

Thomas Fritscher
Wolf-Udo Zammert

FEM-Praxis mit ANSYS®

Grundkurs

Mit 64 Bildern und 6 Tabellen



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einführung	1
2 Die Theorie der finiten Elemente	3
2.1 Einführung in die Theorie.....	3
3 Einstieg in das Arbeiten mit ANSYS	15
3.1 Starten und Beenden von ANSYS.....	15
3.2 USER Interface	16
3.3 Hilfe-Modul.....	17
3.3.1 Die Befehle <i>HELP</i> , <i>GOTO</i> und <i>FIND</i>	17
3.4 Beenden von ANSYS	18
3.4.1 Der Befehl/ <i>EOF</i>	18
3.5 ANSYS-Dateien	19
3.6 Einheitenlose Eingabe.....	19
3.7 Übungen zu einheitenloser Eingabe	20
3.7.1 Aufgabe	20
4 Lineare Statische Berechnung	21
4.1 Darstellung eines Beispielfiles	21
5 Preprocessing	23
5.1 Aufruf des Preprozessors.....	23
5.1.1 Der Befehl/ <i>PREP7</i>	23
5.2 Berechnungsarten	24
5.2.1 Der Befehl <i>KAN</i>	24
5.3 Erzeugen eines Titels.....	24
5.3.1 Der Befehl/ <i>TITLE</i>	24

5.4	Elementbibliothek.....	25
5.4.1	Elementbibliothek	26
5.5	Elementauswahl.....	28
5.5.1	Der Befehl <i>ET</i>	28
5.6	Elementoptionen.....	28
5.6.1	Der Befehl <i>KEYOPT</i>	28
5.7	Real-Konstanten	29
5.7.1	Die Befehle <i>R</i> , <i>RMORE</i>	29
5.8	Materialkonstanten	30
5.8.1	Der Befehl <i>MP</i>	30
5.9	Übungen zur Konstantendefinition	31
5.9.1	Aufgabe	31
6	Einstieg in das Arbeiten mit ANSYS	32
6.1	Modell und Wirklichkeit.....	32
7	Knoten	33
7.1	Einzelknoten generieren.....	33
7.1.1	Der Befehl <i>N</i>	33
7.2	Knoten anzeigen.....	34
7.2.1	Der Befehl <i>NPLOT</i>	34
7.3	Knotennummern einschalten.....	35
7.3.1	Der Befehl <i>PNUM</i>	35
7.4	Knotennummern auflisten.....	35
7.4.1	Der Befehl <i>NLIST</i>	35
7.5	Knoten auffüllen.....	37
7.5.1	Der Befehl <i>FILL</i>	37
7.6	Knoten generieren.....	39
7.6.1	Der Befehl <i>NGEN</i>	39
7.7	Knotenmuster spiegeln.....	41
7.7.1	Der Befehl <i>SYMM</i>	41
7.8	Knotenmuster verzerren.....	42
7.8.1	Der Befehl <i>NSCALE</i>	42
7.9	Knoten löschen.....	43
7.9.1	Der Befehl <i>NDELE</i>	43
7.10	Übungen zur Knotengenerierung	44
7.10.1	Aufgabe	44
7.10.2	Aufgabe	44
7.10.3	Aufgabe	44
7.10.4	Aufgabe	45

