



FEM-Anwendungen

Statik-, Dynamik- und Potenzialprobleme mit professioneller Simulationssoftware lösen

PETER GROTH

Mit 320 Abbildungen auch als beiliegende Datei

*Meiner Frau Gretel und meinen beiden Töchtern
Regina und Karin gewidmet*

Vorwort

Schon seit vielen Jahren plane ich, ein Lehrbuch über die Anwendung der FEM zu schreiben. In meiner fast 25-jährigen Tätigkeit als Lehrbeauftragter auf diesem Gebiet an der Fachhochschule für Technik, Esslingen, haben sowohl meine Studenten als auch ich so ein Lehrbuch sehr vermisst.

Während meiner Zeit als Geschäftsführer der T-Programm GmbH, als wir das FEM-Programm TPS10 entwickelten, hatte ich viel zu wenig Zeit, aber auch die Befürchtung, dass die etwas komplizierte und ziemlich trockene Materie nicht dazu geeignet war, von vielen verstanden und gelesen zu werden. Abgesehen von produktspezifischen Anleitungen ist bisher ein vollständiges Lehrbuch ausschließlich über die Anwendung der Methode nirgendwo erschienen. Vielleicht aus den gleichen Gründen.

Mit der Fertigstellung der Version 6 unseres FEM-Programms WTP2000 halte ich ein Werkzeug in Händen, welches sich an den Bedürfnissen der Lehre orientiert und damit auch für Anfänger geeignet und, besonders wichtig, auf der dem Buch beiliegenden CD als kostenlose Trainingsversion verfügbar ist. Was liegt also näher, als das etwas andere Lehrbuch zu schreiben, das man nicht wie ein Buch üblicher Weise von vorn nach hinten lesen, sondern das man anhand der beiliegenden Software erproben und erleben sollte. Dabei ist es natürlich besonders wichtig, dass die beschriebene Vorgehensweise bei der Realisierung der Beispiele auch lückenlos funktioniert. Dies ist nur bei Verwendung der Software auf beiliegender CD möglich. Für den erfahrenen Anwender wird es jedoch kein Problem sein, später mit den über meine Internet-Homepage www.igfgrothtp2000.de verfügbaren aktuellen Versionen klar zu kommen.

Es war für mich selbstverständlich, dass jemand alle Beispiele ausprobieren musste, möglichst jemand mit wenig Anwendungserfahrung. Ich bin daher meinem Freund *Dr. Hans Lüdecke* besonders dankbar, dass er zwei Kollegen (Dipl.-Ing. *Thomas Meister* und Dipl.-Ing. *Helmut Voigt*) dazu bewegen konnte, die in Kap. 4 beschriebene Vorgehensweise gründlich auszuprobieren. Dafür, aber auch für die vielen Hinweise zu den anderen Kapitel bedanke ich mich, sicher auch im Namen der Leser, bei allen drei recht herzlich.

Aber auch das umfangreichste und praxisnaheste Beispiel des Turmdrehkrans in Kap. 5 musste erprobt werden. Es gelang mir, einen alten Hasen, der längst im Ruhestand ist, den ehemaligen Chefstatiker von PHW, Herrn Dipl.-Ing. *Herbert Christ*, dazu zu motivieren. Herr Christ hat mich auch fachlich in Stahlbaubelangen beraten. Ihm gebührt daher mein besonderer Dank.

Natürlich gilt mein ganz besondere Dank meinen Freund Prof. *Helmut Faiss*, der mich bei der Formulierung der Theorie wesentlich unterstützt hat und von dem der größte Teil des aus dem FEM-Manual übernommenen Materials stammt.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn *Frank Auerswald*, der viele Beispiele ausprobiert und an den CAD-Modellen zum Knochen-Beispiel mitgewirkt hat. Von ihm erhielt ich weitere Verbesserungsvorschläge zu Kap. 4. Am Schluss gilt mein Dank Herrn Dr. *Dietrich Merkle* vom Springer-Verlag, der dieses Buch initiiert hat.

