



Werner Blaß
Qualifizierter
Nachwuchs



Servoantriebe
Über Ethernet
Powerlink vernetzt

Schütze
Halbleiter versus
Elektromechnik

VDE
VERLAG

Motion & Mechatronics

Sonderausgabe der **etz**

Belegexemplar

Bitte weiterleiten an
Herrn Professor Aschendorf
Bitte beachten Sie den Beitrag
auf Seite 32
etz-Redaktion



Einbindung eines Finite-Elemente-Tools zur Unterstützung in der Lehre

EM-Praktikum ist ein Software-Tool auf Basis des Finite-Elemente-Programms Ansys und dient der Unterstützung von Lehrveranstaltungen zu elektrischen Maschinen und Antrieben. Ansys erlaubt mittels Video-Clips die Phänomene und Funktionen von elektrischen Maschinen zu verdeutlichen. Darüber hinaus kann EM-Praktikum auch Vorlesungen zur Theorie der finiten Elemente unterstützen und Studenten die Handhabung von Ansys im Bereich Modellierung von elektrischen Maschinen aufzeigen. Die Möglichkeiten erstrecken sich dabei über statische, harmonische und transiente Berechnungen. Das Tool erlaubt Änderungen vorzunehmen, um das Betriebsverhalten elektrischer Maschinen zu optimieren. Aber auch für Ansys-Anwender aus der Industrie ist das Tool zur Ergänzung von Trainingskursen sinnvoll.

Bernd Aschendorf

Jedem Ingenieur, der in seiner Studentenlaufbahn Vorlesungen zu elektrischen Maschinen und Antrieben besucht hat, ist bekannt, dass die Darstellung von Phänomenen, wie Stromverdrängung, Induktionsprozesse, Kommutierung, Ankerückwirkung, Drehfeldentstehung, Hochlauf etc., zumeist nur mit Beschreibungen oder statischen Bildern möglich ist. Eine Hilfestellung mit kleinen Videosequenzen von Feldd Bildern oder -verläufen ist nur für wenige Lehrende greifbar, eine Erklärung mit parametrischen Änderungen in der Lehrveranstaltung ist kaum denkbar. Gerade die transparenten Möglichkeiten der Finite-Elemente-Methode (FEM) wären hier hilfreich, demgegenüber ist die Modellierung von Maschinen oder Phänomenen allerdings sehr aufwendig.

In Lehrveranstaltungen zur Finite-Elemente-Methode oder deren Anwendung wiederum stehen komplexe Theorie und das Erlernen einer großen Know-How-Menge im Bereich von Modellierung, Berechnungs- und Analysemethoden im Vordergrund. Legt der Lehrende großen

bringen. Ansys bietet hier den Hochschulen ausreichend Unterstützung an, indem Lizenzen zu günstigen Kosten auch in Klassenraumstärke benutzt werden können. Demgegenüber ist Ansys zwar mit ausreichend Erfahrung leicht bedienbar, jedoch müssen die Erfahrungen mit dem GUI (Graphical User Interface) und der Ansys-eigenen APDL-Sprache (Ansys Parametric Design Language) erst gesammelt werden.

