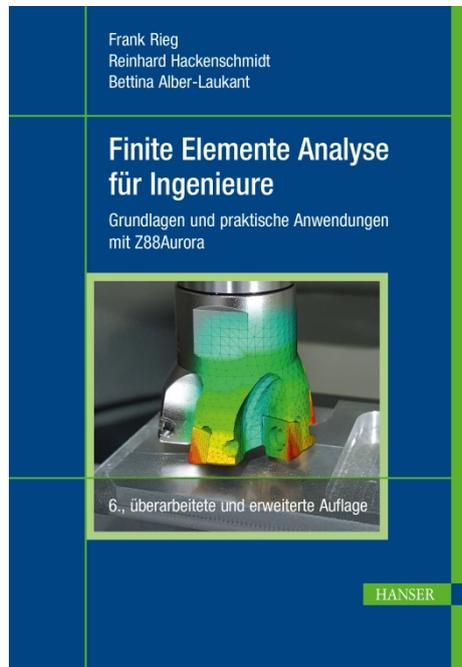


HANSER



Leseprobe

zu

„Finite Elemente Analyse für Ingenieure“

von Frank Rieg, Reinhard Hackenschmidt und
Bettina Alber-Laukant

Print-ISBN: 978-3-446-45639-6
E-Book-ISBN: 978-3-446-46062-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45639-6>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur sechsten 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 Ingenieuraspekt 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, stehen Ihnen zwei FE-Programme sowie eine umfangreiche Beispielsammlung unter www.feabuch.z88.de zum kostenlosen Download zur Verfügung. 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, Eigenschwingungen und Kontakt 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 Beispiele sind so gewählt, dass sie schrittweise die verschiedenen Aspekte der Berechnung von Tragwerken und mechanischen Strukturen erläutern. Sie können sie ebenfalls unter www.feabuch.z88.de kostenlos downloaden.

Unser Finite Elemente Analyse Buch wurde anlässlich der sechsten Auflage vollständig überarbeitet: Der Theorieteil wurde gegenüber der vierten bzw. fünften Auflage durch folgende Mitarbeiter deutlich erweitert: Dipl.-Ing. D. Billenstein und Dr.-Ing. F. Nützel (Kontaktrechnung), K. Deese, M.Sc. und S. Hautsch, M.Sc. (Topologieoptimierung), C. Dinkel, M.Sc. und F. Hüter, M.Sc. (Wärmeleitung). Der Beispielteil wurde stark erweitert und aktualisiert. Die eben genannten Herren sowie unsere Mitarbeiter P. Diwisch, M.Sc., J. Glamsch, M.Sc., C. Glenk, M.Sc., Dipl.-Ing. C. Kleinschrodt, C. Lange, M.Sc., M. Roppel, M.Sc., T. Weiß, M.Sc., Dipl.-Ing. J. Wittmann und A. Zahn, M.Sc. übernahmen das Programmieren und Testen von Z88Aurora V5 und lasen Korrektur. Den Hauptteil der Programmierung sowie deren Koordination übernahm wieder unser „Chefprogrammierer“ Dr.-Ing. M. Zimmermann. 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 sechsten 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 2019

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 Z880 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

■ 13.25 U-Boot aus Schalen Nr. 22

Ein Unterseeboot der Klasse 212A der Bundesmarine, das als Schalenstruktur in Pro/ENGINEER konstruiert wurde, wird mit Hilfe der NASTRAN-Schnittstelle in Z88Aurora importiert und dort zur Volumenschale aufgedickt. Berechnet werden die Verformung und Spannungen des U-Bootrumpfes bei einer Tauchtiefe von 50 m. Das U-Boot befindet sich in einer Art Schwebezustand im Wasser. Daher wird es in Z88Aurora mit einem virtuellen Fixpunkt praktisch „schwebend“ im Raum fixiert.