Bei dem Umgang mit diesem Buch sollte der Leser nach folgender Strategie vorgehen. Wir beginnen nach dem Einschalten des Computers mit der Installation der Software gemäß Abschn. 7.4. Danach machen wir die ersten Schritte nach dem Trainingsmanual gemäß Abschn. 7.8.1. Dieses ist Bestandteil des Lieferumfangs der professionellen Software [1]. Ich erhielt die Genehmigung zur Veröffentlichung von der Firma Wölfel Technische Programme und darf an dieser Stelle Herrn Dr. *Herbert Friedmann* danken, der dieses Installations- und Trainingsmanual geschrieben hat.

*Nur wenn Sie diese ersten Schritte ohne große Schwierigkeiten vollzogen und den Spaß noch nicht verloren haben und mehr wissen möchten, empfehle ich Ihnen, die nachfolgenden Kap. 1-3 zu überfliegen und mit Kap. 4 weiterzumachen. Lesen Sie zuvor auch das Infofile **readme.txt** auf beiliegender CD.*

Das in Kap. 1-3 zu vermittelnde Wissen wird in Kap. 4 und 5 mit Beispielen immer wieder dort abgerufen und vertieft, wo es benötigt wird. So lernen Sie anhand der Beispiele nach und nach das ganze Buch und damit die FEM kennen.

Den Projektnamen *ingo* in Kap. 4 habe ich in Erinnerung an meinen viel zu früh verstorbenen Schulfreund *Ingo Ücker* aus Greifswald gewählt.

Noch ein wichtiger Hinweis

Um die Befehlsfolgen im Pre- und Postprozessor und im FEM-Programm möglichst kompakt zu beschreiben, habe ich folgende Kurzformen festgelegt:

1. die Befehlsfolge steht in geschweiften Klammern { }
2. dann folgen die auszuwählenden Menüpunkte fett { **Model** }
3. jeder folgende Menüpunkt wird mit > angezeigt { **Model** > }
4. der Sprung in ein Eingabefenster wird mit >> angezeigt { **Model** >> **Properties** >> **Elementtyp** > **Bar** > **ok** >> **Shape** > **Circular Bar** > **Radius** }
5. Eingabewerte erkennt man am Gleichheitszeichen = { **Radius** = **0.5** }, die Werte selbst sind fett und kursiv
6. *Erklärungen* sind kursiv { **Radius** = **0.5** > **Draw Section** > *lokales Koordinatensystem, Spannungspunkte und Nullpunkt wählen* > **Orientation Direction** > **Right** > **Stress Recovery** > **Next** > **Reference Point** > **Next** > **ok** }

Um das zu verstehen, muss man natürlich alles einmal ausprobieren!

Bei der Ergebnisdarstellung im Postprozessor spielt die Farbe eine wichtige Rolle. Um die Kosten für dieses Buch niedrig zu halten, sind alle Bilder in schwarz/weiß. Die Bilder jedoch, bei denen die Farbe eine wesentliche Rolle spielt, finden sich als File *auf der beiliegenden CD* und können somit in Farbe betrachtet werden. Und nun viel Spaß und wenig Frust!