So wie den Studierenden ergeht es auch den eigentlichen Ansys-Anwendern

```

Elementdefinition:
ET,1,PLANE53
ET,2,PLANE53
ET,3,PLANE53
KEYOPT,1,1,3
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,3,3,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
ET,4,PLANE53
KEYOPT,4,1,3
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,4,0
KEYOPT,4,5,0
KEYOPT,4,7,0
ET,5,PLANE53
ET,11,PLANE53
ET,12,PLANE53
ET,13,PLANE53
KEYOPT,13,1,4
KEYOPT,13,2,0
KEYOPT,13,3,0
KEYOPT,13,4,0
KEYOPT,13,5,0
KEYOPT,13,7,0
ET,14,PLANE53
KEYOPT,14,1,4
KEYOPT,14,2,0
KEYOPT,14,3,0
KEYOPT,14,4,0
KEYOPT,14,5,0
KEYOPT,14,7,0
ET,15,PLANE53

Materialdefinition:
*IF,nichtlin,ne,1,then
MP,MURX,1,murxa
MP,MURX,11,murxi
*ELSE
  EISEN2.TXT
  EISEN2.TXT
*ENDIF
MP,MURX,2,1
MP,MURX,3,1/leita
MP,MURX,3,1/leita
MP,MURX,4,1
MP,MURX,4,1/leita
MP,MURX,5,1
MP,MURX,12,1
MP,MURX,13,1
MP,MURX,13,1/leiti
MP,MURX,14,1
MP,MURX,14,1/leiti
MP,MURX,15,1

*IF,zweischicht,eq,1,then
R,3,wickbreit,wickhoehe/2,mwini,jochtiefe,1,fil
R,4,wickbreit,wickhoehe/2,mwini,jochtiefe,1,fil
*ELSE
R,3,wickbreit,wickhoehe,mwini,jochtiefe,1,fil
R,4,wickbreit,wickhoehe,mwini,jochtiefe,1,fil
*ENDIF
R,13,wickbreite2,wickhoehe2,,jochtiefe,1
R,14,wickbreite2,wickhoehe2,,jochtiefe,1
*IF,mwini,eq,1,then
  keyopt,3,1,4
  keyopt,4,1,4
*IF,zweischicht,eq,1,then
R,3,wickbreit,wickhoehe/2,,jochtiefe,1
R,4,wickbreit,wickhoehe/2,,jochtiefe,1
*ELSE
R,3,wickbreit,wickhoehe,,jochtiefe,1
R,4,wickbreit,wickhoehe,,jochtiefe,1
*ENDIF

Statorgeometriedefinition:
zl=2*m*p*q
okey,1
k,1,raussen,0
k,2,raussen,360/(2*pi)
k,3,raussen-jochdicke,0
k,4,raussen-jochdicke,360/(2*pi)
okey,0
*IF,zweischicht,eq,1,then
k,5,raussen-jochdicke,wickhoehe/2,wickisoli,0
k,6,raussen-jochdicke,wickhoehe/2,wickisoli,wickbreit/2
*ELSE
k,5,raussen-jochdicke,wickhoehe,0
k,6,raussen-jochdicke,wickhoehe,wickbreit/2
*ENDIF
jochdicke2=raussen-jochdicke-delta-rinnen
okey,1
k,7,raussen-2*jochdicke,wickbreit/2
okey,1
k,8,rinnen,0
k,9,rinnen,360/(2*pi)
k,10,rinnen-jochdicke2,0
k,11,rinnen-jochdicke2,360/(2*pi)
okey,0
k,12,2*raussen,wickbreit/2
okey,1
k,13,rinnen-jochdicke2-delta/2,0
k,14,rinnen-jochdicke2-delta/2,360/(2*pi)
okey,0
*IF,zweischicht,eq,1,then
k,15,raussen-jochdicke,wickhoehe/2,0
k,16,raussen-jochdicke,wickhoehe/2,wickbreit/2
k,17,raussen-jochdicke,wickhoehe,wickisoli,0
k,18,raussen-jochdicke,wickhoehe,wickisoli,wickbreit/2
*ELSE
k,15,raussen-jochdicke,wickhoehe/2,0
k,16,raussen-jochdicke,wickhoehe/2,wickbreit/2
k,17,raussen-jochdicke,wickhoehe,wickisoli,0
k,18,raussen-jochdicke,wickhoehe,wickisoli,wickbreit/2
*ENDIF
okey,1
k,19,rinnen-jochdicke2-delta/2,0
k,20,rinnen-jochdicke2-delta/2,360/(2*pi)
okey,1
k,1,2
k,1,2
k,1,2
okey,0
k,1,2,4
k,1,2,5
k,1,2,6
k,1,2,15
k,1,2,16
okey,1
k,1,2,7
k,1,2,8
k,1,2,9
k,1,2,10
k,1,2,11
k,1,2,12
k,1,2,13
k,1,2,14
k,1,2,15
k,1,2,16
k,1,2,17
k,1,2,18
k,1,2,19
k,1,2,20
k,1,2,21
k,1,2,22
k,1,2,23
k,1,2,24
k,1,2,25
k,1,2,26
k,1,2,27
k,1,2,28
k,1,2,29
k,1,2,30
k,1,2,31
k,1,2,32
k,1,2,33
k,1,2,34
k,1,2,35
k,1,2,36
k,1,2,37
k,1,2,38
k,1,2,39
k,1,2,40
k,1,2,41
k,1,2,42
k,1,2,43
k,1,2,44
k,1,2,45
k,1,2,46
k,1,2,47
k,1,2,48
k,1,2,49
k,1,2,50
k,1,2,51
k,1,2,52
k,1,2,53
k,1,2,54
k,1,2,55
k,1,2,56
k,1,2,57
k,1,2,58
k,1,2,59
k,1,2,60
k,1,2,61
k,1,2,62
k,1,2,63
k,1,2,64
k,1,2,65
k,1,2,66
k,1,2,67
k,1,2,68
k,1,2,69
k,1,2,70
k,1,2,71
k,1,2,72
k,1,2,73
k,1,2,74
k,1,2,75
k,1,2,76
k,1,2,77
k,1,2,78
k,1,2,79
k,1,2,80
k,1,2,81
k,1,2,82
k,1,2,83
k,1,2,84
k,1,2,85
k,1,2,86
k,1,2,87
k,1,2,88
k,1,2,89
k,1,2,90
k,1,2,91
k,1,2,92
k,1,2,93
k,1,2,94
k,1,2,95
k,1,2,96
k,1,2,97
k,1,2,98
k,1,2,99
k,1,2,100
k,1,2,101
k,1,2,102
k,1,2,103
k,1,2,104
k,1,2,105
k,1,2,106
k,1,2,107
k,1,2,108
k,1,2,109
k,1,2,110
k,1,2,111
k,1,2,112
k,1,2,113
k,1,2,114
k,1,2,115
k,1,2,116
k,1,2,117
k,1,2,118
k,1,2,119
k,1,2,120
k,1,2,121
k,1,2,122
k,1,2,123
k,1,2,124
k,1,2,125
k,1,2,126
k,1,2,127
k,1,2,128
k,1,2,129
k,1,2,130
k,1,2,131
k,1,2,132
k,1,2,133
k,1,2,134
k,1,2,135
k,1,2,136
k,1,2,137
k,1,2,138
k,1,2,139
k,1,2,140
k,1,2,141
k,1,2,142
k,1,2,143
k,1,2,144
k,1,2,145
k,1,2,146
k,1,2,147
k,1,2,148
k,1,2,149
k,1,2,150
k,1,2,151
k,1,2,152
k,1,2,153
k,1,2,154
k,1,2,155
k,1,2,156
k,1,2,157
k,1,2,158
k,1,2,159
k,1,2,160
k,1,2,161
k,1,2,162
k,1,2,163
k,1,2,164
k,1,2,165
k,1,2,166
k,1,2,167
k,1,2,168
k,1,2,169
k,1,2,170
