

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
1.1 Maxwell'sche Gleichungen in integraler Form .....	1
1.2 Maxwell'sche Gleichungen in differenzieller Form .....	9
1.3 Herleitung der Differenzialgleichung für elektrostatische Felder .....	11
1.4 Herleitung der Differenzialgleichung für magnetostatische Felder .....	12
1.5 Herleitung der Differenzialgleichung für zeitlich veränderliche magnetische Felder .....	13
1.6 Herleitung der Differenzialgleichung für magnetische Felder inklusive Bewegung .....	15
1.7 Herleitung der Differenzialgleichung für harmonische magnetische Felder .....	16
1.8 Randbedingungen .....	16
1.9 Ableitung der Finite-Elemente-Theorie über Extremal- oder Residuenprinzipien .....	17
1.10 Berücksichtigung von Spannungsgleichungen .....	19
<b>2 Umsetzung der Finite-Elemente-Methode in ANSYS</b> .....	<b>21</b>
2.1 Elementtypen .....	21
2.2 Materialien .....	26
2.3 Sonder-Elementtypen/reale Konstanten .....	32
2.3.1 Spulen und massive Leiter .....	33
2.3.2 Elektrische Schaltkreiselemente .....	34
2.4 Anwendung von 2D, 2,5D und 3D .....	38
<b>3 Berechnungsverfahren für elektrische Maschinen</b> .....	<b>41</b>
<b>4 ANSYS-Vorgehensweise</b> .....	<b>43</b>
4.1 Preprocessing .....	44
4.2 Solution .....	49
4.3 Postprocessing .....	50
4.4 Zusammenfassung der Vorgehensweise .....	51

<b>5</b>	<b>Benutzermenüeinatz bei ANSYS</b> . . . . .	53
5.1	Bottom-up-Methode . . . . .	57
5.2	Top-down-Methode . . . . .	90
5.3	Vergleich beider Methoden . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Umwandlung von LOG-Files in APDL-Programme</b> . . . . .	99
6.1	Interpretation des LOG-Files . . . . .	101
6.1.1	Umgewandeltes LOG-File als APDL-Programm . . . . .	110
6.2	APDL-Programm ohne Kommentare . . . . .	117
6.3	Zusammenfassung . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Einführung von Schaltungselementen</b> . . . . .	121
7.1	Änderungen am Modell vor der Schaltungsgenerierung . . . . .	121
7.2	Generierung der Schaltungselemente . . . . .	129
7.3	Interpretation des LOG-Files mit Schaltung . . . . .	134
7.4	Umarbeitung des APDL-Files mit Schaltung . . . . .	137
7.4.1	Gesamtes Skript für die Modellgenerierung mit Schaltungselementen . . . . .	138
7.5	Harmonische Berechnung für feste Frequenz . . . . .	140
7.6	Auswertung der harmonischen Berechnung . . . . .	142
7.7	Harmonische Berechnung und Auswertung in einer Schleife . . . . .	148
<b>8</b>	<b>Umwandlung des Beispiels in Unterprogrammtechnik</b> . . . . .	153
<b>9</b>	<b>Berechnung elektrischer Maschinen mit ANSYS</b> . . . . .	157
9.1	Transformatoren . . . . .	157
9.2	Gleichstrommotoren . . . . .	157
9.3	Asynchronmaschinen . . . . .	158
9.4	Synchronmaschinen . . . . .	158
9.5	Linearmotoren . . . . .	158
<b>10</b>	<b>Berechnung eines Einphasentransformators</b> . . . . .	159
10.1	Aufbau des Modells . . . . .	167
10.2	Generierung der Verschaltung . . . . .	181
10.2.1	Primärteil-Verschaltung . . . . .	182
10.2.2	Sekundärteil-Verschaltung . . . . .	186
10.3	Rechnungsvorbereitung . . . . .	190
10.4	Statische Rechnung . . . . .	193
10.5	Harmonische Rechnung . . . . .	202
10.5.1	Rechnung bei sekundärseitigem Leerlauf und $f = 50$ Hz . . . . .	204
10.5.2	Rechnung bei sekundärseitigem Kurzschluss und $f = 50$ Hz . . . . .	206
10.5.3	Rechnung bei sekundärseitigem Lastwiderstand von $10 \Omega$ und $f = 50$ Hz . . . . .	208

