

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Einführung .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Grundlegende Begriffe.....                                      | 1         |
| 1.1.1 Echtzeitbetrieb.....  | 1         |
| 1.1.2 Echtzeitanforderungen .....                                   | 2         |
| 1.1.3 Nebenläufige Rechenprozesse.....                              | 5         |
| 1.2 „Echtzeitdenke“: Kategorien und Optimalität .....               | 7         |
| <b>2 Entwurf und Analyse verteilter Echtzeitsysteme .....</b>       | <b>9</b>  |
| 2.1 Einleitung .....  | 9         |
| 2.2 Spezifikations-SPEARL .....                                     | 10        |
| 2.2.1 Modellierung von Software/Hardware-Architekturen ..           | 12        |
| 2.2.2 Task-Modellierung .....                                       | 12        |
| 2.2.3 Konfigurationsverwalter und Betriebssystem .....              | 20        |
| 2.3 Simulative Verifikation von S-SPEARL-Systemmodellen .....       | 23        |
| 2.3.1 Systemmodell .....  | 24        |
| 2.3.2 Verifikation zeitgerechter Verarbeitbarkeit .....             | 26        |
| 2.4 UML-Profil für S-SPEARL .....                                   | 28        |
| 2.4.1 Abbildung von S-SPEARL auf ein UML-Profil .....               | 30        |
| 2.4.2 UML-Applikationsarchitektur mit S-SPEARL-<br>Stereotypen..... | 45        |
| 2.5 Beispiel: Modellierung eines verteilten Automobilbordsystems .. | 45        |
| <b>3 Synchronisation und Konsistenz in Echtzeitsystemen .....</b>   | <b>49</b> |
| 3.1 Einführung .....  | 49        |
| 3.1.1 Kritischer Bereich .....                                      | 49        |
| 3.1.2 Problem des gegenseitigen Ausschlusses .....                  | 50        |
| 3.1.3 Kooperationsproblem .....                                     | 50        |
| 3.1.4 Erste Lösungsideen .....                                      | 50        |
| 3.2 Semaphore .....   | 51        |
| 3.2.1 Idee .....  | 51        |
| 3.2.2 Umsetzung .....   | 51        |

## XIV Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2.3    | Beispiele . . . . .  | 54        |
| 3.2.4    | Verklemmungen . . . . .  | 56        |
| 3.3      | Monitore . . . . .   | 57        |
| 3.3.1    | Idee . . . . .   | 57        |
| 3.3.2    | Umsetzung . . . . .  | 58        |
| 3.3.3    | Beispiele . . . . .  | 59        |
| 3.3.4    | Mögliche Problemsituationen . . . . .                                  | 62        |
| 3.4      | Bedingungsgesteuerte Synchronisation . . . . .                         | 63        |
| <b>4</b> | <b>Echtzeitbetriebssysteme . . . . .</b>                               | <b>67</b> |
| 4.1      | Einführung . . . . .   | 67        |
| 4.2      | Echtzeittypische Merkmale von Echtzeitbetriebssystemen . . . . .       | 68        |
| 4.2.1    | Prozessorverwaltung . . . . .  | 68        |
| 4.2.2    | Speicherverwaltung . . . . .   | 69        |
| 4.2.3    | Geräteverwaltung . . . . .   | 70        |
| 4.2.4    | Schichtenaufbau . . . . .  | 70        |
| 4.2.5    | Beispiel: Das Betriebssystem RTOS-UH . . . . .                         | 70        |
| 4.3      | Prozesse . . . . .   | 71        |
| 4.3.1    | Umsetzung des Mehrprozessbetriebs . . . . .                            | 74        |
| 4.3.2    | Problemsituationen . . . . .   | 78        |
| 4.4      | Unterbrechungsbehandlung . . . . .                                     | 79        |
| 4.4.1    | Beispiele und Problemsituationen . . . . .                             | 83        |