k,1,2,171
k,1,2,172
k,1,2,173
k,1,2,174
k,1,2,175
k,1,2,176
k,1,2,177
k,1,2,178
k,1,2,179
k,1,2,180
k,1,2,181
k,1,2,182
k,1,2,183
k,1,2,184
k,1,2,185
k,1,2,186
k,1,2,187
k,1,2,188
k,1,2,189
k,1,2,190
k,1,2,191
k,1,2,192
k,1,2,193
k,1,2,194
k,1,2,195
k,1,2,196
k,1,2,197
k,1,2,198
k,1,2,199
k,1,2,200
k,1,2,201
k,1,2,202
k,1,2,203
k,1,2,204
k,1,2,205
k,1,2,206
k,1,2,207
k,1,2,208
k,1,2,209
k,1,2,210
k,1,2,211
k,1,2,212
k,1,2,213
k,1,2,214
k,1,2,215
k,1,2,216
k,1,2,217
k,1,2,218
k,1,2,219
k,1,2,220
k,1,2,221
k,1,2,222
k,1,2,223
k,1,2,224
k,1,2,225
k,1,2,226
k,1,2,227
k,1,2,228
k,1,2,229
k,1,2,230
k,1,2,231
k,1,2,232
k,1,2,233
k,1,2,234
k,1,2,235
k,1,2,236
k,1,2,237
k,1,2,238
k,1,2,239
k,1,2,240
k,1,2,241
k,1,2,242
k,1,2,243
k,1,2,244
k,1,2,245
k,1,2,246
k,1,2,247
k,1,2,248
k,1,2,249
k,1,2,250
k,1,2,251
k,1,2,252
k,1,2,253
k,1,2,254
k,1,2,255
k,1,2,256
k,1,2,257
k,1,2,258
k,1,2,259
k,1,2,260
k,1,2,261
k,1,2,262
k,1,2,263
k,1,2,264
k,1,2,265
k,1,2,266
k,1,2,267
k,1,2,268
k,1,2,269
k,1,2,270
k,1,2,271
k,1,2,272
k,1,2,273
k,1,2,274
k,1,2,275
k,1,2,276
k,1,2,277
k,1,2,278
k,1,2,279
k,1,2,280
k,1,2,281
k,1,2,282
k,1,2,283
k,1,2,284
k,1,2,285
k,1,2,286
k,1,2,287
k,1,2,288
k,1,2,289
k,1,2,290
k,1,2,291
k,1,2,292
k,1,2,293
k,1,2,294
k,1,2,295
k,1,2,296
k,1,2,297
k,1,2,298
k,1,2,299
k,1,2,300
k,1,2,301
k,1,2,302
k,1,2,303
k,1,2,304
k,1,2,305
k,1,2,306
k,1,2,307
k,1,2,308
k,1,2,309
k,1,2,310
k,1,2,311
k,1,2,312
k,1,2,313
k,1,2,314
k,1,2,315
k,1,2,316
k,1,2,317
k,1,2,318
k,1,2,319
k,1,2,320
k,1,2,321
k,1,2,322
k,1,2,323
k,1,2,324
k,1,2,325
k,1,2,326
k,1,2,327
k,1,2,328
k,1,2,329
k,1,2,330
k,1,2,331
k,1,2,332
k,1,2,333
k,1,2,334
k,1,2,335
k,1,2,336
k,1,2,337
k,1,2,338
k,1,2,339
k,1,2,340
k,1,2,341
k,1,2,342
k,1,2,343
k,1,2,344
k,1,2,345
k,1,2,346
k,1,2,347
k,1,2,348
k,1,2,349
k,1,2,350
k,1,2,351
k,1,2,352
k,1,2,353
k,1,2,354
k,1,2,355
k,1,2,356
k,1,2,357
k,1,2,358
k,1,2,359
k,1,2,360
k,1,2,361
k,1,2,362
k,1,2,363
k,1,2,364
k,1,2,365
k,1,2,366
k,1,2,367
k,1,2,368
k,1,2,369
k,1,2,370
k,1,2,371
k,1,2,372
k,1,2,373
k,1,2,374
k,1,2,375
k,1,2,376
k,1,2,377
k,1,2,378
k,1,2,379
k,1,2,380
k,1,2,381
k,1,2,382
k,1,2,383
k,1,2,384
k,1,2,385
k,1,2,386
k,1,2,387
k,1,2,388
k,1,2,389
k,1,2,390
k,1,2,391
k,1,2,392
k,1,2,393
k,1,2,394
k,1,2,395
k,1,2,396
k,1,2,397
k,1,2,398
k,1,2,399
k,1,2,400
k,1,2,401
k,1,2,402
k,1,2,403
k,1,2,404
k,1,2,405
k,1,2,406
k,1,2,407
k,1,2,408
k,1,2,409
k,1,2,410
k,1,2,411
k,1,2,412
k,1,2,413
k,1,2,414
k,1,2,415
k,1,2,416
k,1,2,417
k,1,2,418
k,1,2,419
k,1,2,420
k,1,2,421
k,1,2,422
k,1,2,423
k,1,2,424
k,1,2,425
k,1,2,426
k,1,2,427
k,1,2,428
k,1,2,429
k,1,2,430
k,1,2,431
k,1,2,432
k,1,2,433
k,1,2,434
k,1,2,435
k,1,2,436
k,1,2,437
k,1,2,438
k,1,2,439
k,1,2,440
k,1,2,441
k,1,2,442
k,1,2,443
k,1,2,444
k,1,2,445
k,1,2,446
k,1,2,447
k,1,2,448
k,1,2,449
k,1,2,450
k,1,2,451
k,1,2,452
k,1,2,453
k,1,2,454
k,1,2,455
k,1,2,456
k,1,2,457
k,1,2,458
k,1,2,459
k,1,2,460
k,1,2,461
k,1,2,462
k,1,2,463
k,1,2,464
k,1,2,465
k,1,2,466
k,1,2,467
k,1,2,468
k,1,2,469
k,1,2,470
k,1,2,471
k,1,2,472
k,1,2,473
k,1,2,474
k,1,2,475
k,1,2,476
k,1,2,477
k,1,2,478
k,1,2,479
k,1,2,480
k,1,2,481
k,1,2,482
k,1,2,483
k,1,2,484
k,1,2,485
k,1,2,486
k,1,2,487
k,1,2,488
k,1,2,489
k,1,2,490
k,1,2,491
k,1,2,492
k,1,2,493
k,1,2,494
k,1,2,495
k,1,2,496
k,1,2,497
k,1,2,498
k,1,2,499
k,1,2,500
k,1,2,501
k,1,2,502
k,1,2,503
k,1,2,504
k,1,2,505
k,1,2,506
k,1,2,507
k,1,2,508
k,1,2,509
k,1,2,510
k,1,2,511
k,1,2,512
k,1,2,513
k,1,2,514
k,1,2,515
k,1,2,516
k,1,2,517
k,1,2,518
k,1,2,519
k,1,2,520
k,1,2,521
k,1,2,522
k,1,2,523
k,1,2,524
k,1,2,525
k,1,2,526
k,1,2,527
k,1,2,528
k,1,2,529
k,1,2,530
k,1,2,531
k,1,2,532
k,1,2,533
k,1,2,534
k,1,2,535
k,1,2,536
k,1,2,537
k,1,2,538
k,1,2,539
k,1,2,540
k,1,2,541
k,1,2,542
k,1,2,543
k,1,2,544
k,1,2,545
k,1,2,546
k,1,2,547
k,1,2,548
k,1,2,549
k,1,2,550
k,1,2,551
k,1,2,552
k,1,2,553
k,1,2,554
k,1,2,555
k,1,2,556
k,1,2,557
k,1,2,558
k,1,2,559
k,1,2,560
k,1,2,561
k,1,2,562
k,1,2,563
k,1,2,564
k,1,2,565
k,1,2,566
k,1,2,567
k,1,2,568
k,1,2,569
k,1,2,570
k,1,2,571
k,1,2,572
k,1,2,573
k,1,2,574
k,1,2,575
k,1,2,576
k,1,2,577
k,1,2,578
k,1,2,579
k,1,2,580
k,1,2,581
k,1,2,582
k,1,2,583
k,1,2,584
k,1,2,585
k,1,2,586
k,1,2,587
k,1,2,588
k,1,2,589
k,1,2,590
k,1,2,591
k,1,2,592
k,1,2,593
k,1,2,594
k,1,2,595
k,1,2,596