8	Elemente	46
8.1	Elemente erzeugen	46
8.1.1	Der Befehl <i>E</i>	46
8.2	Elemente darstellen	48
8.2.1	Der Befehl <i>EPLLOT</i>	48
8.3	Elementnummern einschalten	48
8.3.1	Der Befehl <i>PNUM</i>	48
8.4	Elemente generieren	49
8.4.1	Der Befehl <i>EGEN</i>	49
8.5	Elemente duplizieren	50
8.5.1	Der Befehl <i>ESYM</i>	50
8.6	Elemente löschen	51
8.6.1	Der Befehl <i>EDELE</i>	51
8.7	Elemente auflisten	51
8.7.1	Der Befehl <i>ELIST</i>	51
8.8	Elemente mit expliziter Numerierung	52
8.8.1	Die Befehle <i>EN</i> , <i>ENG</i> , <i>ENSYM</i>	52
8.9	Übungen zur Elementgenerierung	53
8.9.1	Aufgabe	53
8.9.2	Aufgabe	53
9	Koordinatensysteme	54
9.1	Globale und lokale Koordinatensysteme	54
9.2	Lokales System aus globalem System definieren	55
9.2.1	Der Befehl <i>LOCAL</i>	55
9.3	Lokales System aus lokalem System definieren	56
9.3.1	Der Befehl <i>CLOCAL</i>	56
9.4	Lokales System mit drei Knoten definieren	57
9.4.1	Der Befehl <i>CS</i>	57
9.5	Koordinatensystem aktivieren	57
9.5.1	Der Befehl <i>CSYS</i>	57
9.6	Koordinatensysteme auflisten	58
9.6.1	Der Befehl <i>CSLIST</i>	58
9.7	Koordinatensysteme löschen	58
9.7.1	Der Befehl <i>CSDELE</i>	58
9.8	Koordinatensystem anzeigen	59
9.8.1	Der Befehl <i>PSYMB</i>	59
9.9	Schnittknoten berechnen	60
9.9.1	Der Befehl <i>MOVE</i>	60
9.10	Knotenkoordinatensysteme	63
9.10.1	Der Befehl <i>NROTAT</i>	64
9.10.2	Der Befehl <i>NMODIF</i>	65
9.11	Elementkoordinatensysteme	65

9.12	Übungen zum Umgang mit Koordinatensystemen.....	66
9.12.1	Aufgabe	66
9.12.2	Aufgabe	66
10	Gruppenbildungen/Selecting Capabilities.....	67
10.1	Knotenselektion.....	67
10.2	Knoten selektieren.....	68
10.2.1	Der Befehl <i>NSEL</i>	68
10.3	Knoten aus selektierter Menge wählen.....	69
10.3.1	Der Befehl <i>NRSEL</i>	69
10.4	Selektierte Menge erweitern.....	69
10.4.1	Der Befehl <i>NASEL</i>	69
10.5	Selektierte Menge verkleinern	70
10.5.1	Der Befehl <i>NUSEL</i>	70
10.6	Selektierte und passive Menge vertauschen.....	70
10.6.1	Der Befehl <i>NINV</i>	70
10.7	Alle Knoten aktivieren.....	70
10.7.1	Der Befehl <i>NALL</i>	70
10.8	Elements Selektion	70
10.9	Elemente selektieren.....	71
10.9.1	Der Befehl <i>ESEL</i>	71
10.10	Elemente auswählen zu selektierten Knoten.....	71
10.10.1	Der Befehl <i>ENODE</i>	71
10.11	Übungen zur Gruppenbildung/Selektion	73
10.11.1	Aufgabe	73
11	Last- und Lagerbedingungen	74
11.1	Lagerbedingungen	74
11.2	Lagerbedingungen definieren.....	74
11.2.1	Der Befehl <i>D</i>	74
11.3	Lagerungsbedingungen anzeigen.....	75
11.3.1	Der Befehl/ <i>PBC</i>	75
11.4	Auflisten der Lagerbedingungen	75
11.4.1	Der Befehl <i>DLIST</i>	75
11.5	Lagerbedingungen löschen.....	76
11.5.1	Der Befehl <i>DDELE</i>	76
11.6	Angreifende Kräfte und Momente.....	76
11.6.1	Der Befehl <i>F</i>	76
11.7	Kräfte anzeigen, auflisten und löschen.....	77
11.7.1	Die Befehle/ <i>PBC</i> , <i>FLIST</i> und <i>FDELE</i>	77
11.8	Drücke, Pressungen auf Elemente.....	77
11.8.1	Die Befehle <i>EP</i> , <i>PSF</i>	77
11.9	Beschleunigungen.....	80
11.9.1	Der Befehl <i>ACEL</i>	80

