

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>1. Einleitung</b> .....               | 1  |
| 1.1 Sequentielle Rechnungen .....        | 1  |
| 1.2 Parallele Rechnungen .....           | 12 |
| 1.3 Nebenläufige Rechnungen .....        | 19 |
| <b>2. Mathematische Grundlagen</b> ..... | 27 |
| 2.1 Mengen und Relationen .....          | 27 |
| 2.2 Graphen und Bäume .....              | 29 |
| 2.3 Ringe und Körper .....               | 33 |
| 2.4 Erweiterte natürliche Zahlen .....   | 36 |
| 2.5 Sprachen und Sprachoperationen ..... | 38 |
| 2.6 Maschinen und Komplexität .....      | 41 |

---

## Teil I. Interleaving Verhalten von Petri-Netzen

---

|  |    |
|--|----|
| <b>3. Grundlegende Eigenschaften</b> .....                                     | 49 |
| 3.1 Petri-Netze .....  | 49 |
| 3.2 Der Feuerbegriff .....   | 51 |
| 3.2.1 Transitionssysteme .....   | 52 |
| 3.2.2 Hürde und Zustandswechsel .....  | 55 |
| 3.2.3 Alternative Petri-Netz-Modelle .....                                     | 58 |
| 3.2.4 Erreichbare Markierungen .....   | 63 |
| 3.2.5 Erreichbarkeits- und Überdeckungsgraphen .....                           | 64 |
| 3.2.6 Reverse Petri-Netze .....  | 77 |
| 3.3 Invarianten, Lebendigkeit, Sicherheit .....                                | 79 |
| 3.3.1 Invarianten .....  | 79 |
| 3.3.2 Beschränkte Petri-Netze und Sicherheit .....                             | 82 |
| 3.3.3 Lebendigkeit .....   | 85 |
| 3.3.4 Einige notwendige Kriterien zur Erreichbarkeit von<br>Markierungen ..... | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>4. Die Entscheidbarkeit der Erreichbarkeit</b> .....        | 93  |
| 4.1 Zum Erreichbarkeitsproblem EP .....                        | 93  |
| 4.2 Lineare Gleichungssysteme über $\mathbb{Z}$ .....          | 94  |
| 4.3 Gesteuerte Überdeckungsgraphen und Keime .....             | 96  |
| 4.4 Die Charakteristische Gleichung .....                      | 105 |
| 4.5 Perfekte Keim-Transition-Folgen .....                      | 108 |
| 4.6 Dekomposition in perfekte Keim-Transition-Folgen .....     | 112 |
| <b>5. Berechenbarkeit, Erreichbarkeit, Erzeugbarkeit</b> ..... | 119 |
| 5.1 Varianten des Erreichbarkeitsproblems .....                | 119 |
| 5.1.1 Komplexität von Petri-Netzen .....                       | 119 |
| 5.1.2 Varianten des Erreichbarkeitsproblems (EP) .....         | 120 |
| 5.1.3 Varianten des Lebendigkeitsproblems (LP) .....           | 123 |
| 5.1.4 Der Zusammenhang EP – LP .....                           | 126 |
| 5.2 Schwache PN-Berechenbarkeit .....                          | 131 |
| 5.2.1 Addition und Multiplikation .....                        | 134 |
| 5.2.2 Die Ackermann-Funktion .....                             | 137 |
| 5.2.3 Komplexität von Überdeckungsgraphen .....                | 142 |
| 5.2.4 Schwache Graphen .....                                   | 143 |
| 5.3 Das Petri-Netz-Gleichheitsproblem .....                    | 144 |
| 5.4 Starke PN-Berechenbarkeit .....                            | 155 |
| 5.4.1 Inhibitorische PN und PN mit Prioritäten .....           | 165 |
| 5.4.2 Beschränkte Simulation von Registermaschinen .....       | 168 |
| <b>6. Petri-Netz-Sprachen</b> .....                            | 189 |
| 6.1 Grundlagen .....   | 189 |
| 6.1.1 Gleichheit von Petri-Netz-Sprachen .....                 | 191 |
| 6.1.2 Normalformen für Petri-Netze .....                       | 196 |
| 6.2 Abschlußeigenschaften .....                                | 203 |
| 6.2.1 Shuffel, Vereinigung, Konkatenation .....                | 206 |
| 6.2.2 Durchschnitt und Synchronisation .....                   | 210 |
| 6.2.3 Homomorphismen .....                                     | 215 |
| 6.2.4 Inverse Homomorphismen .....                             | 217 |
| 6.3 Algebraische Sprachcharakterisierung .....                 | 220 |
| 6.3.1 Restriktion .....  | 220 |
| 6.3.2 Sprachen elementarer Netze .....                         | 224 |
| 6.3.3 Freie Petri-Netz-Sprachen .....                          | 230 |
| 6.4 Gegenbeispiele zu Petri-Netz-Sprachen .....                | 238 |

---

**Teil II. True-Concurrency Verhalten von Petri-Netzen**


---

|  |     |
|--|-----|
| <b>7. Pomset- und Stepsprachen</b> .....                               | 243 |
| 7.1 Pomsets und Steps .....  | 243 |
| 7.1.1 Stepsprachen .....   | 246 |
| 7.1.2 Pomsetsprachen .....   | 252 |
| 7.1.3 Prozesse und Pomsetsprachen von Petri-Netzen .....               | 256 |
| 7.2 Abschlußeigenschaften .....  | 268 |
| 7.2.1 Normalform .....   | 269 |
| 7.2.2 Verallgemeinerbare Operationen .....                             | 272 |
| 7.2.3 Vereinigung und Konkatenation .....                              | 273 |
| 7.2.4 Synchronisation und abgeleitete Operationen .....                | 274 |
| 7.2.5 Homomorphismen .....   | 287 |
| <b>8. Algebraische Charakterisierungen</b> .....                       | 291 |
| 8.1 Kompositionale Semantiken und Algebren .....                       | 291 |
| 8.1.1 Grundlagen kompositionaler Semantiken .....                      | 291 |
| 8.1.2 Ein Basiskalkül für Petri-Netze .....                            | 295 |
| 8.1.3 Petri-Netze mit Interface .....                                  | 302 |
| 8.1.4 Spezielle Kalküle für Petri-Netze .....                          | 305 |
| 8.1.5 Ein universeller Kontext .....                                   | 309 |
| 8.2 Konkrete Semantiken .....  | 311 |
| 8.2.1 Zwei kompositionale Pomsetsemantiken .....                       | 311 |
| 8.2.2 Abgeleitete kompositionale Semantiken .....                      | 323 |
| 8.3 Algebraische Charakterisierungen .....                             | 331 |
| 8.3.1 Terminale Sprachen .....   | 331 |
| 8.3.2 Nicht-terminale Sprachen .....                                   | 336 |
| <b>A. Lineare Gleichungssysteme über <math>\mathbb{Z}</math></b> ..... | 341 |
| <b>B. Bibliographische Hinweise</b> .....                              | 357 |
| <b>Literaturverzeichnis</b> .....                                      | 361 |
| <b>Sachverzeichnis</b> .....   | 367 |