

Jörg Heuer

Das Multiprocessor Scheduling-Problem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten

Heuristische Lösungsverfahren

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Gerhard Wäscher

Deutscher Universitäts-Verlag

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XXIII
Tafelverzeichnis	XXV
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XXVII
Verzeichnis der heuristischen Lösungsverfahren	XXXIII
§ 1: Einführung	1
1.1 Motivation und Einordnung	1
1.2 Gegenstand und Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	7
Teil I: Grundlagen	
§ 2: Allgemeine Grundlagen	9
2.1 Scheduling	9
2.1.1 Definition	10
2.1.2 Komponenten von Scheduling-Problemen	11
2.1.2.1 Aufgaben	11
2.1.2.2 Ressourcen	13
2.1.2.3 Zielsetzungen	15
2.1.3 Rüstvorgänge und Rüstzeiten	17
2.1.4 Klassifikation	21
2.2 Kombinatorische Optimierungsprobleme und Lösungsverfahren	23
2.2.1 Kombinatorische Optimierungsprobleme	23
2.2.2 Lösungsverfahren	23
2.2.3 Allgemeine Grundlagen zur Komplexitätstheorie	25
2.2.4 Heuristische Lösungsverfahren	27
2.2.4.1 Klassen heuristischer Lösungsverfahren	27
2.2.4.2 Beurteilung heuristischer Lösungsverfahren	28
§ 3: Grundlagen des Multiprocessor Scheduling-Problems mit reihenfolge-	
abhängigen Rüstzeiten	33
3.1 Problemdefinition	33
3.2 Beispiele aus der Praxis	37
3.3 Zielfunktion und Lösungsmengen des $P s_{ij} C_{\max}$ -Problems	40
3.3.1 Bedeutung der Minimierung der Schedule-Länge	40

3.3.2 Lösungsdarstellung	41
3.3.3 Lösungseigenschaften	44
3.4 Mathematische Formulierungen	49
3.4.1 Ansätze mathematischer Formulierungen	49
3.4.2 Optimierungssystem nach GUINET	50
3.4.3 Optimierungssystem nach RADHAKRISHNAN und VENTURA	53
3.4.4 Optimierungssystem nach BALAKRISHNAN, KANET und SRIDHARAN	56
3.4.5 Vergleich der Modellgrößen	58
3.5 Verwandte kombinatorische Optimierungsprobleme	60
3.5.1 Einordnung des $P s_{ij} C_{\max}$ -Problems	60
3.5.2 Das klassische Multiprocessor Scheduling-Problem	60
3.5.3 Das klassische eindimensionale Bin Packing-Problem	62
3.5.4 Das lineare Zuordnungsproblem	63
3.5.5 Das Traveling Salesman-Problem	65
3.5.6 Vehicle Routing-Probleme	67
3.6 Problemkomplexität	70
3.7 Literaturübersicht zum $P s_{ij} C_{\max}$ -Problem	70
§ 4: Lower und Upper Bounds	75
4.1 Bedeutung der Bounds	75
4.2 Lower Bounds für das $P s_{ij} C_{\max}$ -Problem	76
4.2.1 Ansätze zur Ermittlung von Lower Bounds	76
4.2.2 Lower Bounds durch Relaxation des $P s_{ij} C_{\max}$ -Problems	77
4.2.2.1 Lower Bound LB_1	78
4.2.2.2 Lower Bound LB_2	79
4.2.2.3 Lower Bound LB_3	79
4.2.2.4 Lower Bound LB_4	82
4.2.2.5 Lower Bound LB_5	83
4.2.2.6 Lower Bound LB_6	85
4.2.3 Lower Bounds durch Betrachtung ausgewählter Jobzuordnungen	85
4.2.3.1 Lower Bound LB_7	86
4.2.3.2 Lower Bound LB_8	86
4.2.3.3 Lower Bound LB_9	87
4.2.3.4 Lower Bound LB_{10}	88
4.2.3.5 Lower Bound LB_{11}	88
4.2.4 Zusammenhänge zwischen den Lower Bounds (Dominanz)	90
4.3 Upper Bounds für das $P s_{ij} C_{\max}$ -Problem	90
4.3.1 Upper Bound UB_1	91
4.3.2 Upper Bound UB_2	91