11.10	Symmetriebedingungen.....	80
11.10.1	Der Befehl <i>SYMBC</i>	80
11.11	Übungen zu Lager- und Lastbedingungen	82
11.11.1	Aufgabe	82
12	Abschluß des Preprocessing	83
12.1	Speichern der Geometrie und Randbedingungen.....	83
12.1.1	Die Befehle <i>AFWRITE</i> , <i>SAVE</i> und <i>CHECK</i>	83
12.2	Übung zum Abschluß des Preprocessing.....	84
12.2.1	Aufgabe	84
13	Solid Modeling	86
13.1	Allgemeines	86
13.2	Vergleich: Direktes Generieren - Solid Modeling	86
13.3	Selektieren im Solid Modeling	89
13.4	Punkte/Keypoints.....	90
13.4.1	Der Befehl <i>K</i>	90
13.5	Punkte auffüllen.....	91
13.5.1	Der Befehl <i>KFILL</i>	91
13.6	Punktmuster erzeugen.....	93
13.6.1	Der Befehl <i>KGEN</i>	93
13.7	Punktmuster spiegeln.....	94
13.7.1	Der Befehl <i>KSYMM</i>	94
13.8	Punkte in anderes Koordinatensystem transformieren	96
13.8.1	Der Befehl <i>KTRAN</i>	96
13.9	Verzerren von Punktmustern.....	97
13.9.1	Der Befehl <i>KSCALE</i>	97
13.10	Existierende Punkte verändern.....	98
13.10.1	Der Befehl <i>KMODIF</i>	98
13.11	Punkte löschen.....	99
13.11.1	Der Befehl <i>KDELE</i>	99
13.12	Punkte darstellen und auflisten	99
13.12.1	Die Befehle <i>KPLOT</i> und <i>KLIST</i>	99
13.13	Punktnumerierung einschalten	100
13.13.1	Der Befehl <i>PNUM</i>	100
14	Linien	101
14.1	Linien erzeugen	101
14.1.1	Der Befehl <i>L</i>	101
14.2	Verschiedene Linienbefehle.....	102
14.2.1	Die Befehle <i>LGEN</i> , <i>LSYMM</i> , <i>LTRAN</i> , <i>LMODIF</i>	102
14.3	Linien unterteilen.....	102
14.3.1	Der Befehl <i>LDIV</i>	102
14.4	Linien verbinden.....	103
14.4.1	Der Befehl <i>LCOMB</i>	103

14.5	Kreuzende Linien auftrennen.....	104
14.5.1	Der Befehl <i>LINTER</i>	104
14.6	Linien unter definiertem Winkel anfügen.....	105
14.6.1	Die Befehle <i>LANG</i> und <i>L2ANG</i>	105
14.7	Linien verlängern.....	107
14.7.1	Die Befehle <i>LTAN</i> und <i>L2TAN</i>	107
14.8	Kreisbögen generieren	109
14.8.1	Der Befehl <i>LARC</i>	109
14.9	Kreis erzeugen.....	110
14.9.1	Der Befehl <i>CIRCLE</i>	110
14.10	Beliebige Kurve erzeugen.....	111
14.10.1	Der Befehl <i>SPLINE</i>	111
14.11	Übergang ausbilden	112
14.11.1	Der Befehl <i>LFILLT</i>	112
14.12	Schnittkante erzeugen	113
14.12.1	Der Befehl <i>LAINT</i>	113
14.13	Flächenparallele erzeugen	114
14.13.1	Der Befehl <i>LAREA</i>	114
14.14	Linien darstellen und löschen.....	115
14.14.1	Die Befehle <i>LPLLOT</i> , <i>LLIST</i> und <i>LDELE</i>	115
14.15	Übungen mit Linien	115
14.15.1	Aufgabe	115
14.15.2	Aufgabe	116
14.15.3	Aufgabe	116
15	Flächen/Areas	117
15.1	Regelmäßige Flächen erzeugen	117
15.1.1	Der Befehl <i>A</i>	117
15.2	Unregelmäßige Flächen erzeugen	117
15.2.1	Der Befehl <i>AL</i>	117
15.3	Verschiedene Flächenbefehle	118
15.3.1	Die Befehle <i>AGEN</i> , <i>ARSYM</i> , <i>ATRAN</i> , <i>AFILLT</i>	118
15.4	Fläche durch Rotieren erzeugen.....	119
15.4.1	Der Befehl <i>AROTAT</i>	119
15.5	Fläche durch Verschieben erzeugen.....	120
15.5.1	Der Befehl <i>ADRAG</i>	120
15.6	Fläche unterteilen	121
15.6.1	Der Befehl <i>ASUB</i>	121
15.7	Parallelfäche erzeugen.....	122
15.7.1	der Befehl <i>AOFFST</i>	122
15.8	Flächen anzeigen, löschen und auflisten	123
15.8.1	Die Befehle <i>APLOT</i> , <i>ADELE</i> , <i>ALIST</i>	123
15.9	Übungen mit Flächen.....	123
15.9.1	Aufgabe	123