Inhalt

1	Die FEM	1
1.1	Geschichtliches über die Anwendung	1
1.2	Grundlagen der Modellbildung – Modellierung	3
1.3	Für welchen Anwender geeignet? – Anwender A und B	4
1.4	Intelligentes FEM-Programm = Qualitätssicherung	5
1.4.1	Ursachen für Anwenderprobleme mit der FEM	5
1.4.2	Reduzierung dieser Probleme - die Benutzerschale	6
1.4.3	Erkennen des Problems 1	6
1.4.4	Erkennen des Problems 2	7
1.4.5	Erkennen des Problems 3	7
1.5	Weitere Prüfungen zur Qualitätssicherung	7
1.6	Das Protokollfile	8
1.7	Programmsteuerung über Optionsauswahl - das Optionfile	10
2	Die verschiedenen Anwendungsgebiete der FEM	13
2.1	Lineare Statik	13
2.1.1	Mögliche Materialeigenschaften	14
2.1.2	Zur Formulierung des Rechenmodells	15
2.2	Nichtlineare Statik	15
2.2.1	Iterationsmethoden	16
2.2.2	Mögliche Materialeigenschaften	18
2.2.3	Zur Formulierung des Rechenmodells	20
2.3	Stabilitätsprobleme	21
2.3.1	Mögliche Materialeigenschaften	22
2.3.2	Zur Formulierung des Rechenmodells	22
2.4	Lineare und nichtlineare Dynamik	22
2.4.1	Lösung von Schallproblemen, Akustik	24
2.4.2	Mögliche Materialeigenschaften	25
2.4.3	Zur Formulierung des Rechenmodells	25
2.5	Stationäre und instationäre Potenzialprobleme	25
2.5.1	Analogie der Potenzialprobleme	25
2.5.2	Grundlagen der stationären Potenzialprobleme	28
2.5.3	Zur Formulierung des Rechenmodells	28
2.5.4	Mögliche nichtlineare Magnetfeldmodelle	29

2.5.5	Grundlagen der instationären Potenzialprobleme	30
3	Die in den Beispielen verwendeten Elemente des FEM-Programms	33
3.1	Allgemeine Definitionen – Anordnung der Zwischenknoten.....	33
3.2	Flächenelemente.....	34
3.2.1	Beanspruchungsarten bei Flächenelementen	35
3.2.2	Drei- und viereckiges Flächenelement mit linearem oder quadratischem Verschiebungsansatz.....	35
3.3	Raumelemente mit linearem oder quadratischem Verschiebungsansatz.....	39
3.4	Stabelemente.....	40
3.4.1	Beschreibung der Stabquerschnittswerte – Property	41
3.4.2	Aussteuerung von Schnittgrößen.....	44
3.4.3	Stabelementrandbedingungen (Gelenke, Federn usw.)	45
3.4.4	Stabelement mit konstantem oder geometrisch linear veränderlichem Querschnitt.....	50
3.4.5	Stabelement mit exzentrischem Knotenanschluss und Wölbkrafttorsion.....	51
3.5	Grundsätzliches zur Elementbeschreibung.....	54
3.6	Elementqualität.....	55
3.6.1	Überprüfung der Elementqualität am Balkenmodell	57
3.6.2	Membranelement als Balken.....	57
3.6.3	Plattenelement als Balken	60
3.6.4	Raumelement als Balken	63
3.6.5	Übersicht; Balkentest für alle Elemente.....	65
4	Der Einstieg in die FEM durch einfache Beispiele.....	67
4.1	Das Modell ingo.....	67
4.2	Ein erstes Beispiel aus der linearen Statik mit Raumelementen.....	67
4.2.1	Starten des Preprozessors FEMAP	68
4.2.2	Die Geometriebeschreibung (ingog).....	68
4.2.3	Material- und Property-Definition	70
4.2.4	Netzerstellung 1. Schritt, rechte Hälfte	71
4.2.5	Netzerstellung 2. Schritt, Spiegelung (ingof).....	77
4.2.6	Netzerstellung letzter Schritt, Raumelemente (ingor)	79
4.2.7	Modell abschließen, Randbedingungen und Belastung	80
4.2.8	Starten des FEM-Programms TP2000.....	84
4.2.9	Verfolgen des Rechenablaufs von TP2000 am Bildschirm.....	86
4.2.10	Optionen ändern; Zwischenknoten einfügen.....	90
4.3	Wiederholung des ersten Beispiels mit realitätsgetreuer Belastung	96
4.4	Ausgabedaten des FEM-Programms, das Protokollfile ingor1-s.prt	100
4.5	Beispiel aus der linearen Statik mit Schalenelementen (ingos).....	106