10.6	Transiente Rechnung . . . . .	210
10.6.1	Transiente Rechnung bei Leerlauf und cosinusförmiger Primärspannung . . . . .	213
10.6.2	Transiente Rechnung bei Leerlauf und sinusförmiger Primärspannung . . . . .	215
10.6.3	Transiente Rechnung bei sekundärseitigem Kurzschluss und cosinusförmiger Primärspannung . . . . .	216
10.6.4	Transiente Rechnung bei sekundärseitigem Kurzschluss und sinusförmiger Primärspannung . . . . .	217
10.6.5	Transiente Rechnung bei sekundärseitiger Belastung mit $10 \Omega$ und cosinusförmiger Primärspannung . . . . .	218
10.6.6	Transiente Rechnung bei sekundärseitigem Leerlauf und cosinusförmiger Primärspannung und sekundärseitigem Kurzschluss zum Zeitpunkt $t = 0,05 \text{ s}$ . . . . .	219
10.7	Berücksichtigung der Nichtlinearität des Eisens . . . . .	220
<b>11</b>	<b>Berechnung eines Dreiphasentransformators . . . . .</b>	<b>221</b>
11.1	Aufbau des Modells . . . . .	223
11.2	Generierung der Verschaltung . . . . .	258
11.2.1	Primärteil-Verschaltung . . . . .	259
11.2.2	Sekundärteil-Verschaltung . . . . .	262
11.3	Rechnungsvorbereitung . . . . .	267
11.4	Statische Rechnung . . . . .	270
11.5	Harmonische Rechnung . . . . .	278
11.5.1	Rechnung bei sekundärseitigem Leerlauf und $f = 50 \text{ Hz}$ . . . . .	278
11.5.2	Rechnung bei sekundärseitigem Kurzschluss und $f = 50 \text{ Hz}$ . . . . .	280
11.5.3	Rechnung bei sekundärseitiger Belastung mit $10 \Omega$ und $f = 50 \text{ Hz}$ . . . . .	281
11.6	Transiente Rechnung . . . . .	283
11.6.1	Transiente Rechnung bei sekundärseitigem Leerlauf . . . . .	284
11.6.2	Transiente Rechnung bei sekundärseitigem Kurzschluss . . . . .	286
11.6.3	Transiente Rechnung bei Leerlauf und sekundärseitigem Kurzschluss nach $0,1 \text{ s}$ . . . . .	287
11.7	Modellierung des Dreiphasentransformators über Spiegelung und Kopie . . . . .	289
<b>12</b>	<b>Berechnung einer Gleichstrommaschine mit Erregerwicklung . . . . .</b>	<b>297</b>
12.1	Aufbau des Finite-Element-Modells . . . . .	300
12.2	Generierung der Verschaltung . . . . .	346
12.2.1	Stator-Verschaltung . . . . .	347
12.2.2	Rotor-Verschaltung . . . . .	353
12.3	Abbildung des Kommutierungsvorgangs . . . . .	363
12.4	Interface zwischen Stator und Rotor . . . . .	364
12.5	Rechnungsvorbereitung . . . . .	370

12.6	Statische Rechnung . . . . .	373
12.6.1	Speisung des Ständers . . . . .	376
12.6.2	Speisung des Läufers . . . . .	386
12.6.3	Ankerrückwirkung . . . . .	393
12.7	Harmonische Rechnung . . . . .	398
12.8	Transiente Rechnung . . . . .	398
12.8.1	Grundlagen der transienten Rechnung für rotatorische Bewegung	399
12.8.2	Anwendung der transienten Rechnung für rotatorische Bewegung	400
12.8.3	Berechnung der induzierten Spannung . . . . .	409
12.8.4	Ankerkurzschluss bei fester Drehzahl . . . . .	412
12.8.5	Hochlaufrechnung . . . . .	415
12.8.6	Hochlauf ab Startdrehzahl 400 U/min ohne Gegenmoment . . . . .	432
12.8.7	Belastung ab Startdrehzahl 500 U/min mit Gegenmoment 10 Nm	436
12.8.8	Belastung ab Startdrehzahl 500 U/min mit Gegenmoment 100 Nm	439
12.8.9	Hinweis zur Verwendung des SPARSE-Matrix-Solvers . . . . .	443
12.9	Berücksichtigung von Zusatzwicklungen . . . . .	445
12.9.1	Berücksichtigung einer Kompensationswicklung . . . . .	446
12.9.2	Berücksichtigung einer Wendepolwicklung . . . . .	462
12.9.3	Berücksichtigung einer Kompoundwicklung . . . . .	476
12.9.4	Berücksichtigung von Kompensations- und Wendepolwicklung .	490
13	<b>Aufbau eigener Benutzermenüs . . . . .</b>	<b>501</b>
13.1	Menüeinleitung . . . . .	502
13.2	Aufbau eines Untermenüs . . . . .	504
13.3	Einlesen von Parametern . . . . .	507
13.4	Aufruf von APDL-Skripten . . . . .	513
13.5	Einbindung des User-Menüs in das ANSYS-Benutzer-Menü . . . . .	513
14	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>519</b>
	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>521</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>523</b>