

# 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 differentieller 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>	<b>53</b>
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>	<b>99</b>
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>	<b>121</b>
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>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>Berechnung elektrischer Maschinen mit ANSYS</b>	<b>157</b>
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>	<b>159</b>
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 $f = 50 \text{ Hz}$	204
10.5.2	Rechnung bei sekundärseitigem Kurzschluss und $f = 50 \text{ Hz}$	206
10.5.3	Rechnung bei sekundärseitigem Lastwiderstand von $10 \Omega$ und $f = 50 \text{ Hz}$	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
11	<b>Berechnung eines Dreiphasentransformators</b>	221
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
12	<b>Berechnung einer Gleichstrommaschine mit Erregerwicklung</b>	297
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>