16	Volumina/Volumes	124
16.1	Körper erzeugen	124
16.1.1	Der Befehl <i>V</i>	124
16.2	Unregelmäßige Volumina.	124
16.2.1	Der Befehl <i>VA</i>	124
16.3	Volumen generieren und verändern . .	125
16.3.1	Die Befehle <i>VGEN</i> , <i>VSYMM</i> , <i>VTRAN</i> , <i>VROTAT</i> , <i>VDRAG</i> , <i>VPLOT</i> , <i>VLIST</i>	125
17	Geometrieerzeugung extern/Transfer	126
17.1	Datenaustausch PROREN-ANSYS	126
17.2	Datenaustausch AutoCAD-ANSYS	127
18	Vernetzen der Geometrie	128
18.1	Kontrolle der Elementgröße	128
18.1.1	Der Befehl <i>ELSIZE</i>	128
18.2	Linien für die Vernetzung unterteilen . .	129
18.2.1	Der Befehl <i>LDVS</i> . .	129
18.3	Elementgröße in Punktumgebung . .	130
18.3.1	Der Befehl <i>KSCON</i> . .	130
18.4	Elementgröße an vorgegebenen Punkt	131
18.4.1	Der Befehl <i>KDVS</i> . .	131
18.5	Elementanzahl bei Linien anpassen	131
18.5.1	Der Befehl <i>LDVA</i> . .	131
18.6	Starten der Vernetzung.	132
18.6.1	Der Befehl <i>MESH</i>	132
18.7	Löschen eines Netzes.....	133
18.7.1	Der Befehl <i>CLEAR</i>	133
18.8	Beispiele zur Vernetzungssteuerung.....	133
18.9	Knoten und Elemente vom Solid Model lösen	136
18.9.1	Der Befehl <i>MODMESH</i>	136
18.10	Übungen zur Netzgenerierung.....	137
18.10.1	Aufgabe	137
19	Last-/Lagerbedingungen am Solid Model	138
19.1	Kräfte am Solid Model	138
19.1.1	Der Befehl <i>KF</i>	138
19.2	Drücke/Pressungen am Solid Model	138
19.2.1	Die Befehle <i>LPSF</i> und <i>APSF</i>	138
19.3	Lagerbedingungen am Solid Model.....	139
19.3.1	Der Befehl <i>KD</i>	139
19.4	Symmetriebedingungen am Solid Model.....	140
19.4.1	Die Befehle <i>LSBC</i> und <i>ASBC</i>	140