k,1,2,597
k,1,2,598
k,1,2,599
k,1,2,600
k,1,2,601
k,1,2,602
k,1,2,603
k,1,2,604
k,1,2,605
k,1,2,606
k,1,2,607
k,1,2,608
k,1,2,609
k,1,2,610
k,1,2,611
k,1,2,612
k,1,2,613
k,1,2,614
k,1,2,615
k,1,2,616
k,1,2,617
k,1,2,618
k,1,2,619
k,1,2,620
k,1,2,621
k,1,2,622
k,1,2,623
k,1,2,624
k,1,2,625
k,1,2,626
k,1,2,627
k,1,2,628
k,1,2,629
k,1,2,630
k,1,2,631
k,1,2,632
k,1,2,633
k,1,2,634
k,1,2,635
k,1,2,636
k,1,2,637
k,1,2,638
k,1,2,639
k,1,2,640
k,1,2,641
k,1,2,642
k,1,2,643
k,1,2,644
k,1,2,645
k,1,2,646
k,1,2,647
k,1,2,648
k,1,2,649
k,1,2,650
k,1,2,651
k,1,2,652
k,1,2,653
k,1,2,654
k,1,2,655
k,1,2,656
k,1,2,657
k,1,2,658
k,1,2,659
k,1,2,660
k,1,2,661
k,1,2,662
k,1,2,663
k,1,2,664
k,1,2,665
k,1,2,666
k,1,2,667
k,1,2,668
k,1,2,669
k,1,2,670
k,1,2,671
k,1,2,672
k,1,2,673
k,1,2,674
k,1,2,675
k,1,2,676
k,1,2,677
k,1,2,678
k,1,2,679
k,1,2,680
k,1,2,681
k,1,2,682
k,1,2,683
k,1,2,684
k,1,2,685
k,1,2,686
k,1,2,687
k,1,2,688
k,1,2,689
k,1,2,690
k,1,2,691
k,1,2,692
k,1,2,693
k,1,2,694
k,1,2,695
k,1,2,696
k,1,2,697
k,1,2,698
k,1,2,699
k,1,2,700
k,1,2,701
k,1,2,702
k,1,2,703
k,1,2,704
k,1,2,705
k,1,2,706
k,1,2,707
k,1,2,708
k,1,2,709
k,1,2,710
k,1,2,711
k,1,2,712
k,1,2,713
k,1,2,714
k,1,2,715
k,1,2,716
k,1,2,717
k,1,2,718
k,1,2,719
k,1,2,720
k,1,2,721
k,1,2,722
k,1,2,723
k,1,2,724
k,1,2,725
k,1,2,726
k,1,2,727
k,1,2,728
k,1,2,729
k,1,2,730
k,1,2,731
k,1,2,732
k,1,2,733
k,1,2,734
k,1,2,735
k,1,2,736
k,1,2,737
k,1,2,738
k,1,2,739
k,1,2,740
k,1,2,741
k,1,2,742
k,1,2,743
k,1,2,744
k,1,2,745
k,1,2,746
k,1,2,747
k,1,2,748
k,1,2,749
k,1,2,750
k,1,2,751
k,1,2,752
k,1,2,753
k,1,2,754
k,1,2,755
k,1,2,756
k,1,2,757
k,1,2,758
k,1,2,759
k,1,2,760
k,1,2,761
k,1,2,762
k,1,2,763
k,1,2,764
k,1,2,765
k,1,2,766
k,1,2,767
k,1,2,768
k,1,2,769
k,1,2,770
k,1,2,771
k,1,2,772
k,1,2,773
k,1,2,774
k,1,2,775
k,1,2,776
k,1,2,777
k,1,2,778
k,1,2,779
k,1,2,780
k,1,2,781
k,1,2,782
k,1,2,783
k,1,2,784
k,1,2,785
k,1,2,786
k,1,2,787
k,1,2,788
k,1,2,789
k,1,2,790
k,1,2,791
k,1,2,792
k,1,2,793
k,1,2,794
k,1,2,795
k,1,2,796
k,1,2,797
k,1,2,798
k,1,2,799
k,1,2,800
k,1,2,801
k,1,2,802
k,1,2,803
k,1,2,804
k,1,2,805
k,1,2,806
k,1,2,807
k,1,2,808
k,1,2,809
k,1,2,810
k,1,2,811
k,1,2,812
k,1,2,813
k,1,2,814
k,1,2,815
k,1,2,816
k,1,2,817
k,1,2,818
k,1,2,819
k,1,2,820
k,1,2,821
k,1,2,822
k,1,2,823
k,1,2,824
k,1,2,825
k,1,2,826
k,1,2,827
k,1,2,828
k,1,2,829
k,1,2,830
k,1,2,831
k,1,2,832
k,1,2,833
k,1,2,834
k,1,2,835
k,1,2,836
k,1,2,837
k,1,2,838
k,1,2,839
k,1,2,840
k,1,2,841
k,1,2,842
k,1,2,843
k,1,2,844
k,1,2,845
k,1,2,846
k,1,2,847
k,1,2,848
k,1,2,849
k,1,2,850
k,1,2,851
k,1,2,852
k,1,2,853
k,1,2,854
k,1,2,855
k,1,2,856
k,1,2,857
k,1,2,858
k,1,2,859
k,1,2,860
k,1,2,861
k,1,2,862
k,1,2,863
k,1,2,864
k,1,2,865
k,1,2,866
k,1,2,867
k,1,2,868
k,1,2,869
k,1,2,870
k,1,2,871
k,1,2,872
k,1,2,873
k,1,2,874
k,1,2,875
k,1,2,876
k,1,2,877
k,1,2,878
k,1,2,879
k,1,2,880
k,1,2,881
k,1,2,882
k,1,2,883
k,1,2,884
k,1,2,885
k,1,2,886
k,1,2,887
k,1,2,888
k,1,2,889
k,1,2,890
k,1,2,891
k,1,2,892
k,1,2,893
k,1,2,894
k,1,2,895
k,1,2,896
k,1,2,897
k,1,2,898
k,1,2,899
k,1,2,900
k,1,2,901
k,1,2,902
k,1,2,903
k,1,2,904
k,1,2,905
k,1,2,906
k,1,2,907
k,1,2,908
k,1,2,909
k,1,2,910
k,1,2,911
k,1,2,912
k,1,2,913
k,1,2,914
k,1,2,915
k,1,2,916
k,1,2,917
k,1,2,918
k,1,2,919
k,1,2,920
k,1,2,921
k,1,2,922
k,1,2,923
k,1,2,924
k,1,2,925
k,1,2,926
k,1,2,927
k,1,2,928
k,1,2,929
k,1,2,930
k,1,2,931
k,1,2,932
k,1,2,933
k,1,2,934
k,1,2,935
k,1,2,936
k,1,2,937
k,1,2,938
k,1,2,939
k,1,2,940
k,1,2,941
k,1,2,942
k,1,2,943
k,1,2,944
k,1,2,945
k,1,2,946
k,1,2,947
k,1,2,948
k,1,2,949
k,1,2,950
k,1,2,951
k,1,2,952
k,1,2,953
k,1,2,954
k,1,2,955
k,1,2,956
k,1,2,957
k,1,2,958
k,1,2,959
k,1,2,960
k,1,2,961
k,1,2,962
k,1,2,963
k,1,2,964
k,1,2,965
k,1,2,966
k,1,2,967
k,1,2,968
k,1,2,969
k,1,2,970
k,1,2,971
k,1,2,972
k,1,2,973
k,1,2,974
k,1,2,975
k,1,2,976
k,1,2,977
k,1,2,978
k,1,2,979
k,1,2,980
k,1,2,981
k,1,2,982
k,1,2,983
k,1,2,984
k,1,2,985
k,1,2,986
k,1,2,987
k,1,2,988
k,1,2,989
k,1,2,990
k,1,2,991
k,1,2,992
k,1,2,993
k,1,2,994
k,1,2,995
k,1,2,996
k,1,2,997
k,1,2,998
k,1,2,999
k,1,2,1000
k,1,2,1001
k,1,2,1002
k,1,2,1003
k,1,2,1004
k,1,2,1005
k,1,2,1006
k,1,2,1007
k,1,2,1008
k,1,2,1009
k,1,2,1010
k,1,2,1011
k,1,2,1012
k,1,2,1013
k,1,2,1014
k,1,2,1015
k,1,2,1016
k,1,2,1017
k,1,2,1018
k,1,2,1019
k,1,2,1
```