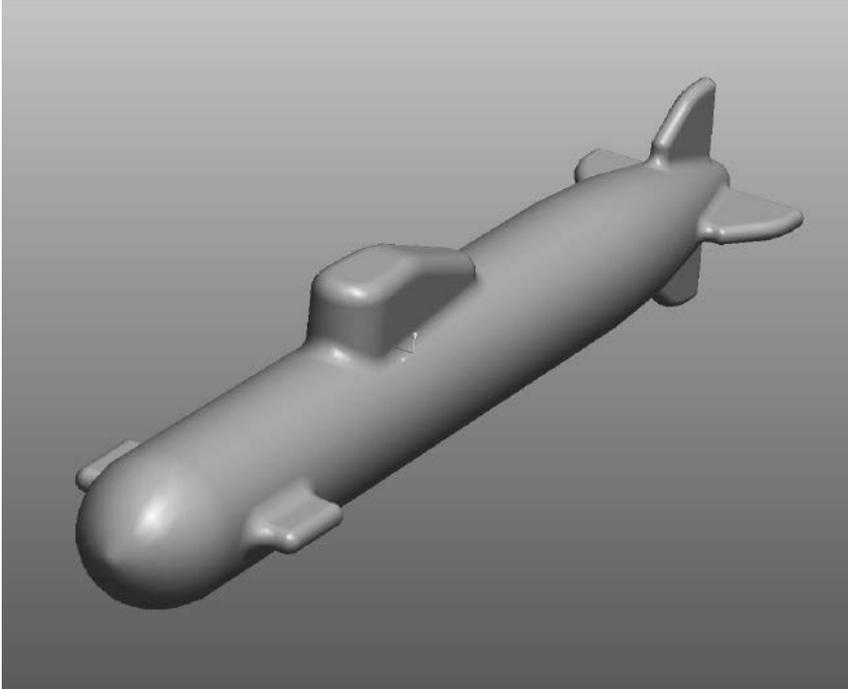


Bild 13.25-1: Geometrie des U-Bootes in Pro/ENGINEER

Neuen Projektordner erstellen

Erstellen Sie einen neuen Projektordner .

Import NASTRAN

Die Beispieldatei "u-boot.nas" aus „z88_beispiele_z88aurora/b25/Nastran-Datei“ wird im Import-Kontextmenü als NASTRAN-Datei importiert. Wählen Sie die Importmöglichkeit „Schale“ aus.

Erstellung der FE-Struktur aus Superelementen

Die konventionelle Schalenstruktur des U-Bootes soll im nächsten Schritt zu Volumenschalen vernetzt werden. Wechseln Sie in das *Präprozessormenü* → *Superelemente*. Die Volumenschalenstruktur soll eine Dicke von 20 mm besitzen:

1. Dicke vorgeben: Wert „20“.
2. Verwaltung: „Hinzufügen“ der neuen Vernetzungsregel.
3. FE-Struktur erzeugen: „Netz erstellen“.

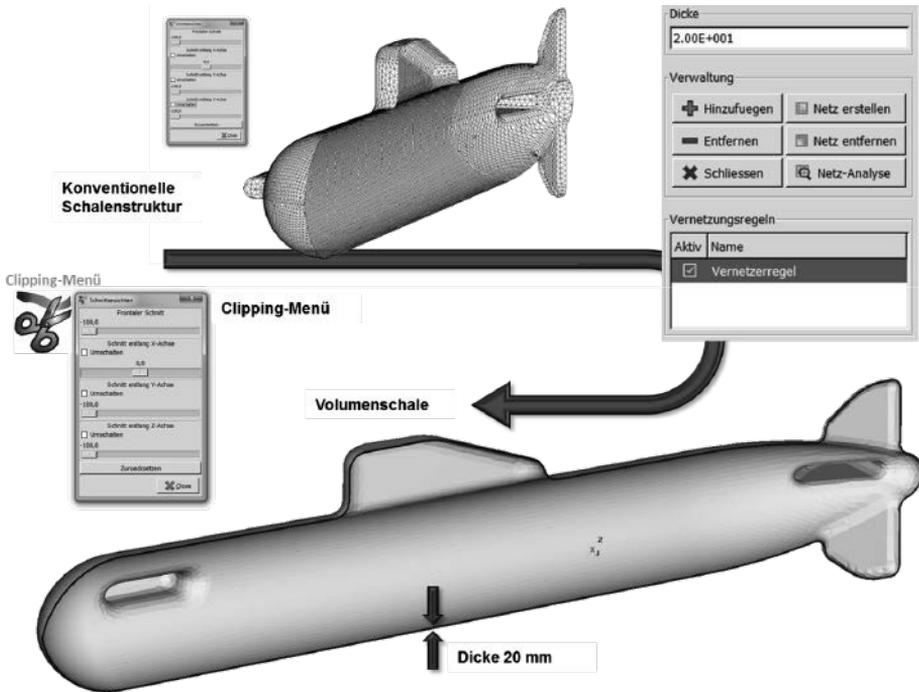


Bild 13.25-2: Erzeugung von Volumenschalen

Clipping

Mit Hilfe der Clipping-Funktion (Menüreiter Ansichten) kann kontrolliert werden, dass die konventionelle Schalenstruktur zu einer Struktur aus Volumenschalen aufgedickt wurde.

