# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung .......................................................... 1
  1.1 Motivation ...................................................... 1
  1.2 Entwurfsmethodik ............................................... 7
    1.2.1 Erfassen und simulieren .................................. 7
    1.2.2 Beschreiben und synthetisieren ......................... 8
    1.2.3 Spezifizieren, explorieren und verfeinern ............. 9
  1.3 Abstraktion und Entwurfsrepräsentationen ............... 10
    1.3.1 Modelle .................................................. 10
    1.3.2 Synthese ................................................ 12
    1.3.3 Optimierung ............................................ 26
  1.4 Übungen ........................................................ 28

2 Modellierung .......................................................... 37
  2.1 Einleitung ...................................................... 37
  2.2 Klassifikation von Modellen .................................. 39
  2.3 Petri-Netzmodell ............................................... 40
    2.3.1 Dynamische Eigenschaften von Petri-Netzen ............ 43
  2.4 Kontrollflussmodelle ......................................... 45
    2.4.1 Endliche Automaten (FSMs) ............................... 45
    2.4.2 Erweiterte Zustandsmaschinenmodelle ................... 47
    2.4.3 Hierarchische, nebeneinläufige Zustandsmaschinen .... 49
    2.4.4 Statecharts .............................................. 49
  2.5 Datenflussmodelle .............................................. 54
    2.5.1 Datenflussgraphen ...................................... 54
    2.5.2 Markierte Graphen ...................................... 55
    2.5.3 Synchronen Datenflussgraphen (SDF) ..................... 56
  2.6 Erweiterte Datenflussmodelle ................................ 60
    2.6.1 Verklemmungen in SDF-Graphen .......................... 60
    2.6.2 Reduktion des SDF-Modells auf markierte Graphen .... 62
    2.6.3 Zyklostatischer Datenfluss .............................. 63
    2.6.4 Dynamische Datenflussmodelle ......................... 64
<table>
<thead>
<tr>
<th>Kapitel</th>
<th>Titel</th>
<th>Seitenzahl</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>2.7</td>
<td>Strukturorientierte Modelle</td>
<td>66</td>
</tr>
<tr>
<td>2.7.1</td>
<td>Komponenten-Verbindungsdiagramm (CCD)</td>
<td>66</td>
</tr>
<tr>
<td>2.8</td>
<td>Heterogene Modelle</td>
<td>66</td>
</tr>
<tr>
<td>2.8.1</td>
<td>Kontroll-Datenflussgraphen (CDFGs)</td>
<td>68</td>
</tr>
<tr>
<td>2.8.2</td>
<td>Modellierung in SystemCoDesigner</td>
<td>74</td>
</tr>
<tr>
<td>2.9</td>
<td>Können Programmiersprachen mehr?</td>
<td>79</td>
</tr>
<tr>
<td>2.10</td>
<td>Literaturhinweise</td>
<td>81</td>
</tr>
<tr>
<td>2.11</td>
<td>Übungen</td>
<td>86</td>
</tr>
<tr>
<td>3</td>
<td>Synthese</td>
<td>93</td>
</tr>
<tr>
<td>3.1</td>
<td>Fundamentale Syntheseprobleme</td>
<td>93</td>
</tr>
<tr>
<td>3.1.1</td>
<td>Ablaufplanung</td>
<td>94</td>
</tr>
<tr>
<td>3.1.2</td>
<td>Allokation</td>
<td>96</td>
</tr>
<tr>
<td>3.1.3</td>
<td>Bindung</td>
<td>97</td>
</tr>
<tr>
<td>3.2</td>
<td>Implementierung</td>
<td>98</td>
</tr>
<tr>
<td>3.3</td>
<td>Problemklassen</td>
<td>99</td>
</tr>
<tr>
<td>3.4</td>
<td>Übungen</td>
<td>101</td>
</tr>
<tr>
<td>4</td>
<td>Ablaufplanung</td>
<td>103</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1</td>
<td>Klassifikation von Ablaufplanungsproblemen</td>
<td>103</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1.1</td>
<td>Statische und dynamische Ablaufplanung</td>
<td>103</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1.2</td>
<td>Prämption</td>
<td>104</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1.3</td>
<td>Datenabhängigkeiten</td>
<td>104</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1.4</td>
<td>Ressourcenbeschränkungen</td>
<td>104</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1.5</td>
<td>Periodische Ablaufplanung</td>
<td>104</td>
</tr>
<tr>
<td>4.2</td>
<td>Klassifikation von Algorithmen</td>
<td>105</td>
</tr>
<tr>
<td>4.3</td>
<td>Ablaufplanung ohne Ressourcenbeschränkungen</td>
<td>106</td>
</tr>
<tr>
<td>4.3.1</td>
<td>Der ASAP-Algorithmus</td>
<td>106</td>
</tr>
<tr>
<td>4.3.2</td>
<td>Der ALAP-Algorithmus</td>
<td>107</td>
</tr>
<tr>
<td>4.3.3</td>
<td>Ablaufplanung mit Zeitbeschränkungen</td>
<td>108</td>
</tr>
<tr>
<td>4.4</td>
<td>Ablaufplanung mit Ressourcenbeschränkungen</td>
<td>112</td>
</tr>
<tr>
<td>4.4.1</td>
<td>Erweiterte ASAP- und ALAP-Verfahren</td>
<td>113</td>
</tr>
<tr>
<td>4.4.2</td>
<td>Listscheduling</td>
<td>113</td>
</tr>
<tr>
<td>4.4.3</td>
<td>Force-directed scheduling</td>
<td>117</td>
</tr>
<tr>
<td>4.4.4</td>
<td>Ganzzahlige lineare Programmierung</td>
<td>121</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5</td>
<td>Periodische Ablaufplanungsprobleme</td>
<td>124</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5.1</td>
<td>Iterative Algorithmen</td>
<td>125</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5.2</td>
<td>Iterative Ablaufplanung ohne Ressourcenbeschränkungen</td>
<td>132</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5.3</td>
<td>Verfahren zur Reduktion von $P_{min}$</td>
<td>138</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5.4</td>
<td>Iterative Ablaufplanung mit Ressourcenbeschränkungen</td>
<td>143</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5.5</td>
<td>ILP-Modell zur Ablaufplanung iterativer Algorithmen</td>
<td>143</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5.6</td>
<td>Beispiel: FIR-Filter</td>
<td>145</td>
</tr>
<tr>
<td>4.6</td>
<td>Ressourcetypbindung</td>
<td>147</td>
</tr>
<tr>
<td>4.7</td>
<td>Dynamische Ablaufplanung</td>
<td>149</td>
</tr>
<tr>
<td>4.7.1</td>
<td>Definitionen</td>
<td>151</td>
</tr>
</tbody>
</table>
5 Bindung ........................................................... 181
5.1 Graphentheoretische Betrachtung von Bindungsproblemen ...... 181
5.2 Bindung nach Ablaufplanung .................................. 185
5.3 Periodische Bindungsprobleme .................................. 188
5.4 Bindung hierarchischer Graphen ................................. 192
5.5 Bindung vor Ablaufplanung ....................................... 192
5.6 Partitionierungsalgorithmen ...................................... 193
5.6.1 Konstruktive Verfahren zur Partitionierung .................. 195
5.6.2 Iterative Verfahren zur Partitionierung ....................... 198
5.6.3 Evolutionäre Algorithmen .................................... 199
5.6.4 Partitionierung mit linearer Programmierung ............... 199
5.6.5 Algorithmen zur HW/SW-Partitionierung .................... 200
5.7 Entwurfssysteme zur Partitionierung ........................... 202
5.7.1 Funktionale Partitionierung im Hardwareentwurf .......... 203
5.7.2 ILP-basierte Ansätze für Multi-Chip-Entwürfe ............ 205
5.7.3 Entwurfssysteme zur Hardware/Software-Partitionierung . 206
5.7.4 ILP-basierte Ansätze zur HW/SW-Partitionierung .......... 208
5.8 Literaturhinweise und Zusammenfassung ....................... 208
5.9 Übungen ...................................................... 210