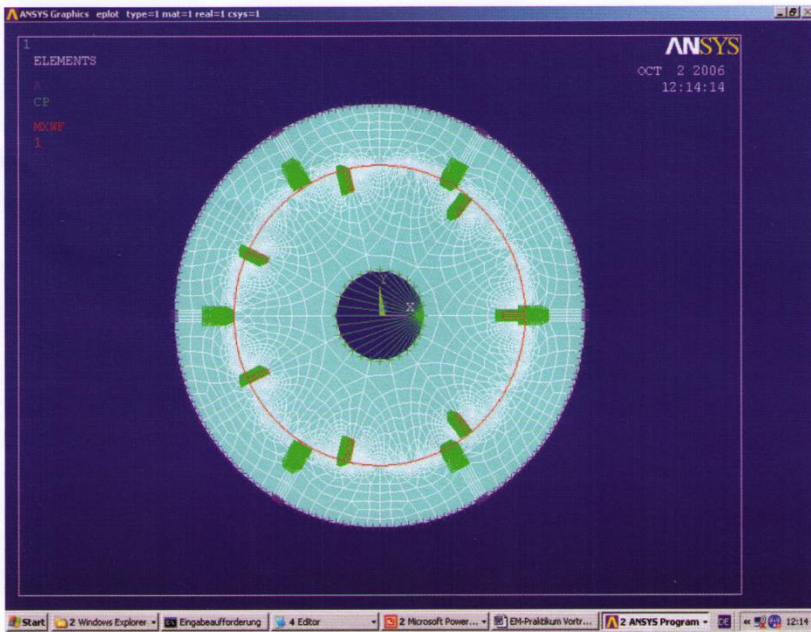


Bild 2. Modellgenerierung einer Asynchronmaschine

gelegt, komplexe Anwendungen, wie rotierende elektrische Maschinen mit mechanischer Rückkopplung, sind hiermit noch keinesfalls lösbar, es fehlen im Besonderen die Pfiffe und Kniffe und viel Know-how.