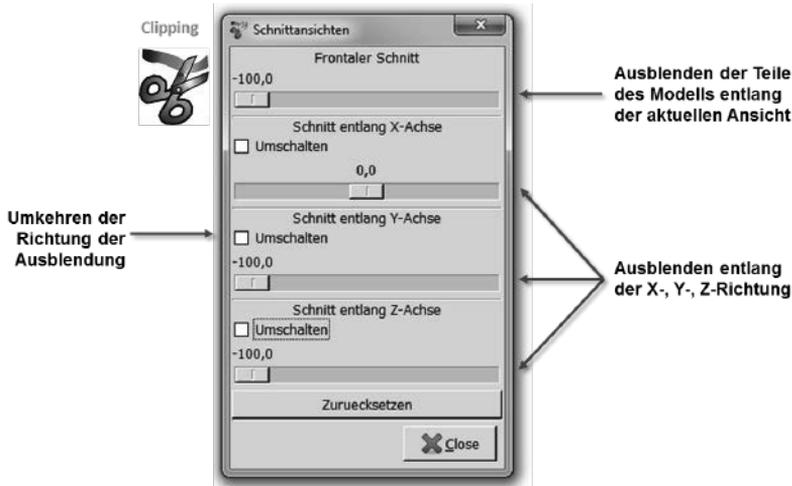


Bild 13.25-3: Clipping-Menü

Material erstellen

Verwenden Sie das Material Baustahl S235JR aus der Z88Aurora-Materialdatenbank.

Flächenpicken – Knotenpicken

Wechseln Sie in das „Picking-Kontextmenü“ und „Knotenpicking“ und legen Sie nun zwei Knoten-Sets, „X_Richtung“ und „Z_Richtung“, für den virtuellen Fixpunkt an. Des Weiteren ist ein Flächen-Set „Mantelflaeche“ anzulegen. Dieses Flächen-Set stellt die gesamte Außenfläche des U-Bootes dar und erhält die Druckrandbedingung. Im Kontextmenü „Flaechen-Picking“ wird eine Oberflächenfacette ausgewählt, der Schieberegler für den „Winkel“ auf den Wert „50“ geschoben und mittels des Buttons „Flaechen“ die gesamte Außenflächen gepickt.

Randbedingungen

Button *Praeprozessor* → *Randbedingungen Zuweisen*. → Im Kontextmenü werden den Knoten-Sets und dem Flächen-Set nun Randbedingungen zugewiesen. Auf die gesamte Mantelfläche wirkt der Wasserdruck mit 0.5 N/mm^2 . Die Knoten-Sets werden in der Weise festgehalten, dass das U-Boot „frei“ im Wasser schwebt, für die FEA dennoch statisch bestimmt gelagert ist.

1. Festhaltung: Set „Z_Richtung“, Richtung X, Y, „Verschiebung“, Wert 0, Name „XY_fest“.
2. Festhaltung: Set „X_Richtung“, Richtung Y, Z, „Verschiebung“, Wert 0, Name „YZ_fest“.
3. Druck: Set „Mantelflaeche“, Druck, Wert 0.5, Name „Wasserdruck“.