6 Architektursynthese ............................................. 217
6.1 Was ist Architektursynthese? ................................... 218
6.1.1 Operationswerk ............................................ 219
6.1.2 Steuerwerk ............................................... 221
6.2 Schätzung der Entwurfsqualität ................................ 223
6.2.1 Kostenmaße ............................................... 224
6.2.2 Performanzmaße ......................................... 224
6.2.3 Abschätzung der Taktperiode $T$ ............................ 227
6.2.4 Abschätzung der Latenz $L$ ................................ 229
6.2.5 Abschätzung der Ausführungszeit .......................... 229
6.2.6 Abschätzung der Kosten ................................... 229
6.3 Energie- und Leistungsverbrauchsmanagement .................. 232
6.3.1 Energie- und Leistungsverbrauch ............................ 233
6.3.2 Leistungseffizienz ....................................... 233
6.3.3 Quellen des Leistungsverbrauchs ............................ 236
6.3.4 Strukturelle Maßnahmen zur Leistungsverbrauchsreduktion. 237
6.3.5 Maßnahmen auf Verhaltensebene zur Reduktion des Leistungsverbrauchs ........................................ 240
6.3.6 Schätzung des mittleren Leistungsverbrauchs ........ 243
6.4 Notation und Problemstellung der Architekturensemble ... 246
6.5 Spezialoperationen und Spezialressourcen .................. 250
6.5.1 Verkettung funktionaler Operatoren ....................... 250
6.5.2 Module mit Fließbandverarbeitung ....................... 252
6.5.3 Funktionale Fließbandverarbeitung und Schleifenfaltung . 252
6.6 Verfahren zur Architektursynthese .......................... 255
6.6.1 Erweiterung bekannter Ablaufplanungsverfahren ....... 255
6.6.2 ILP-Modelle zur Architektursynthese ..................... 255
6.7 ILP-Modelle zur Architektursynthese ....................... 257
6.7.1 Zeitschlitzzmodelle .................................... 257
6.7.2 Flussmodell ............................................. 262
6.8 Das Flussmodell ............................................. 266
6.9 Analyse des Flussmodells .................................... 271
6.9.1 Polyedertheorie ......................................... 271
6.9.2 Analyse des Lösungszytophes des Fluss-ILP ............ 273
6.10 Verbesserung der Modellstruktur ............................ 280
6.10.1 Elimination von Flussvariablen .......................... 280
6.10.2 Anpassung der Konstanten \( \delta(v_i, v_j, k) \) ............. 283
6.10.3 Elimination redundanter Ungleichungen ................ 285
6.10.4 Hinzufügen gültiger Ungleichungen ..................... 286
6.11 Fließbandverarbeitung ...................................... 288
6.11.1 Ressourcen mit Fließbandverarbeitung ................. 288
6.11.2 Funktionale Fließbandverarbeitung und Schleifenfaltung . 289
6.11.3 ASAP- und ALAP-Zeiten bei iterativer Ablaufplanung . 292
6.11.4 Ablaufplanung mit vollständiger Bindung ................ 293
6.12 Relaxationsverfahren ....................................... 296
6.13 Beispiele .................................................... 297
6.13.1 Löser einer gewöhnlichen Differenzialgleichung ......... 297
6.13.2 Elliptisches Wellenfilter ................................ 299
6.14 Literaturhinweise und Werkzeuge ............................ 301
6.15 Übungen .................................................... 309