4.3.3 Upper Bound UB_3	92
4.3.4 Upper Bound UB_4	93
4.3.5 Upper Bound UB_5	94
Teil II: Lösungsverfahren für das $P s_{ij} C_{\max}$-Problem	
§ 5: Eröffnungsverfahren	95
5.1 Grundlagen zu Eröffnungsverfahren für das $P s_{ij} C_{\max}$ -Problem	96
5.1.1 Bedeutung der Eröffnungsverfahren	96
5.1.2 Übersicht der untersuchten Eröffnungsverfahren	96
5.1.2.1 Klassifikation der Eröffnungsverfahren	96
5.1.2.2 In der Literatur beschriebene Eröffnungsverfahren	100
5.1.3 Prioritätsregeln	101
5.1.3.1 Statische Prioritätsregeln	101
5.1.3.2 Dynamische Prioritätsregeln	104
5.1.3.3 Verknüpfung von Prioritätsregeln	107
5.2 Simultane Eröffnungsverfahren	108
5.2.1 Simultane Prioritätsregelverfahren	108
5.2.1.1 Ablauf simultaner Prioritätsregelverfahren	108
5.2.1.2 Worst Case-Analysen zu simultanen Prioritätsregelverfahren	113
5.2.1.3 Untersuchte simultane Prioritätsregelverfahren und ihre Komplexität	115
5.2.2 Auf der Lösung von Bin Packing-Problemen basierende Eröffnungs- verfahren	117
5.2.2.1 Ablauf der Bin Packing-basierten Eröffnungsverfahren	117
5.2.2.2 Untersuchte Bin Packing-basierte Eröffnungsverfahren und ihre Komplexität	123
5.2.3 Composite-Verfahren	125
5.2.3.1 Ablauf der Composite-Verfahren	125
5.2.3.2 Untersuchte Composite-Verfahren und ihre Komplexität	126
5.2.4 Primal-duales Verfahren von GUINET	127
5.3 Sequence First Allocate Second-Eröffnungsverfahren	132
5.3.1 Split-Regeln	132
5.3.2 SFAS-Prioritätsregelverfahren	134
5.3.2.1 Ablauf der SFAS-Prioritätsregelverfahren	134
5.3.2.2 Untersuchte SFAS-Prioritätsregelverfahren und ihre Komplexität	136
5.3.3 Savings-Verfahren	137
5.4 Willkürliche Lösungsverfahren	139

§ 6: Verbesserungsverfahren	141
6.1 Grundlagen zu Verbesserungsverfahren.....	141
6.1.1 Local Search-Verfahren und Meta-Heuristiken.....	141
6.1.2 Existierende Verbesserungsverfahren.....	145
6.2 Klassische Local Search-Verfahren.....	146
6.2.1 Ablauf klassischer Local Search-Verfahren.....	146
6.2.2 Shift-Verfahren.....	148
6.2.3 Exchange-Verfahren.....	150
6.2.3.1 Grundlagen zu Exchange-Verfahren.....	150
6.2.3.2 2-Job Exchange-Verfahren.....	151
6.2.3.3 3-Job Exchange-Verfahren.....	152
6.2.4 Combined-Verfahren.....	153
6.3 Moderne Local Search-Verfahren.....	154
6.3.1 Tabu Search.....	154
6.3.1.1 Grundsätzliches Vorgehen des (einfachen) Tabu Search-Ansatzes ...	154
6.3.1.2 Tabu Search-Verfahren von FRANÇA et al.	156
6.3.2 Simulated Annealing.....	162
6.3.2.1 Grundsätzliches Vorgehen von Simulated Annealing-Verfahren	162
6.3.2.2 Einfache Simulated Annealing-Ansätze	164
6.3.2.3 Kombinierte Simulated Annealing-Ansätze	170
6.3.3 Threshold Accepting.....	172
6.3.3.1 Allgemeiner Ablauf von Threshold Accepting-Verfahren	172
6.3.3.2 Threshold Accepting-Ansätze	173
6.3.4 Weitere Meta-Heuristiken.....	174