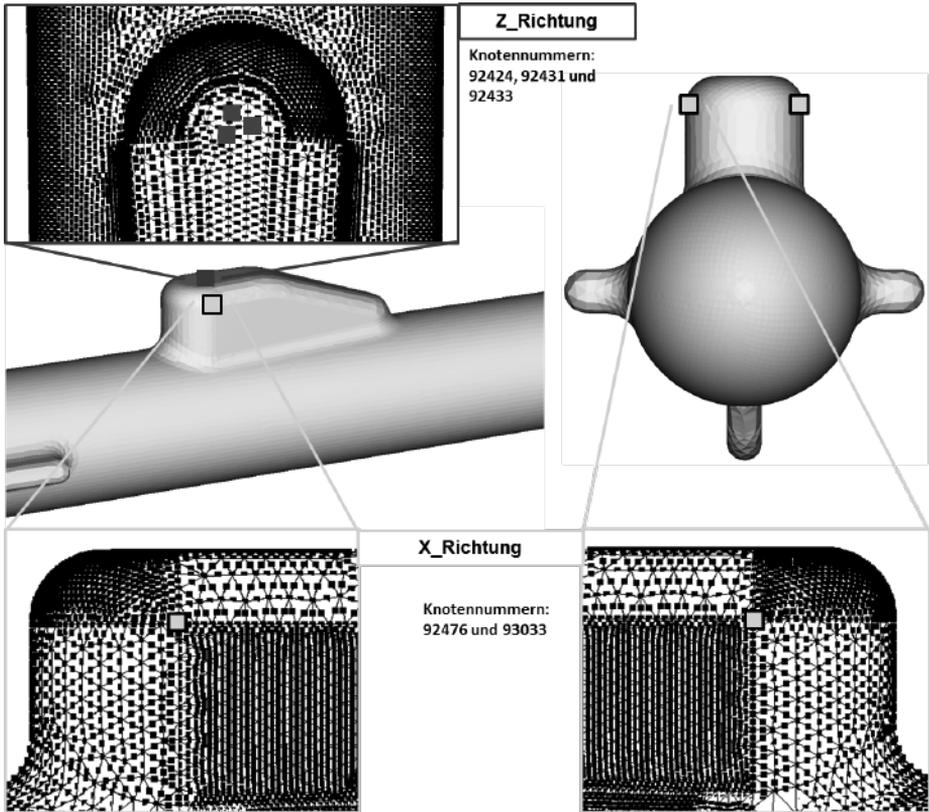


Bild 13.25-4: Knoten-Sets für virtuellen Fixpunkt

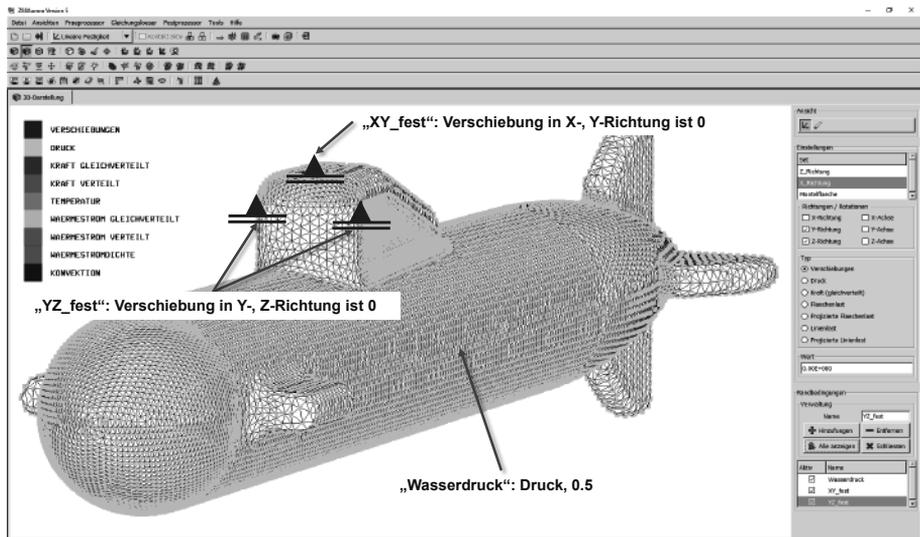


Bild 13.25-5: Randbedingungen

Berechnung starten

Starten Sie die Berechnung mit dem „Pardiso-Solver“.

Ausgaben

Der Pardiso-Solver liefert folgende Gesamtverschiebung und Spannungen in den Eckknoten:

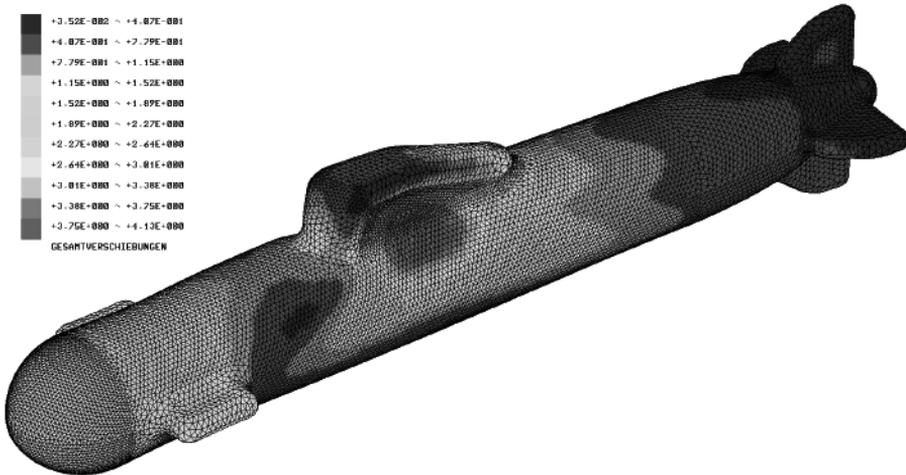


Bild 13.25-6: Darstellung der Ergebnisse: Gesamtverschiebung

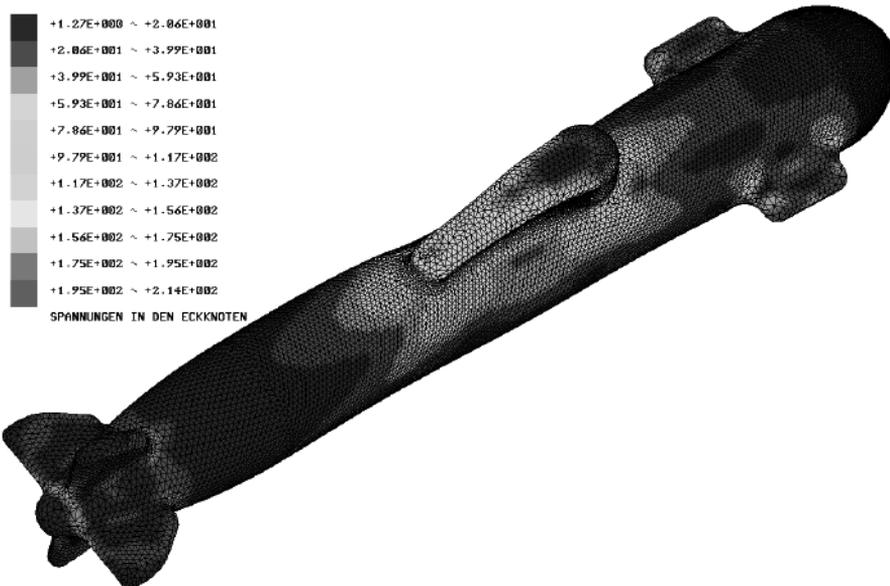


Bild 13.25-7: Darstellung der Ergebnisse: Vergleichsspannungen nach GEH in den Eckknoten

