

Dipl.-Ing. Clemens Groth
Dr.-Ing. Günter Müller

FEM für Praktiker – Band 3: Temperaturfelder

Basiswissen und Arbeitsbeispiele
zu FEM-Anwendungen der Temperaturfeldberechnung –
Lösungen mit dem Programm ANSYS® 5.5

3., aktualisierte Auflage

Mit CD-ROM und zahlreichen Beispielen



Inhaltsverzeichnis

Teil I Physikalische Grundlagen	1
Lernziel	1
1 Temperaturfelder und Wärmeübertragung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Stationäre und instationäre Wärmeübertragung	2
1.3 Lineare und nichtlineare Wärmeübertragung	3
1.4 Wärmeleitung (Konduktion)	3
1.5 Wärmeübergang (Konvektion)	4
1.6 Wärmestrahlung	6
1.7 Wärmequellen und -senken	6
1.8 Wärmekapazität und -speicherung	7
1.9 Phasenübergang	7
2 Grundgleichungen der Wärmeübertragung	9
2.1 Einleitung	9
2.2 Wärmeleitung (Konduktion)	10
2.3 Wärmeübergang (Konvektion)	12
2.4 Wärmestrahlung	13
2.5 Phasenübergang	15
3 Analoge Feldanwendungen	19
3.1 Einleitung	19
3.2 Grundlagen	19
3.3 Elektrostatisches Feld	21
3.4 Elektrische Leitung	22
3.5 Sickerströmung	24
3.6 Torsion von Wellen oder Profilen	24
3.7 Potentialströmung	25
3.8 Diffusion	27
3.9 Vorgespannte Membranen	28
Literatur	29
Teil II Einführung in die Finite-Element-Methode	30
Lernziel	30
1 Grundidee der Finite-Element-Methode	30
1.1 Vorbemerkungen	30
1.2 Rechnerische Simulation	31
1.3 Die Finite-Element-Methode (FEM)	32
1.4 Berechnung komplexer Geometrien mit FEM	42
1.5 Anwendung der FEM auf transiente Aufgaben	42

2	Einführung in die Theorie der FEM anhand eines einfachen nachvollziehbaren Beispiels	44
2.1	Aufgabenstellung	44
2.2	Analytische Lösung	45
2.3	Lösung nach der Finite Elemente Methode	49
2.4	Steigerung der Genauigkeit der Ergebnisse	64
2.5	Konvergenzbetrachtung	85
	Literatur	89
Teil III Handhabung des ANSYS/ED-Programms		90
	Lernziel	90
1	Überblick über Temperaturfeldberechnungen	91
1.1	Einleitung	91
1.2	Ablauf einer Finite-Element-Berechnung	96
1.3	Temperaturfeldberechnungen mit dem ANSYS/ED-Programm	100
2	Stationäre Temperaturfeldberechnungen	103
2.1	Was ist eine stationäre Temperaturfeldberechnung?	103
2.2	Wie stationäre Temperaturfeldberechnungen durchgeführt werden	103
3	Transiente Temperaturfeldberechnungen	130
3.1	Was ist eine transiente Temperaturfeldberechnung	130
3.2	Wie transiente Temperaturfeldberechnungen durchgeführt werden	130
3.3	Sonstige Hinweise	141
4	Temperatur-Struktur-Kopplung	142
4.1	Die Berechnung des Temperaturfeldes	143
4.2	Die Strukturmechanik-Berechnung	143
5	Phasenwechsel	146
6	Wärmestrahlung	147
6.1	Was ist Wärmestrahlung?	147
6.2	Wie Probleme mit Wärmestrahlung gelöst werden	148
6.3	Die Elemente zur Modellierung von Oberflächeneffekten	149
6.4	LINK31, das eindimensionale Element für Wärmestrahlung	150
6.5	AUX12, der Generator für Strahlungsmatrizen	150
7	Analoge Felder	157

8	Multiphysik (Koppelfelder)	158
8.1	Hinweise zur Handhabung des ANSYS-Programms	160
8.2	Elektrisch-Thermische Multiphysik-Berechnungen	161
8.3	Thermisch-Strukturmechanische Multiphysik-Berechnungen	162
8.4	Elektrisch-Thermisch-Strukturmechanische Multiphysik-Berechnungen	163
8.5	Fluiddynamisch-Thermische Multiphysik-Berechnungen	163
8.6	Magnetisch-Elektrisch-Thermisch-Strukturmechanische Multiphysik-Berechnungen	163
9	Fluiddynamisch-Thermisches Koppelfeld mit dem Elementtyp FLUID66 ..	164
	Literatur	168
Teil IV Beispiele		169
	Lernziel	169
	Anforderungen an den Anwender	169
	Hinweise zum Nachvollziehen der Beispiele	170
1	Beispiele zu stationären Temperaturfeldern	171
1.1	Stationäre Temperaturfelder, Einarbeitungsbeispiel	171
1.2	Stationäre Temperaturfelder, Rohrleitungsabstützung	197
1.3	Stationäre Temperaturfelder, Hausmauer	218
1.4	Stationäre Temperaturfelder, Quader mit Oberflächenlasten	228
2	Beispiele zu transienten Temperaturfeldern	242
2.1	Transiente Temperaturfelder, Einarbeitungsbeispiel	242
2.2	Transiente Temperaturfelder, Hausmauer	252
2.3	Transiente Temperaturfelder, Schweißnaht	272
2.4	Transiente Temperaturfelder, Bremsscheibe	284
3	Beispiele zu Phasenwechsel	290
3.1	Phasenwechsel, Einarbeitungsbeispiel	290
3.2	Phasenwechsel, Gefrierender Wasserspalt	298
4	Beispiele zu Wärmestrahlung	309
4.1	Wärmestrahlung, Einarbeitungsbeispiel	310
4.2	Wärmestrahlung, Verifikation der Strahlungsmatrix	324
4.3	Wärmestrahlung, Abbrand eines Holzbalken-Querschnittes	329
4.4	Wärmestrahlung, Sandia-Benchmark-Beispiel	346
5	Beispiele zu analogen Feldberechnungen	366
5.1	Analoge Feldberechnung, Vorgespannte Membran	366
5.2	Analoge Feldberechnung, Plattenkondensator	373
5.3	Analoge Feldberechnung, 2-Draht-Leitung	383