| 4.5      | Prozessorzuteilung . . . . .   | 84        |
| 4.5.1    | Umsetzung . . . . .  | 84        |
| 4.5.2    | Beispiele und Problemsituationen . . . . .                             | 90        |
| <b>5</b> | <b>Echtzeitkommunikation . . . . .</b>                                 | <b>97</b> |
| 5.1      | Echtzeitanforderungen an Kommunikationssysteme . . . . .               | 97        |
| 5.1.1    | Charakteristik von Echtzeitanwendungen . . . . .                       | 97        |
| 5.1.2    | Echtzeitanforderungen an die Übertragung von Multimediataten . . . . . | 98        |
| 5.1.3    | Echtzeitanforderungen in der industriellen Kommunikation . . . . .     | 98        |
| 5.2      | Architektur von Echtzeitkommunikationssystemen . . . . .               | 101       |
| 5.3      | Transaktionsmodelle . . . . .  | 103       |
| 5.3.1    | Client/Server-Modell . . . . .   | 103       |
| 5.3.2    | Erzeuger/Verbraucher-Modell . . . . .                                  | 104       |
| 5.4      | Sicherungsschicht . . . . .  | 105       |
| 5.4.1    | Medienzugriffssteuerung . . . . .                                      | 106       |
| 5.4.2    | Fehlersicherung . . . . .  | 111       |
| 5.5      | Uhrensynchronisation . . . . .   | 118       |
| 5.5.1    | Grundlagen . . . . .   | 118       |
| 5.5.2    | Verfahren zur Uhrensynchronisation . . . . .                           | 122       |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>6</b> | <b>Programmierung</b>                                  | 129 |
| 6.1      | PEARL  | 129 |
| 6.1.1    | Kurzeinführung   | 129 |
| 6.1.2    | Beispiele typischer Konstrukte                         | 130 |
| 6.1.3    | Der BOLT-Typ   | 131 |
| 6.1.4    | Einplanungen   | 132 |
| 6.1.5    | Zugriff auf Prozessperipherie                          | 137 |
| 6.2      | Ada  | 137 |
| 6.2.1    | Kurzeinführung   | 137 |
| 6.2.2    | Beispiel Erzeuger-Verbraucher-Problem                  | 138 |
| 6.2.3    | Module und Generizität                                 | 140 |
| 6.2.4    | Typen und Anweisungen                                  | 142 |
| 6.2.5    | Tasks und Zeiteinplanungen                             | 144 |
| 6.2.6    | Ravenscar-Profil für hoch zuverlässige Echtzeitsysteme | 147 |
| 6.2.7    | Zugriff auf Prozessperipherie                          | 150 |
| 6.3      | Real-Time Specification for Java (RTSJ)                | 155 |
| 6.3.1    | Warum Java?  | 155 |
| 6.3.2    | Kurzeinführung   | 156 |
| 6.3.3    | Schwächen von Java SE bzgl. Echtzeitbetrieb            | 156 |
| 6.3.4    | API-Erweiterungen durch RTSJ                           | 157 |
| 6.3.5    | Eigenschaften der RTSJ                                 | 157 |
| 6.3.6    | Implementierungen der RTSJ                             | 160 |
| 6.3.7    | Beispiele  | 161 |
| 6.3.8    | Synchronisation  | 167 |
| 6.3.9    | Probleme   | 170 |
| <b>7</b> | <b>Qualitätssicherung von Echtzeitsystemen</b>         | 171 |
| 7.1      | Qualitätsgerichteter Software-Entwurf                  | 171 |
| 7.1.1    | Fehlervermeidung                                       | 172 |
| 7.1.2    | Fehlertoleranz   | 174 |
| 7.2      | Qualitätssicherung von Software                        | 177 |
| 7.2.1    | Maßnahmen zur Software-Qualitätssicherung              | 177 |
| 7.2.2    | Planung der Software-Qualitätssicherung                | 178 |
| 7.2.3    | Struktur von Entwicklungsprojekten                     | 181 |