4.6	Beispiel aus der linearen Statik mit Membranelementen (ingom)	114
4.6.1	Lastfall 1 ohne Kontaktanalyse; Vergleich Raum-, Schalen- und Membranelement	116
4.6.2	Lastfall 1 mit Kontaktanalyse ohne Reibung (ingomk)	118
4.6.3	Lastfall 1 mit Kontaktanalyse mit Reibung	127
4.7	Beispiel aus der linearen Statik mit rotationssymmetrischen Elementen (ingort)	130
4.8	Beispiel aus der nichtlinearen Statik mit rot.symm. Elementen mit Fließgesetz und großen Verformungen (ingorn)	138
4.9	Beispiel aus der nichtlinearen Statik mit rot.symm. Elementen, Gummimaterial und Kontakt gegen starren Rand (ingorg)	145
4.10	Beispiel aus der Stabilität mit Schalenelementen, Berechnung der kritischen Beullasten und -formen (ingoss)	154
4.11	Beispiel aus der linearen Dynamik mit rot.symm. Elementen, Berechnung der unteren Eigenfrequenzen und -formen (ingord)	155
4.12	Der Einfluss der Vorspannung in der Dynamik	163
4.13	Beispiel aus der linearen Dynamik mit rot.symm. Elementen, Vergleich statische Last mit Stoßbelastung (ingors)	166
4.14	Beispiel aus der linearen Dynamik mit Schalenelementen, mit Fußpunkterregung = Erdbeben (ingoeb)	174
4.15	Beispiel ingom als Akustikproblem (ingoak)	182
4.16	Beispiel aus stationären Potenzialproblemen mit rot.symm. Elementen, Temperaturverteilung mit Statik (ingorp)	189
4.17	Beispiel aus instationären Potenzialproblemen mit rot.-symm. Elementen, zeitabhängige Erwärmung; mit Statik (ingori)	201
4.18	Beispiel aus stationären Potenzialproblemen mit rot.symm. Elementen, Magnetfeldberechnung (ingorm)	213
5	Spezielle, praxisnahe Beispiele	221
5.1	Beispiel aus der linearen Statik mit Stabelementen, einfacher Kran (kran)	221
5.1.1	Ziel dieser Aufgabe	221
5.1.2	Eigenschaften von Stabelementen	222
5.1.3	Einführungsbeispiel Teleskopmast	225
5.1.4	Das Drehgestell mit Kugeldrehkranzverbindung	229
5.1.5	Der Turm	244
5.1.6	Der Ausleger mit Abspannstützen	248
5.1.7	Verbindungselemente – Seile, Bolzen, Stangen	254
5.1.8	Randbedingungen, Eigengewichtsbelastung	259
5.1.9	Bestimmung der Gewichte, Massenschwerpunkt	261
5.1.10	Verkehrslasten, das erste Rechenergebnis	264
5.1.11	Kraftverteilung im Drehkranz	269
5.1.12	Untersuchung beliebiger Auslegerstellungen, Windlast	270

