfahren  $v$ ,  $vi$ , 21, 163, 174, 180, 182, 196, 197, 209  
 Spektralradius 224  
 SSORC 230  
 Stab 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 63, 122, 123, 126, 128, 166, 263  
 Streckenlast 89  
 Strukturoptimierung 131  
 Superpositionsprinzip 36, 37, 163

## T

Temperaturanalyse 148  
 Testmodus 592, 606, 607, 608, 609, 610, 611

Tetraederkoordinaten 83  
 Topologieoptimierung 131  
 Torsionsbalken 63, 122, 126  
 Toruselemente 141

## U

Umfahrungssinn 284

## V

Verfahren der Konjugierten Gradienten 227  
 Vergleichsspannung 266, 622  
 Verschiebung 5, 8, 12, 14, 199, 265, 345, 381  
 Verschiebungen 337  
 Verschiebungsfeld 65, 71  
 Verschiebungsgrößen-Verfahren 8, 20  
 Verzerrung 126  
 Verzerrungs-Verschiebungs-Beziehung 39

Verzerrungs-Verschiebungs-Transformationsmatrix 70, 260  
 Virtueller Fixpunkt 592  
 Vorkonditionierungs-Matrix 229

## W

Wärmeleitfähigkeitsmatrix 149  
 Welle 123  
 Wellenelement 263, 264

## Z

Z88G 305  
 Z8800.TXT 322  
 Z8801.TXT 322  
 Z8802.TXT 322  
 Z880.UGL 334  
 Zahnrad 452, 591  
 Zoomen 603  
 Zugspannung 263  
 Zugstab 5, 6, 35, 67