7 Softwareensynthese ........................................... 315
7.1 Merkmale und Klassifikation von Prozessoren ............. 316
7.1.1 Klassifikation von Prozessoren .......................... 317
7.1.2 Kriterienbasierte Prozessorwahl ......................... 319
7.1.3 Architekturparameter von ASIPs ......................... 320
7.2 Einführung Compiler ........................................ 322
7.2.1 Umgebungen ............................................. 323
7.2.2 Sprachkonzepte ......................................... 324
7.2.3 Analyse von Quellprogrammen .......................... 324
7.2.4 Phasen (Analyse, Codegenerierung, Optimierung) ....... 328
7.3 Zwischendarstellungen .................................................. 331
7.3.1 Drei-Adress-Code .................................................. 331
7.3.2 Kontrollflussgraphen und DAGs ................................. 334
7.4 Codegenerierung und Codeoptimierung ............................. 338
7.4.1 Eine einfache Zielsprache ...................................... 340
7.4.2 Allokation, Ablaufplanung und Bindung ...................... 341
7.5 Registervergabe und Registerbindung .............................. 346
7.5.1 Lebenszeitenanalyse .............................................. 346
7.5.2 Registervergabe und -bindung durch Graphfärbung .......... 348
7.5.3 Globale Registervergabe ......................................... 349
7.6 Optimale Registerbindung mit ILP-Techniken ...................... 352
7.6.1 Existierende Ansätze .............................................. 352
7.6.2 Exakte minimale Färbung mit ILP-Modell ..................... 356
7.6.3 $k$-Färbung und Registerabwurf ................................ 358
7.6.4 Optimale $k$-Färbung mit ILP-Modell ......................... 359
7.6.5 Modellierung von Register-Register-Umspeicherungen .... 362
7.6.6 Bestimmung optimaler Registerabwurfzeitpunkte .......... 365
7.6.7 Modellierung heterogener Registerstrukturen ................ 368
7.6.8 Ausblicke ......................................................... 369
7.7 CodeSelektion: Mustererkennung und Baumtransformation .... 370
7.8 Dynamische Programmierung ......................................... 375
7.8.1 Prinzip der dynamischen Programmierung .................. 376
7.8.2 Codegenerierung mit dynamischer Programmierung ........ 377
7.9 Maschinenunabhängige Optimierung ................................. 380
7.9.1 Transformationen auf Grundblöcken .......................... 381
7.9.2 Globale Optimierung ............................................ 383
7.10 Maschinenabhängige Optimierung ................................... 384
7.11 Softwaresynthese für eingebettete Prozessoren ................. 386
7.11.1 Anpassbarkeit von Compilern .................................. 386
7.11.2 Unterschiede der Codegenerierung ............................ 387
7.11.3 Retargetierbare Compiler für RISC/CISC .................. 388
7.11.4 Retargetierbare Compiler für DSPs .......................... 390
7.11.5 Retargetierbare Compiler für VLIW-artige Architekturen . 393
7.11.6 Kommerzielle retargetierbare Compiler .................... 400
7.12 Softwaresynthese auf Modulebene ................................. 401
7.12.1 Betriebssysteme .................................................. 401
7.12.2 Echtzeitbetriebssysteme ....................................... 403
7.12.3 Codegenerierung für datenflussdominante Systeme ....... 404
7.12.4 Externe Ereignisse .............................................. 412
7.12.5 Ressourcenzugriffsprotokolle und Ablaufplanungsanomalien ................ 415
7.13 Literaturhinweise und Zusammenfassung .......................... 418
7.14 Übungen .............................................................. 422
8 Systemsynthese .......................................................... 427
  8.1 Modell der Systemsynthese ........................................ 430
    8.1.1 Spezifikation eines Problems ................................ 431
    8.1.2 Spezifikation von Zielarchitekturen ....................... 431
    8.1.3 Spezifikation von Abbildungen ............................. 433
    8.1.4 Implementierung .............................................. 434
  8.2 Entwurfsraumexploration ......................................... 439
    8.2.1 Optimierungsstrategien und Zielfunktionen ............... 442
    8.2.2 Schätzung der Entwurfsqualität ............................ 445
    8.2.3 Strategien zur Überdeckung und zum Beschneiden des
         Entwurfsraums ............................................... 447
  8.3 Entwurfsraumexploration mit evolutionären Algorithmen .... 450
    8.3.1 Optimierung mit evolutionären Algorithmen ................ 452
    8.3.2 Codierung von Implementierungen ........................... 454
    8.3.3 Fitnessfunktionen und Beschränkungen ..................... 460
    8.3.4 Parameter des evolutionären Algorithmus ................... 463
    8.3.5 Fallstudie .................................................. 463
  8.4 Modellerweiterungen .............................................. 471
    8.4.1 Mehrstufiger Spezifikationsgraph ......................... 471
    8.4.2 Hierarchische Spezifikationsgraphen ☒ .................... 473
  8.5 Verbesserte Überdeckung des Entwurfsraums ☒ .................. 479
    8.5.1 Symbolische Techniken in der Entwurfsraumexploration ... 479
    8.5.2 Pareto-Front-Arithmetik ..................................... 485
  8.6 Entwurfssysteme zur Systemsynthese ............................ 490
  8.7 Zusammenfassung und Literaturhinweise ......................... 493
  8.8 Übungen ............................................................ 498