Vergleichbar sind diese Zeitaufwände mit der vom Autor durchgeführten Lehrveranstaltung „Finite-Elemente-Theorie“ an der FH Dortmund [2], in der nach sehr kurzem Theorieabriss die Anwendung von Ansys im Vordergrund steht. Die Lehrveranstaltung hat einen Umfang von sechs Semesterwochenstunden (SWS) über insgesamt etwa 15 Wochen, d. h. insgesamt 90 h. In dieser Zeit erlernt der Studierende mit entsprechender Nacharbeit an den Ansys-Rechnern im Labor grundlegend die zweidimensionale Modellierung elektromagnetischer Probleme, die Vernetzungsmethoden, die Einführung von Randbedingungen, die Verwendung von linearen und nichtlinearen Materialien, die Anwendung verschiedener Berechnungsmöglichkeiten, d. h. statisch, harmonisch und transient, die Verwendung von Ansys-Elementtyp-CIRCU124 zum Auf-

bau von Schaltungen elektrischer Maschinen und abschließend den grundlegenden Aufbau des Modells einer rotierenden Maschine. Geübt wird dies an einfachen Beispielen, wie Elektromagneten, magnetischen Kreisen mit und ohne Luftspalt, Halbleitergefüllten Nuten mit Stromverdrängung bis zur einfachen elektrischen Maschine mit Nuten oder Polschuhen. Abgeschlossen wird die Lehrveranstaltung mit einer geprüften Hausarbeit, die ein komplexes Thema aus dem Umfeld elektrischer Maschinen zum Inhalt hat. Die Ergebnisse, die mit ca. zehn Studierenden in der erwähnten Zeit erzielbar sind, sind positiv überraschend. Im Zuge der Lehrveranstaltung des Som-

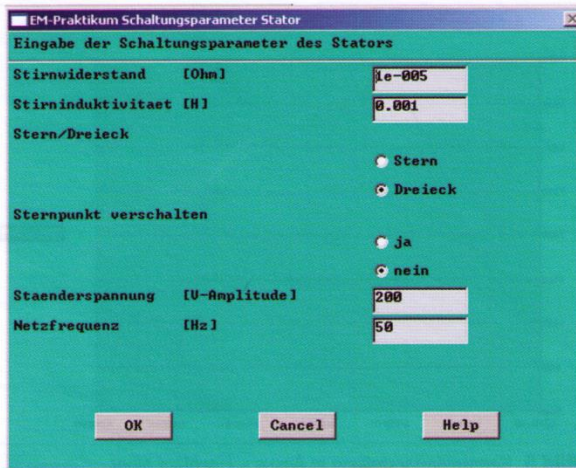


Bild 3. Eingabe der Schaltungsparameter in EM-Praktikum



10. Fachmesse für Gebäude- und Elektrotechnik, Klima und Automation

**24. – 27. Oktober 2007
Leipzig-Messe Gelände**

Ein Ticket – drei Messen!



Zeitgleich auf dem Messegelände.

**Gebäudetechnik:
Zukunft und Chancen!**

Rahmenprogramm

- **ep-Forum**
- Forum:
- „Regenerative Energien“ und
- „Digitaler Rundfunk“ (DVB-T)

Faxanforderung für Ticket-Gutscheine: 03 51/85 06 444

www.efa-messe.de

mersemesters 2006 wurden folgende Themen mit Erfolg bearbeitet:

- Hochlauf einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer mit Trägheits- und Lastmoment,
- Asynchronmaschine mit Wirbelstromläufer,
- Reluktanz-Schrittmotor,
- Manteltransformator mit unterschiedlich angeordneten Primär- und Sekundärwicklungen,
- Vergleich der ein- und allseitigen Stromverdrängung an einigen Beispielen,
- Ankerrückwirkung der Gleichstrommaschine unter Berücksichtigung der Kommutierung,
- Optimierung der Anzugskraft einer axial-symmetrischen Anordnung (Holzspalter),
- schwebende Kugel in zwei unterschiedlichen Anordnungen,
- elektromagnetische (Gauß-)Kanone (Coilgun).

Die Ergebnisse dieser Hausarbeiten sind auf CD-ROM zum Selbstkostenpreis auf der Veranstaltung oder nach Rückfrage beim Autor erhältlich.

Vergleicht man die Erfahrungen mit derart durchgeführten Lehrveranstaltungen mit den eigenen Erfahrungen in Ansys-Trainings, so ist leicht festzustellen, dass der große Unterschied in der Betreuung während und neben den Lehrveranstaltungen liegt, da ohne die laufende Beratung, intensive Fehlersuche und Problembehebung, Diskussion über den Lösungsansatz etc. nur schwerlich ein optimierter Know-how-Aufbau möglich ist.

Bei Ansys-Trainings ist hervorzuheben, dass die Trainer im Allgemeinen über großes Know-how verfügen, dies auch über die eigentlichen Trainingszeiten bis in den Abend preisgeben und auch nach Ende des Trainings über Hotline oder Telefon noch eine gewisse Zeit Auskunft geben. Aber irgendwann steht der Kursteilnehmer eben doch alleine vor seinen Problemen und muss zwangsläufig das Know-how selbst aufbauen.