Teil III: Numerische Experimente zur Beurteilung von Lower Bounds und Heuristiken

§ 7: Numerische Experimente – Begründung, Aufbau und Beurteilungskriterien	177
7.1 Rahmenbedingungen der numerischen Experimente.....	178
7.1.1 Ermittlung optimaler Lösungen.....	178
7.1.2 Allgemeine Anforderungen an numerische Experimente und deren Darstellung.....	179
7.1.3 Numerische Untersuchungen zum $P s_{ij} C_{\max}$ -Problem in der Literatur.....	180
7.1.4 Anforderungen an die numerischen Experimente für das $P s_{ij} C_{\max}$ -Problem.....	183
7.2 Testinstanzen für die numerischen Experimente.....	184
7.2.1 Generierung von Zufallszahlen.....	185
7.2.2 Problemgenerator PSCMGEN.....	186

7.2.3 Testfelder der numerischen Experimente.....	191
7.2.3.1 Übersicht über die Testfelder.....	191
7.2.3.2 Testfeld 1.....	192
7.2.3.3 Testfeld 2.....	193
7.3 Lösungsprogramm PSCMSOLVER und Testumgebung.....	194
7.4 Beurteilungskriterien.....	197
7.4.1 Übersicht über Beurteilungskriterien.....	197
7.4.2 Lösungsqualität.....	198
7.4.3 Rechenzeit.....	199
7.4.4 Robustheit.....	199
§ 8: Vergleich der Lower Bounds.....	201
§ 9: Vergleich der Eröffnungsverfahren.....	213
9.1 Auswertungsphasen zur Beurteilung der Eröffnungsverfahren.....	213
9.2 Auswertungsphase 1: Analyse des Einflusses der Rüst- und Bearbeitungszeitverteilungen.....	214
9.3 Auswertungsphase 2: Vergleich der Verfahrensvarianten.....	225
9.3.1 Simultane Prioritätsregelverfahren.....	225
9.3.1.1 Statische simultane Prioritätsregelverfahren.....	226
9.3.1.1.1 Einfluß der Prioritätsregeln.....	226
9.3.1.1.2 Einfluß der Zuordnungsstrategien.....	239
9.3.1.2 Dynamische simultane Prioritätsregelverfahren.....	242
9.3.1.3 Abschließender Vergleich simultaner Prioritätsregelverfahren.....	255
9.3.2 Auf der Lösung von Bin Packing-Problemen basierende Eröffnungsverfahren.....	258
9.3.2.1 Einfluß der Zuordnungsstrategien.....	258
9.3.2.2 Einfluß der Prioritätsregeln.....	269
9.3.3 Composite-Verfahren.....	273
9.3.4 SFAS-Prioritätsregelverfahren.....	277
9.3.4.1 Einfluß der Prioritätsregeln und der Zuordnungsstrategien.....	278
9.3.4.2 Einfluß der Split-Regeln.....	285
9.3.4.3 Abschließende Bemerkungen zu den Lösungseigenschaften der SFAS-Prioritätsregelverfahren.....	285
9.3.5 Savings-Verfahren.....	288
9.4 Auswertungsphase 3: Vergleich der Verfahrensklassen.....	291
9.4.1 Beurteilung anhand des ersten Testfelds.....	291
9.4.2 Beurteilung anhand des zweiten Testfelds.....	296
9.5 Zusammenfassung: Vergleich der Eröffnungsverfahren.....	305

B Probleminstanzen für Abschnitt 7.1	420
B.1 Probleminstanzen mit symmetrischen Rüstzeiten	420
B.2 Probleminstanzen mit asymmetrischen Rüstzeiten	421
C Daten – Eröffnungsverfahren	423
D Daten – Verbesserungsverfahren	423