Anhang ................................................................. 501

Notation ............................................................... 501
  A.1 Logik ............................................................ 501
  A.2 Mengen ............................................................ 502
  A.3 Relationen und Funktionen ....................................... 502
  A.4 Lineare Algebra .................................................. 503
  A.5 Ganzzahlige Algebra ............................................. 503
  A.6 Graphen ........................................................... 503
    A.6.1 Ungerichtete Graphen ......................................... 504
    A.6.2 Gerichtete Graphen .......................................... 506
    A.6.3 Perfekte Graphen ............................................. 507
  A.7 Polyedertheorie .................................................... 508
  A.8 Kombinatorische Optimierungsprobleme ......................... 510
    A.8.1 Entscheidungsprobleme und Optimierungsprobleme ............ 510
    A.8.2 Algorithmen .................................................. 510
    A.8.3 Klassifikation von Problemen ................................ 511
Fundamentale Optimierungsverfahren
   B.1 Lineare und ganzzahlige lineare Programmierung
   B.2 Simulated annealing
   B.3 Evolutionäre Algorithmen
   B.4 Mehrzieloptimierung
   B.4.1 Leistungsbewertung von Optimierungsverfahren
   B.4.2 Evolutionäre Algorithmen für die Mehrzieloptimierung

Graphenalgorithmen
   C.1 Kürzeste- und Längste-Pfad-Probleme
   C.1.1 KPP auf azyklischen Graphen: Topologische Sortierung
   C.1.2 KPP auf zyklischen Graphen
   C.1.3 LPP
   C.1.4 Lösung von LPP (KPP) durch lineare Programmierung
   C.2 Graphfärbung
   C.2.1 Färbung triangulierter Graphen
   C.2.2 Periodische Färbungsprobleme
   C.3 Cliquepartitionierung

Literatur

Sachverzeichnis
Digitale Hardware/Software-Systeme
Synthese und Optimierung
Teich, J.; Haubelt, C.
2007, XV, 594 S., Softcover
ISBN: 978-3-540-46822-6