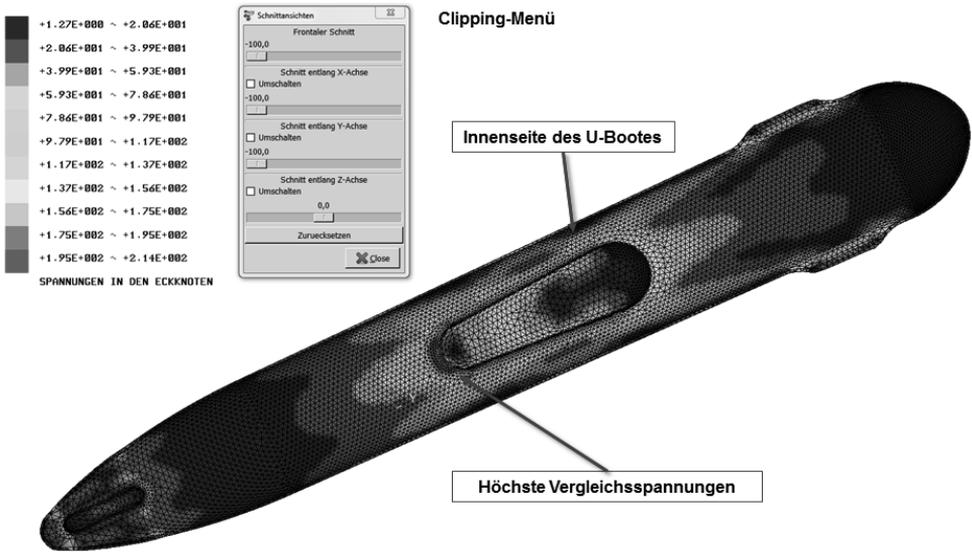


Bild 13.26-8: Darstellung der Ergebnisse im Inneren des U-Bootes: Vergleichsspannungen nach GEH in den Eckknoten

■ 13.26 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 statischer Last und ersetzt nicht eine Beanspruchungsberechnung nach DIN 3990. Das Zahnrad ist geradeverzahnt und hat Evolventen-Zahnflanken ohne jegliche Verzahnungsabweichung. Der Radkörper ist aus Gewichtsgründen mit Rippen versehen.

Es besitzt 30 Zähne, Modul 5 mm, einen Eingriffswinkel von 20° und einen Wälzkreisdurchmesser von 154 mm. Das Zahnrad soll mit einem Drehmoment von 160 Nm belastet werden.



Bild 13.26-1: Geometrie des Zahnrades in ABAQUS

Neuen Projektordner erstellen

Erstellen Sie ein neues Projektverzeichnis



Import ABAQUS-INP

Die Beispieldatei „zahnrad.inp“ aus „z88_beispiele_z88aurora/b26/Abaqus-Datei“ einlesen.

Knotenpicken

Wechseln Sie in das Pickingmenü und „Knotenpicking“ und legen Sie nun drei Knoten-Sets an, eines für die Lagerstelle „Lager“ und zwei für die Normalkräfte entlang der Breitenrichtung der Zahnflanke. Für die Normalkraft werden zwei Knoten-Sets, „Last_x“ und „Last_y“, mit den gleichen gepickten Knoten benötigt, um die Normalkraft komponentenweise aufzuteilen. Das „Lager“-Set kann durch die Auswahl eines Knotens der Lagerfläche und dem Button „Flaeche“ gepickt werden.