19.5	Bedingungen auf Knoten und Elemente transferieren.....	140
19.5.1	Der Befehl <i>SBCTRA</i>	140
19.6	Bedingungen am Solid Model auflisten.....	141
19.6.1	Der Befehl <i>SBCLIST</i>	141
19.7	Last-/Lagerbedingungen am Solid Model löschen.....	141
19.7.1	Der Befehl <i>SBCDELE</i>	141
19.8	Übungen zu Last-/Lagerbedingungen am Solid Model.....	141
19.8.1	Aufgabe.....	141
20	Zusätzliche Befehle	142
20.1	Doppelte Objekte verschmelzen.....	142
20.1.1	Der Befehl <i>NUMMRG</i>	142
21	Die Lösungsphase	143
21.1	Starten des Gleichungslösers.....	143
21.1.1	Der Befehl <i>INPUT</i> , 27.....	143
21.2	Beenden des Gleichungslösers.....	143
21.2.1	Der Befehl <i>FINISH</i>	143
21.3	Steuerung des Ergebnisausdrucks.....	144
21.3.1	Der Befehl <i>ITER</i>	144
22	Postprocessing	145
22.1	Allgemeines.....	145
22.2	Allgemeiner Postprocessor <i>POST1</i>	145
22.2.1	Der Befehl <i>POST1</i>	145
22.3	Einlesen von Ergebnissen.....	146
22.3.1	Der Befehl <i>SET</i>	146
22.4	Zusätzliche Auswertungen einschreiben.....	147
22.4.1	Die Befehle <i>POSTR</i> , <i>PONF</i> , <i>PORF</i>	147
22.5	Zusätzliche Ergebnisse einlesen.....	148
22.5.1	Der Befehl <i>STRESS</i>	148
22.6	Darstellung der Geometrieverlagerung.....	149
22.6.1	Der Befehl <i>PLDISP</i>	149
22.7	Verschiebungen auflisten.....	150
22.7.1	Der Befehl <i>PRDISP</i>	150
22.8	Darstellung der verschiedenen Spannungen.....	151
22.8.1	Die Befehle <i>PLNSTR</i> und <i>PRNSTR</i>	151
22.9	Lage der Spannungen bei Schalenelementen.....	154
22.9.1	Der Befehl <i>SHELL</i>	154
22.10	Vektordarstellungen.....	154
22.10.1	Die Befehle <i>PLVECT</i> und <i>PRVECT</i>	154
22.11	Koordinatensystem bei der Auswertung.....	155
22.12	Verlassen des Postprozessors.....	156
22.13	Übungen zum Postprocessing.....	156
22.13.1	Aufgabe.....	156

23	Auswertung von Stab- und Balkenelementen	157
23.2	Reaktionskräfte auflisten	157
23.2.1	Der Befehl <i>PRRFOR</i>	157
23.3	Auflisten der elementbezogenen Knotenkräfte	158
23.3.1	Der Befehl <i>PREFOR</i>	158
23.4	Schnittreaktionen an Knoten	159
23.4.1	Die Befehle <i>SPOINT</i> und <i>NFORCE</i>	159
23.5	Darstellen des Kraft- und Momentenverlaufs	159
23.5.1	Der Befehl <i>PLLS</i>	159
23.6	Übungen zur Auswertung von Stäben und Balken	160
23.6.1	Aufgabe	160
24	Pfaddarstellungen	161
24.1	Definieren eines Pfades	161
24.1.1	Die Befehle <i>PLPATH</i> und <i>PRPATH</i>	161
24.2	Übungen zu Pfadbefehlen	162
24.2.1	Aufgabe	162
25	Fehlerenergie/Genauigkeit der Berechnung	163
25.2	Übungen zur Fehlerenergie	164
25.2.1	Aufgabe	164
26	Überlagerte Lastfälle	165
26.2	Mehrere Lastfälle im Preprozessor	165
26.2.1	Der Befehl <i>LWRITE</i>	165
26.3	Auswertung im Postprozessor	166
26.3.1	Der Befehl <i>LCLIM</i>	166
26.4	Lastschritt zuordnen	167
26.4.1	Der Befehl <i>LCASE</i>	167
26.5	Lastfalladdition	167
26.5.1	Der Befehl <i>LADD</i>	167
26.6	Übungen zu überlagerten Lastfällen	168
26.6.1	Aufgabe	168
27	Modell mit mehreren Konstanten/Complex Models	169
27.1	Referenznummern umschalten	169
27.1.1	Die Befehle <i>MAT</i> , <i>TYPE</i> und <i>REAL</i>	169
27.2	Übungen zu Complex Models	172
27.2.1	Aufgabe	172
Anhang I:	Lösungen	173
Anhang II:	Zusätzliche Übungsaufgaben	198
Anhang III:	Referenzliste	232