| 7.2.4    | Software-Anforderungsspezifikation                     | 182 |
| 7.3      | Prinzipien von Programmentwurf und -codierung          | 182 |
| 7.4      | Software-Diversität                                    | 184 |
| 7.4.1    | Vollständige Diversität                                | 185 |
| 7.4.2    | Gezielte Diversität                                    | 186 |
| 7.4.3    | Übersetzerdiversität                                   | 187 |
| 7.4.4    | Diversitäre Implementierung                            | 190 |
| 7.4.5    | Diversitäre Spezifikation                              | 190 |
| 7.4.6    | Funktionelle Diversität                                | 191 |
| 7.4.7    | Zur Anwendung der Diversitätsarten                     | 192 |
| 7.4.8    | Mehrkanalige Software-Realisierung                     | 192 |

## XVI Inhaltsverzeichnis

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.5   | Richtlinien zur Software-Erstellung für eingebettete Systeme .....          | 192 |
| 7.5.1 | Details von Anforderungsspezifikationen .....                               | 193 |
| 7.5.2 | Entwurfsprozeduren .....  | 196 |
| 7.5.3 | Software-Struktur .....   | 198 |
| 7.5.4 | Selbstüberwachung .....   | 199 |
| 7.5.5 | Entwurf und Codierung im Detail .....                                       | 200 |
| 7.5.6 | Sprachabhängige Empfehlungen .....  | 202 |
| 7.5.7 | Sprachen und Übersetzer .....   | 203 |
| 7.5.8 | Systematische Testmethoden .....  | 204 |
| 7.5.9 | Hardware-Erwägungen .....   | 205 |
| 7.6   | Qualitätssicherung von Dokumentationen .....                                | 206 |
| 7.7   | Qualitätssicherung von Programmen .....                                     | 207 |
| 7.7.1 | Verifikationsplan .....   | 209 |
| 7.7.2 | Verifikationstechniken .....  | 210 |
| 7.7.3 | Anforderungsverifikation .....  | 212 |
| 7.7.4 | Entwurfsverifikation .....  | 212 |
| 7.7.5 | Modul- und Codeverifikation .....   | 213 |
| 7.7.6 | Integrationsverifikation von Hard- und Software .....                       | 213 |
| 7.7.7 | Rechensystemvalidierung .....   | 214 |
| 7.8   | Verfahren zur Software-Prüfung .....  | 215 |
| 7.8.1 | Inspektionsverfahren .....  | 215 |
| 7.8.2 | Begutachtungen .....  | 218 |
| 7.8.3 | Revisionen .....  | 220 |
| 7.8.4 | Strukturiertes Nachvollziehen .....   | 220 |
| 7.8.5 | Entwurfs- und Codeinspektionen .....  | 221 |
| 7.8.6 | Programmtests .....   | 222 |
| 7.8.7 | Diversitäre Rückwärtsanalyse .....  | 227 |
| 7.9   | Validierung von Echtzeitsystemen .....                                      | 231 |
| 7.9.1 | Ereignissimulation .....  | 231 |
| 7.9.2 | Externe Umgebungssimulation und Ausgabeverifikation                         | 232 |
| 8     | <b>Leistungsbewertung und Dienstqualität von<br/>Echtzeitsystemen .....</b> | 239 |
| 8.1   | Leistung von Echtzeitsystemen .....   | 239 |
| 8.2   | Leistungsbewertung von Echtzeitsystemen .....                               | 241 |
| 8.2.1 | Beispiele für Benchmark-Programme .....                                     | 242 |
| 8.2.2 | Laufzeitanalysatoren .....  | 243 |
| 8.2.3 | Leistungsmonitore .....   | 245 |
| 8.3   | Kriterien der Dienstqualität von Echtzeitsystemen .....                     | 245 |
| 8.3.1 | Vorhersehbarkeit und Verlässlichkeit .....                                  | 245 |
| 8.3.2 | Qualitativ-exklusive Kriterien .....  | 246 |
| 8.3.3 | Qualitativ-graduelle Kriterien .....  | 248 |
| 8.3.4 | Quantitative Kriterien .....  | 251 |
| 8.4   | Schlussbemerkung .....  | 253 |