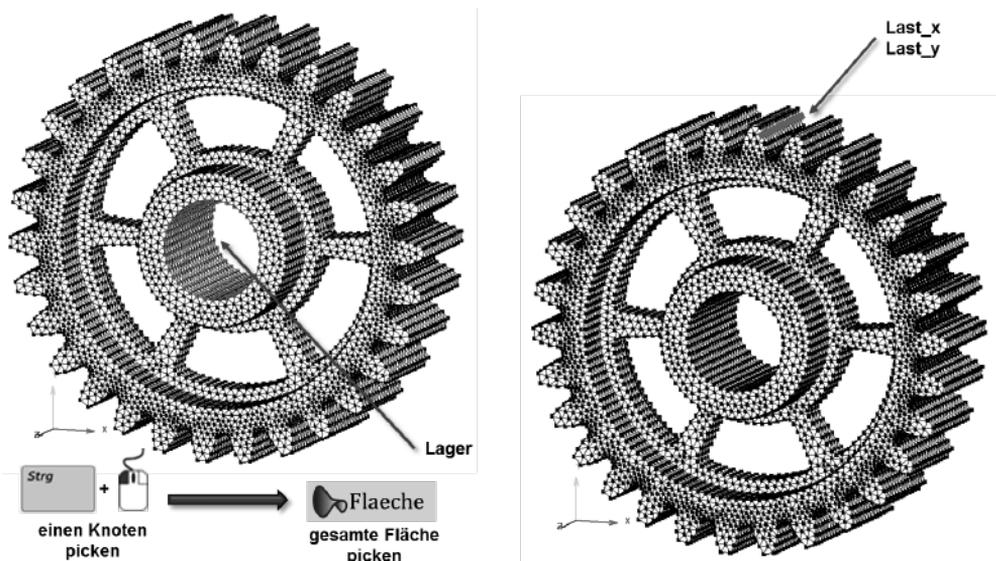


Bild 13.26-2: Knoten-Sets für Randbedingungen picken

Randbedingungen

Button *Praeprozessor* → *Randbedingungen Zuweisen*. → Im Kontextmenü werden den Knoten-Sets nun Randbedingungen zugewiesen. Als Last wird die Normalkraft entlang der Berührlinie der Zahnflanke als Linienlast aufgebracht. Sie berechnet sich aus dem Drehmoment und der Richtung der Normale entlang der Berührlinie. Reibungseffekte bleiben unberücksichtigt.

1. Festhaltung: Set „Lager“, Richtung X, Y, Z, „Verschiebung“, Wert 0, Name „Festhaltung“.
2. Kraft aufbringen: Set „Last_x“, Richtung X, Linienlast, Wert „-2170“, Name „Linienlast_x“.
3. Kraft aufbringen: Set „Last_y“, Richtung Y, Linienlast, Wert „-673“, Name „Linienlast_y“.

Die Verwendung der Option „Linienlast“ erspart die Berechnung der einzelnen Kraftanteile der FE-Knoten entlang der Berührlinie der Zahnflanke. Die unter „Wert“ angegebene Last wird entsprechend dem Vorgehen der FEA bei Streckenlasten auf alle ausgewählten FE-Knoten verteilt. Zusätzlich fließen in die Kraftverteilung noch die Längen der belasteten Finiten Elemente ein. Nur so kann eine konstante Streckenlast entlang einer Linie gewährleistet werden.

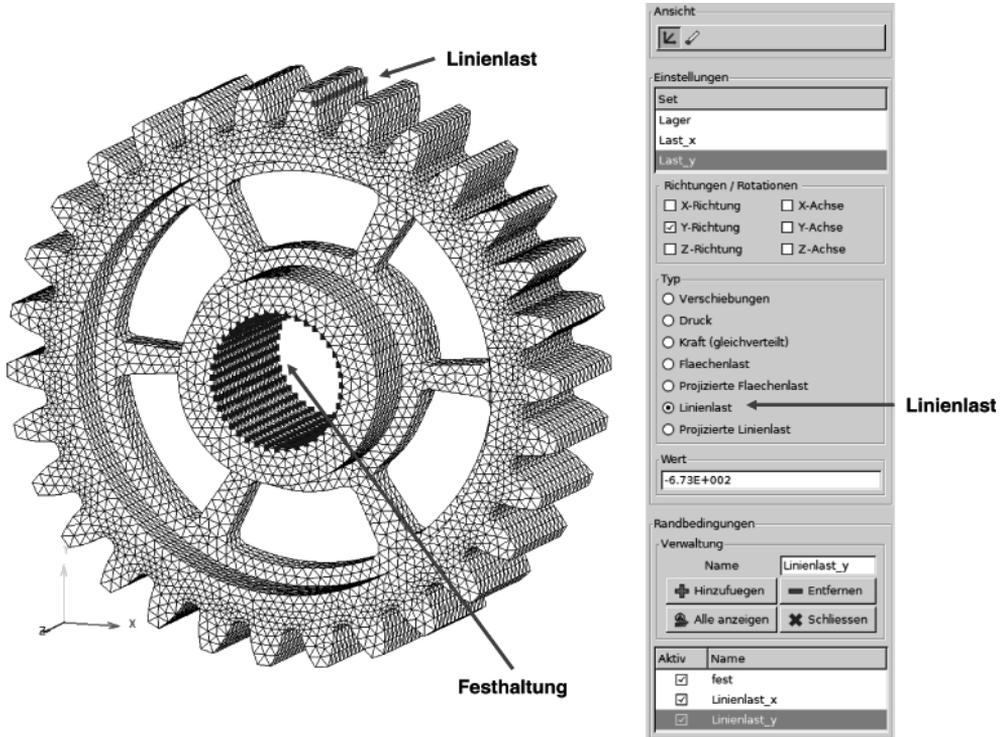


Bild 13.26-3: Linienlast und Festhaltung

Material erstellen

Verwenden Sie das Material Baustahl S235JR aus der Z88Aurora-Materialdatenbank.