6	Beispiele zu Multiphysik-Berechnungen	389
6.1	Multiphysik-Berechnung, Einarbeitungsbeispiel	389
6.2	Multiphysik-Berechnung, Leiterbahnen auf einer Heizescheibe	395
6.3	Multiphysik-Berechnung, Aluminium-Schmelzbad	401
7	Beispiele zu Temperaturfeld- und Strukturberechnung	414
7.1	Temperatur-Struktur-Berechnung, Einarbeitungsbeispiel	414
7.2	Temperatur-Struktur-Berechnung, Dickwandiger Zylinder	424
7.3	Temperatur-Struktur-Berechnung, Flansch	433
8	Beispiele zum Fluidelement FLUID66	443
8.1	Fluidelement FLUID66, Einarbeitungsbeispiel	444
8.2	Fluidelement FLUID66, Flächenheizkörper	449
8.3	Fluidelement FLUID66, Rohrleitungsberechnung	458
9	Sonstige Beispiele	471
9.1	Sonstige Beispiele, Thermische Verknüpfung (constraint equation interface)	471
9.2	Sonstige Beispiele, Schweißnaht (element birth, element death)	474
9.3	Sonstige Beispiele, Schiffswand (Optimierung)	480
	Literatur	488

Anhänge 489

A Bibliothek der Temperaturfeld-Elemente im ANSYS/ED-Programm .. 489

	Hinweise	489	
1	Elementeingaben	489	
1.1	Dimensionen und Einheiten	489	
1.2	Elementtyp-Name	490	
1.3	Element-Knoten-Verknüpfung	495	
2	Dreiecks-, Prismen- und Tetraederelemente	495	
3	Harmonische Elemente	496	
4	Beschreibung der Elementtypen	496	
4.5	SOLID5	3-D Multifeld-Volumenelement	497
4.9	INFIN9	2-D Infinites Randelement	499
4.13	PLANE13	2-D Multifeld-Volumenelement	501
4.19	SURF19	2-D Oberflächeneffekt-Element	504
4.22	SURF22	3-D Oberflächeneffekt-Element	508
4.31	LINK31	Strahlungsverbindung-Element	512
4.32	LINK32	2-D Wärmeleitungs-Stabelement	514
4.33	LINK33	3-D Wärmeleitungs-Stabelement	516
4.34	LINK34	Konvektionsverbindung-Element	517
4.35	PLANE35	2-D 6-Knoten Dreieckselement	520

4.37	COMBIN37	Kontroll-, Regler-Element	522
4.39	COMBIN39	Nichtlineares Federelement	526
4.40	COMBIN40	Kombinationselement	529
4.47	INFIN47	3-D Infinites Randelement	530
4.50	MATRIX50	Superelement	531
4.55	PLANE55	2-D Temperatur-Element	534
4.57	SHELL57	Temperatur-Schalenelement	537
4.66	FLUID66	Temperatur-Fluid-Rohrelement	539
4.67	PLANE67	2-D Thermisch-elektrisches Element	543
4.68	LINK68	Thermisch-elektrisches Stabelement	546
4.69	SOLID69	3-D Thermisch-elektrisches Volumenelement	548
4.70	SOLID70	3-D Temperatur-Volumenelement	550
4.71	MASS71	Temperatur-Punktkapazität-Element	553
4.75	PLANE75	2-D Rotationssymmetrisches harmonisches Temperatur-Element	555
4.77	PLANE77	2-D 8-Knoten Temperatur-Element	558
4.78	PLANE78	2-D 8-Knoten Rotationssymmetrisches harmonisches Temperatur-Element	560
4.87	SOLID87	3-D 10-Knoten Temperatur-Tetraeder-Volumen- element	562
4.90	SOLID90	3-D 20-Knoten Temperatur-Quader- Volumenelement	564
4.98	SOLID98	Multifeld-Tetraeder-Volumenelement	566

Sachregister	571
-------------------------------	------------