Um diesen langen Weg des Know-how-Aufbaus zu erleichtern, wurde mit den erlangten Erfahrungen bei der Modellierung und Berechnung elektrischer Maschinen und Systeme das Tool „EM-Praktikum“ geschaffen, das den schrittgesteuerten Aufbau vieler elektrischer Maschinen und Phänomene anhand eines in Ansys integrierten Menüs ermöglicht, darunter

- Stromverdrängung,
- Einphasentransformator mit verschiedenen aufgebauten Wicklungen,
- Dreiphasentransformator,

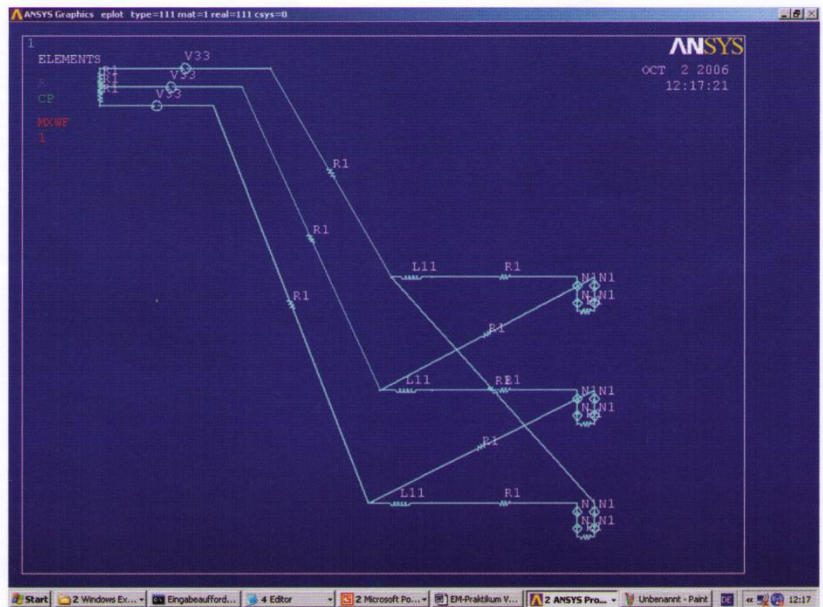


Bild 4. Darstellung der Verschaltung einer Asynchronmaschine – sechs Statornuten mit Zweischichtwicklung

- Gleichstrommaschine mit Permanentmagneten,
 - Gleichstrommaschine mit nutbehaftetem Läufer mit Zusatzwicklungen,
 - Drehfeldmaschine zur Darstellung des Drehfelds,
 - Vollpolsynchronmaschine,
 - Schenkelpolsynchronmaschine,
 - Asynchronkäfigläufermaschine und
 - Asynchronschleifringläufermaschine
- geführt an einem UIDL-Menü (User Interface Design Language) erläutert und nach Abschluss der Modellierung zahlreiche für Maschinen notwendige Berechnungsmöglichkeiten bereithält. Dazu zählen
- einfache Berechnung mit gezielter Auswertung und Ergebnisdarstellung,
 - statische Einzelschrittrechnung bei Stromeinspeisung,
 - statische Mehrschrittrechnung mit variabler Stator-Rotorstellung mit Stromeinspeisung,
 - harmonische Einzel- und Mehrschrittrechnung,
 - transiente Berechnung der Gleichstrommaschine mit Kommutierung unter Berücksichtigung von induzierter Spannung, Kurzschluss, Last bei fester Drehzahl und Hochlauf mit Trägheits- und Lastmoment,
 - transiente Berechnung der Synchronmaschine unter Berücksichtigung von induzierter Spannung, Kurzschluss, Pendelung bei fester Drehzahl, Hochlauf mit Trägheits- und Lastmoment über u/f -Kennlinie,
 - transiente Berechnung der Asynchronmaschine unter Berücksichtigung von Pendelung bei fester Drehzahl, Hochlauf mit Trägheits- und Lastmoment über u/f -Kennlinie.

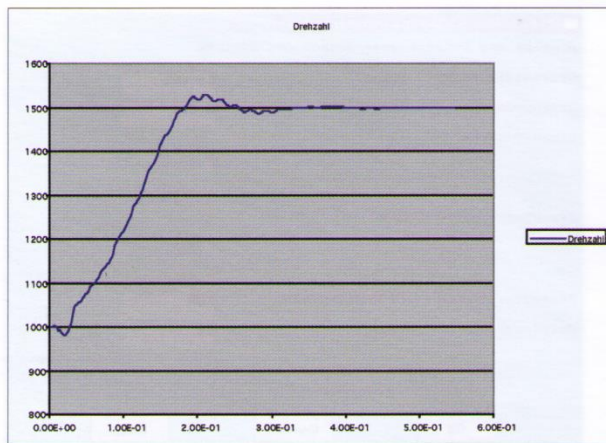


Bild 5. Kennliniendarstellung in Ansys – Hochlauf einer Asynchronmaschine aus fester Drehzahl

lauf mit Trägheits- und Lastmoment über u/f -Kennlinie,

Die Modellierung ist bewusst einfach gehalten, d. h. zur Anwendung stehen einfache



Rechteck- oder Trapeznuten bei den elektrischen Maschinen, damit der offengelegte APDL-Code während der Menüunterstützung nachvollzogen werden kann. Im Rahmen der Modellierung werden folgende Einzelschritte z. B. bei der Gleichstrommaschine abgearbeitet:

1. Einlesen der Parameter,
2. Abfrage und Änderung der Modellparameter: Stator-, Rotordaten, Stator-, Rotornut,
3. Elementdefinition,
4. Materialdefinition,
5. Geometriegenerierung Stator,
6. Geometriegenerierung Rotor,
7. Flächenerzeugung Stator,
8. Flächenerzeugung Rotor,
9. Netzparameterdefinition: Netzgenerierung Stator (halbe Nut), Netzgenerierung Rotor (halbe Nut), Netzgenerierung Maschine,
10. Kopplungen des Stators,
11. Kopplungen des Rotors,
12. Schaltungsparameter Stator,
13. Verschaltung Stator,
14. Schaltungsparameter Rotor,
15. Verschaltung Rotor,
16. Interface Stator/Rotor und Randbedingungen,
17. Lösung.