Berechnung starten

Starten Sie die Berechnung mit dem „Pardiso-Solver“.

Ausgaben

Die Aufbringung der Last als Linienlast (konstante Streckenlast) bewirkt eine gleichmäßige Verschiebung über die gesamte Breite der Zahnflanke. Die höchsten Vergleichsspannungen nach GEH treten in den Rippen am Übergang zur Nabe auf. Je nachdem welchen Zahn Sie zur Aufgabe der Linienlast verwenden, ändern sich die Ergebnisse leicht, da die Entfernung des Zahns zur inneren Versteifung des Zahnrad von Belang ist.

Index

Symbole

3D-CAD-Programm 127

A

Algorithmus von Cuthill-McKee 180

AutoCAD 477, 479, 596, 641 ff.

Automeshing 180, 202, 473, 638

B

Balken 3, 13, 521

Balkenelement 19, 183 f., 596

Balkenfachwerk 111, 113, 128

Balken Nr. 2 mit 2 Knoten im Raum 655

Balkentheorie 67, 273

Bandbreite 176 f., 179

Bandspeicherverfahren 174, 176, 196

Beispiele VI, 3, 20, 69, 77, 182, 185, 473 ff., 477, 344, 531

Biegeträger 521

C

calloc 165, 171

CG-Verfahren 239

Characterverarbeitung 165

Cholesky-Verfahren 224 ff., 231, 253 f.

Cholesky-Zerlegung 242

Compactmodus 619, 632

Compilation 10, 17, 19, 163 f., 189 f., 195, 201, 284

Compilieren 231

COSMOS-Format 310, 473

COSMOS Konverter 310

C-Programm 165, 170

Crout-Zerlegung 224

Cuthill-McKee 253

Cuthill-McKee-Algorithmus 370, 474, 592, 669, 678

D

Datei der Randbedingung 645

Diskretisierung 67 f.

Doolittle-Zerlegung 224

Drehmomentmeßnabe 591

Dreieckslast 111

Dreiecksmatrix 177, 223

Dreieckszerlegung 222

Dreigelenkbogen 595

Druckbehälter 477, 577

Durchlaufträger 13, 19, 111, 113, 128, 273 f.

E

Ebener Spannungszustand 129

Ebener Träger 476

Eigenschwingungen 150

Eigenwertproblem 150

Einzelschrittverfahren 237

Elastizitätsmodul 32 ff., 275

Elastizitätstheorie V, 1, 3, 73, 269

Element-Steifigkeitsmatrix 6, 9, 14, 117, 273

Elementtangentialmatrizen 151

Exportieren 473, 531

F

Fachwerk 127, 476

Fangmodi 645

Finite Elemente Analyse V, 2 f., 5, 67 f., 163, 165, 174, 191, 221, 224, 226, 237, 270, 477

Flächenlast 95 f., 654

Formänderungsarbeit 71

Formfunktion 76

Fundamenteigenschaft 76 f., 334

Funktionale 3

G

Gabelschlüssel 476

Gauß-Legendre-Quadratur 86 f., 89

Gaußpunkt 270

Gauß-Seidel-Verfahren 237

Gauß-Verfahren 222

GEH 276

Gesamtproblem 19

Gesamtschrittverfahren 237

Gesamt-Steifigkeitsmatrix 9 f., 17 ff., 191, 328, 678

Gestaltsänderungsenergie-Hypothese 276

Getriebewelle 128, 476, 512

Gitterrost-Verfahren 1

Gleichstreckenlast 95

Gleichungslöser VI, 20, 221, 253, 326

Gleichungssystem 6 ff., 11 f., 18 f., 164, 221 f., 224, 227, 235, 240 f., 246, 328

H

Hexaeder Nr. 10 mit 20 Knoten 476
 Hüllenspeicherung 180

I

Integration 86
 Integrationsordnung 86
 Interpolationsfunktion 335
 INTORD 86, 353
 Isotropie 34
 Iterationssolver 235, 325
 iterative Verfahren 234

J

Jacobi-Determinante 92 f., 95, 200
 Jacobi-Matrix 90, 336
 Jacobi-Verfahren 196, 237, 239
 Jennings-Speicherverfahren 174, 182, 196
 JOR-Verfahren 238

K

Knotenkoordinaten 163 ff.
 Knotenkraft 285
 Knotenkräfte 283
 Knotennumerierung 180, 196, 338
 Knotennumerierung 474
 Knotenzahldifferenz 177 f.
 Koinzidenz 165, 337, 339, 341
 Koinzidenzliste 163 ff., 192, 338, 341
 Koinzidenzvektor 166 f., 171, 271, 331, 670, 678, 337, 340
 Konditionszahl 227, 240
 Kontakt, Kontaktberechnung, Kontaktanalyse V, 61, 210, 215, 388, 481, 759
 Konvektion 206, 321, 379, 480, 732
 Konvergenzverhalten 235
 Koordinatensystem 617
 Kraft 269
 Kraftmeßdose 478, 641

Kraftmeßelement 129, 478, 641, 646, 652
 Kranträger 128, 476, 501
 Kunststoffe 59
 Kurbelwelle 477, 580 ff.