5.1.13	Kritische Lastfallkombination nach „Theorie 2. Ordnung“	274
5.1.14	Dynamische Analyse, Standsicherheitsnachweis bei Erdbeben...	277
5.2	Beispiel aus der Medizintechnik, Spannungsverteilung im Oberschenkelknochen (knoch).....	287
5.3	Ein Beispiel aus der Mikrosystemtechnik, Verformung und Spannungsverteilung in einem Sensor (sensor).....	299
5.4	Kragträger aus Stabelementen mit Wölbkrafttorsion (woelb).....	305
6	Weitere wichtige und nützliche Funktionen des FEM-Programms	313
6.1	Rotationssymmetrische Elemente mit allgemeiner Belastung (Fourier-Element)	313
6.1.1	Allgemeine Belastung bei Fourier-Elementen	314
6.1.2	Standardrandbedingungen.....	317
6.1.3	Knotensonderrandbedingungen (Fourier).....	318
6.1.4	Stabelementsonderrandbedingungen (Fourier).....	318
6.1.5	Mögliche Belastungen bei Fourier-Elementen	318
6.1.6	Eingabe der Belastung bei Fourier-Elementen	321
6.1.7	Kontrolle über Fourier-Synthese.....	322
6.1.8	Ergebnisausgabe bei Fourier-Elementen	323
6.1.9	Anwendung der Fourier-Elemente.....	324
6.2	Laminatelemente.....	325
6.2.1	Vergleichsspannungen bei Laminatelementen, Reservefaktor R.F.	327
6.2.2	Zusatzeingabe für Laminatelemente.....	328
6.2.3	Anwendung der Laminatelemente	331
6.3	Wichtige Warnungen am Bildschirm, was ist zu tun?.....	332
7	Installationsanleitung und Trainingsmanual WTP2000.....	337
7.1	Hardwareanforderungen.....	337
7.2	WTP2000 Trainingsversion.....	338
7.3	Trademark Information.....	338
7.4	Installation des FEM-Programms TP2000	338
7.4.1	Installationsverzeichnis	338
7.4.2	Installation	339
7.5	Installation von FEMAP (Demoversion).....	342
7.5.1	FEMAP-Voreinstellungen; Materialdatenbank.....	343
7.5.2	Installation und Anwendung der Materialdatenbank.....	343
7.5.3	FEMAP Interfaces	344
7.6	Vollversion von WTP2000	345
7.6.1	Installation der Vollversion von TP2000.....	345
7.6.2	Installation der Vollversion von FEMAP	347

7.7	WTP2000 Dokumentation und Hilfe	347
7.8	Ihre erste FEM-Berechnung mit WTP2000.....	348
7.8.1	Die ersten Schritte mit WTP2000 - Balkenmodell.....	348
7.8.2	Erzeugung des Finite-Elemente-Modells in FEMAP (Preprocessing).....	348
7.8.3	FEM-Berechnung mit WTP2000	349
7.8.4	Darstellung der Berechnungsergebnisse mit FEMAP (Postprocessing).....	351
7.9	Beispiel 1: Schalenmodell	352
7.9.1	Erzeugen der Geometrie	353
7.9.2	Definition des Materials und der Property.....	358
7.9.3	Generierung der Knoten und Elemente (Vernetzung).....	359
7.9.4	Definition von Randbedingungen und Lasten.....	361
7.9.5	Modellprüfung.....	365
7.9.6	FEM-Berechnung mit TP2000.....	365
7.9.7	Darstellung der Berechnungsergebnisse mit FEMAP (Postprocessing).....	368
7.9.8	Ergebnisdiskussion.....	370
7.10	Beispiel 2: Volumenmodell	378
7.10.1	Voreinstellungen.....	378
7.10.2	Erzeugung der Geometrie	379
7.10.3	Definition von Randbedingungen und Lasten.....	386
7.10.4	Automatische Vernetzung	388
7.10.5	FEM-Berechnung.....	390
7.10.6	Auswertung und Darstellung der Berechnungsergebnisse.....	391
8	Das Übungsprogramm WTP2000	397
8.1	Leistungsumfang WTP2000 Version 6.4.....	397
8.1.1	Für den Anwender A	398
8.1.2	Für den Anwender B zusätzlich.....	398
8.2	Das WTP2000-Optionfile	399
8.3	In WTP2000 verwendete Files.....	409
8.3.1	Workfiles (DA-Files) der Database.....	410
8.3.2	Aufbau der Workfiles gemäß Optionfile	410
8.3.3	Verwendung der Workfiles	411
8.3.4	Temporäre TP-Files (sequentielle Files).....	412
8.3.5	Projektabhängige Files (sequentielle Files).....	412
8.4	Anhang: Die wichtigsten FEMAP-Menüs in deutsch.....	413
8.5	Anhang: Verwendete Einheiten.....	417
	Literatur	419
	Sachverzeichnis	421