In Bild 1 sind beispielhaft für die Asynchronmaschine die Element- und Materialdefinition und die Statornutgenerierung angeführt.

In diesen einfachen Anweisungen kann der Anwender des Tools „EM-Praktikum“ einfach jeden einzelnen Schritt der Modellgenerierung nachvollziehen, indem er mit der Standardanwendung von Ansys jeweils das aktuelle Bild der Datenbank mit **SAVE** abspeichert, gezielt wieder mit **RESUME** einliest und durch gezieltes Einsetzen von **/EOF** oder **/inp,term** Kommandos im APDL-Code jeden Schritt nachvollzieht.

Im Allgemeinen wird der Ansys-Anwender und Studierende schnell die Prinzipien der Modellgenerierung erlernen, schwieriger wird die Anwendung der CIRC124-Elemente zum Aufbau maschinenspezifischer Schaltungen. Hier liegt ein wesentlicher Know-how-Transfer durch „EM-Praktikum“. Mit einfachen bekannten Parametern, wie m , p , q , ϵ als Schrittverkürzung etc., werden die Maschinenschaltungen parametrisiert und anschließend erzeugt. So erhält man z. B. bei der Asynchronmaschine nach der Modellgenerierung (Bild 2) durch Eingabe der Stator-Schaltungsparameter in Bild 3 die Verschaltung der Asynchronmaschine (Bild 4).

Da es sich in diesem Fall um eine relativ einfache Maschine mit sechs Statornuten mit Zweischichtwicklung handelt, ist das Ergebnis noch sehr einfach und übersichtlich. Aufgrund der Parametrisierungsmöglichkeit durch Änderung der Nutanzahlen über p und q sind nahezu beliebige Schaltungen möglich. Entsprechend wird der Rotor hinsichtlich der Schaltung generiert. Nach der Verschaltung wird die Modellgenerierung durch die Einfügung der Randbedingungen und der stellungsabhängigen Verbindung von Stator und Rotor abgeschlossen. Auch dieser wesentliche Schritt ist durch den offengelegten APDL-Code einfach nachvollziehbar.

Nach Abschluss der Modellgenerierung kann mit der gezielten Berechnung begonnen werden. Da das Tool „EM-Praktikum“ transparent in Ansys integriert ist, kann die Berechnung direkt über Ansys-Befehle erfolgen. Dies bietet sich jedoch nur für einfache statische und harmonische Berechnungen an.

„EM-Praktikum“ bietet einfache statische und harmonische Berechnungsmöglichkeiten bei Verdrehung des Rotors im Stator an. Darüber hinaus wurde für die Gleichstrommaschine ein Kommutierungsmodell für Schleifenwicklungen integriert, mit dem transient transparent die Funktionalität der Gleichstrommaschine nachvollzogen werden kann. Bei einem speziellen Modell innerhalb von „EM-Praktikum“ können im Besonderen für Lehrveranstaltungen, z. B. Praktika, die Kompensations-, Compound- und Wendepolwicklungen parametrisiert werden, um die Ankerrückwirkung zu kompensieren.

Ähnliche Berechnungsmöglichkeiten sind für Synchronmaschinen vorhanden, bei denen beispielsweise induzierte Spannung und Kurzschlussstrom ermittelt werden können, aber auch Lauf bei synchroner Drehzahl mit Pendelung und auch Hochlauf entsprechend der u/f -Kennlinie. Bei der Asynchronmaschine sind ähnliche Berechnungsmöglichkeiten, wie Hochlauf aus Stillstand oder fester Drehzahl,

möglich. Alle Berechnungsmethoden sind über offengelegte APDL-Skripte nachvollziehbar. Bild 5 zeigt als Beispiel den Hochlauf einer Asynchronmaschine aus fester Drehzahl.

Der Nutzen von EM-Praktikum ist somit für viele Anwender denkbar. Für Lehrveranstaltungen, wie „elektrische Maschinen und Antriebe“, können Lehrende gezielte Berechnungen mit Darstellungen über Videofiles oder statische Grafiken anfertigen, um den Studierenden die Funktionalität elektrischer Maschinen transparent zu erläutern. Im Rahmen von Praktika können die Studierenden das Tool anwenden und so selbst gezielt Änderungen vornehmen, um das Betriebsverhalten elektrischer Maschinen zu optimieren. Für die Lehrveranstaltung „Finite Elemente Theorie“ kann das Tool angewandt werden, um zunächst die Modellierung und Berechnung elektrischer Maschinen zu verstehen und anschließend die offengelegten Methoden in eigenen APDL-Code einfließen zu lassen. Aber auch für Ansys-Anwender aus der Industrie ist das Tool zur Ergänzung von Trainingskursen sinnvoll, da über den offengelegten Code Know-how nachvollzogen und angewendet werden kann. Das Tool „EM-Praktikum“ kann über den Autor bezogen werden, ebenso wie die Erweiterung „EM-Design“, die allgemeinere Maschinenbauformen abdeckt.

Literatur

- [1] Ansys Inc., Canonsburg, Pennsylvania/USA:
www.ansys.com
- [2] FH Dortmund, Dortmund:
www.fh-dortmund.de

www.maschek.de

**26.BImSchV
& EMV**
einfach messen!

**H/E Fieldmeter
ESM-100**
Patentierte, gleichzeitige
Elektro- und Magnetfeldmessung
von 50 Hz - 400 kHz

maschek.
maschek-elektronik info@maschek.de
D-86825 Bad Wörishofen Adolf-Scholz-Allee 4a
Tel. +49 [0]8247-959807 Fax +49 [0]8247-959809