L

Lager 3, 8, 13, 18 f., 477, 479, 617
 Lagrange-Polynom 334
 Lastverteilung 221, 646
 LR-Zerlegung 223
 LU-Zerlegung 175, 180, 196, 223

M

Massenmatrix 150
 Materialgesetz 644
 Materialmatrix 38, 73, 270
 Materialnichtlinearitäten 47, 58, 156, 385
 Materialplastizität 480, 745
 MAXGS 170, 172 f., 312, 592, 619, 632, 670, 678
 MAXKOI 170, 172 f., 312, 619, 632, 670, 678
 MAXSOR 327
 Methode von Ritz 3
 Motif 779 f.

N

NASTRAN-Format 310
 Natürliche Koordinaten 340
 Netzgenerator 337
 Netzgeneratordatei 644
 Netzgenerierung 476, 479
 Newton-Cotes Formel 86
 Nicht-Nullelemente-Speicherung 174, 190, 196
 NIFLAG 644
 Normalspannungs-Hypothese 276 f.

O

Offsetvektor 166 f., 271
 OpenGL 350
 Ottomotor 477

P

Plattenbiegung 39, 95
 Plattenprobleme 23
 Plattensegment 476, 530, 707, 712
 Pointer 117, 165, 167, 170 f., 184, 186, 191
 Pointervektor 181, 183, 185, 189, 191 f., 195, 201, 227, 231, 284
 Polynom 334
 Polynomgrad 76
 positiv definit 224
 Proportionalitätsgrenze 32

Q

Querdehnung 33
 Querkontraktionszahl 33 f., 275
 Querverpreßverband 477, 549

R

Rahmen 111, 113
 Randbedingung 8 f., 12 f., 197 f.
 Reaktionskräfte 285
 Relaxationsparameter 238, 241
 Rendern 351
 RINGSPANN-Scheibe 254, 477
 Rohr unter Innendruck 477, 539, 549
 Rückrechnen 11
 Rückrechnung 222, 269

S

Schalen 134
 Schalenelemente 134
 Scheibenproblem 476 f., 638
 Schraubenschlüssel 68, 481, 478, 480, 342 f., 627
 Schubanteil 39
 Schubmodul 33
 Schubspannung 36
 Schubspannungs-Hypothese 276, 281
 Serendipity-Element 68, 166, 335, 337, 343, 651, 653, 334 f.
 Serendipity-Hexaeder 271
 Serendipity-Klasse 78

Serendipity Scheibe 80, 84,
177f., 180, 630f., 638
Serendipity Scheibendreieck
80
Serendipity-Tetraeder 78
Shift-Faktor 243
SICCG 242
Skalierungsverfahren 227
SKO-Verfahren 294, 481, 774
Skyline-Verfahren 174, 180ff.,
227
Solver 221, 312, 314, 327
SORCG 241
SOR-Verfahren 238
Spannung 71, 270, 273, 637
Spannungsanzeige 353
Spannungsberechnung 269,
276
Spannungs-Dehnungs-Schaubild
32
Speicherverfahren V, VI, 20,
163, 174, 180, 182, 196, 221
Spektralradius 235
SSORC 241
Stab 6f., 9ff., 67, 127f., 131,
133, 166, 273
STL-Geometrie 477, 480, 563,
587, 639, 674, 753
Streckenlast 93

Strukturoptimierung 287
Superpositionsprinzip 34f.,
163

T

Temperaturanalyse 148
Testmodus 618, 632ff.
Tetraederkoordinaten 88
Topologieoptimierung 287, 292,
770, 774
Torsionsbalken 67, 127, 131
Toruselemente 140
Trimmen 481, 756

U

Umfahrungssinn 338

V

Verfahren der Konjugierten
Gradienten 239
Vergleichsspannung 276,
648
Verschiebung 5, 8, 12f., 198f.,
275, 362, 401
Verschiebungen 353
Verschiebungsfeld 69, 75f.

Verschiebungsgrößen-Verfahren
8, 19f.

Verzerrung 131

Verzerrungs-Verschiebungs-
Beziehung 36f.

Verzerrungs-Verschiebungs-
Transformationsmatrix 74,
270

Virtueller Fixpunkt 618

Vorkonditionierungs-Matrix
240

W

Wärmeleitfähigkeitsmatrix 148

Welle 128

Wellenelement 273f.

Z

Z88G 310

Z8800.TXT 326

Z8801.TXT 326

Z8802.TXT 326

Z880.UGL 351

Zahnrad 478, 617

Zoomen 629

Zugspannung 273

Zugstab 5f., 33, 71