

# Inhaltsverzeichnis

---

|          |                                                    |          |
|----------|----------------------------------------------------|----------|
| <b>I</b> | <b>Einführung und Grundlagen</b>                   | <b>1</b> |
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                  | <b>3</b> |
| 1.1      | Motivation . . . . .                               | 3        |
| 1.2      | Projekt MEMPHIS . . . . .                          | 5        |
| 1.3      | Beiträge der Arbeit . . . . .                      | 6        |
| 1.4      | Gliederung der Arbeit . . . . .                    | 6        |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen und Verwandte Arbeiten</b>           | <b>9</b> |
| 2.1      | Definitionen . . . . .                             | 10       |
| 2.2      | Mooresches Gesetz . . . . .                        | 11       |
| 2.3      | Amdahlsches Gesetz . . . . .                       | 12       |
| 2.4      | Parallelitätsebenen . . . . .                      | 14       |
| 2.5      | Klassifizierung von Rechnerarchitekturen . . . . . | 17       |
| 2.6      | Verwandte Arbeiten . . . . .                       | 19       |
| 2.6.1    | Paketverarbeitung auf Standard-Hardware . . . . .  | 19       |
| 2.6.2    | Modellierung von Rechnersystemen . . . . .         | 22       |

|           |                                                           |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>II</b> | <b>Datenverarbeitung in Rechnersystemen</b>               | <b>29</b> |
| <b>3</b>  | <b>Hardware zur Datenverarbeitung</b>                     | <b>31</b> |
| 3.1       | Mikroprozessor-Architektur . . . . .                      | 32        |
| 3.1.1     | Hauptspeicher und Cache . . . . .                         | 36        |
| 3.1.2     | Bus-Systeme . . . . .                                     | 41        |
| 3.2       | Netzwerkkarte . . . . .                                   | 42        |
| 3.2.1     | Receive-Side Scaling und Multi-Queueing . . . . .         | 42        |
| 3.2.2     | Netzwerkkarten-basierte Paketklassifizierung . . . . .    | 44        |
| 3.2.3     | Interrupts . . . . .                                      | 45        |
| 3.3       | Sonstige Hardware-Architekturen . . . . .                 | 46        |
| <b>4</b>  | <b>Software zur Paketverarbeitung</b>                     | <b>49</b> |
| 4.1       | Überblick zur Paketverarbeitung . . . . .                 | 50        |
| 4.2       | Betriebssysteme zur Paketverarbeitung . . . . .           | 52        |
| 4.2.1     | Netzwerk-Betriebssysteme . . . . .                        | 55        |
| 4.2.2     | Echtzeit-Betriebssysteme . . . . .                        | 56        |
| 4.3       | Paketverarbeitung im Linux-Betriebssystem . . . . .       | 57        |
| 4.3.1     | Interrupt-basierte Paketverarbeitung . . . . .            | 57        |
| 4.3.2     | NAPI-basierte Paketverarbeitung . . . . .                 | 58        |
| 4.3.3     | Treiber-basierte Paketverarbeitung . . . . .              | 63        |
| 4.4       | Softwareoptimierungen für die Paketverarbeitung . . . . . | 65        |
| 4.4.1     | Parallelisierung der Paketverarbeitung . . . . .          | 65        |
| 4.4.2     | Batching . . . . .                                        | 68        |
| 4.4.3     | Präallokation und Recycling . . . . .                     | 69        |
| 4.4.4     | Affinität . . . . .                                       | 70        |
| 4.4.5     | Prefetching . . . . .                                     | 70        |
| 4.4.6     | Memory Mapping und Zero-Copy . . . . .                    | 71        |
| 4.5       | Networking Frameworks zur Paketverarbeitung . . . . .     | 72        |
| 4.5.1     | Click Modular Router . . . . .                            | 73        |
| 4.5.2     | DPDK . . . . .                                            | 75        |
| 4.5.3     | Netmap . . . . .                                          | 76        |
| 4.5.4     | PF_RING DNA . . . . .                                     | 77        |

|          |                                                                     |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Konzeption eines Modellierungsansatzes für Rechnersysteme</b>    | <b>81</b>  |
| 5.1      | Motivation zur Modellierung von Rechnersystemen                     |            |
|          | in Kommunikationsnetzen . . . . .                                   | 82         |
| 5.2      | Modellierungsanforderungen . . . . .                                | 86         |
| 5.2.1    | Funktionale Anforderungen . . . . .                                 | 86         |
| 5.2.2    | Nichtfunktionale Anforderungen . . . . .                            | 88         |
| 5.3      | Überblick zum Modellierungsansatz . . . . .                         | 89         |
| 5.4      | Task Unit . . . . .                                                 | 91         |
| 5.4.1    | Verhalten der Task Unit . . . . .                                   | 93         |
| 5.4.2    | Strategien der Task Unit . . . . .                                  | 96         |
| 5.4.3    | Task Unit Typen . . . . .                                           | 97         |
| 5.4.4    | Task Unit Graphen . . . . .                                         | 101        |
| 5.5      | Resource Manager . . . . .                                          | 103        |
| 5.5.1    | Verhalten des Resource Managers . . . . .                           | 104        |
| 5.5.2    | Scheduling-Strategien des Resource Managers . . . . .               | 106        |
| 5.5.3    | Resource Pool und Ressourcen . . . . .                              | 108        |
| 5.6      | Interaktionen Resource Manager und Task Unit . . . . .              | 109        |
| 5.7      | Fallbeispiel: Paketverarbeitung . . . . .                           | 113        |
| 5.8      | Zusammenfassung . . . . .                                           | 115        |
| <b>6</b> | <b>Implementierung des Modellierungsansatzes für Rechnersysteme</b> | <b>117</b> |
| 6.1      | Integration des Resource Managements . . . . .                      | 118        |
| 6.2      | Implementierungskonzept . . . . .                                   | 120        |
| 6.3      | Implementierung der Task Unit . . . . .                             | 121        |
| 6.4      | Implementierung des Resource Managers . . . . .                     | 123        |
| 6.5      | Implementierung der Resource . . . . .                              | 125        |
| 6.6      | Sonstige ns-3-Erweiterungen . . . . .                               | 126        |
| 6.6.1    | Poisson-Verkehr . . . . .                                           | 126        |
| 6.6.2    | Unterstützung von Type of Service . . . . .                         | 127        |
| 6.6.3    | Trace-basierter Verkehr . . . . .                                   | 127        |
| 6.7      | Zusammenfassung . . . . .                                           | 128        |

## **IV Fallstudien zur Paketverarbeitung in Rechnersystemen 131**

|                                                            |                |
|------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>7 Fallstudie: Skalierung der Paketverarbeitung</b>      | <b>133</b>     |
| 7.1 Modellentwurf . . . . .                                | 134            |
| 7.2 Modellkalibrierung . . . . .                           | 138            |
| 7.3 Modellvalidation . . . . .                             | 141            |
| 7.4 Auswertung der Resultate . . . . .                     | 143            |
| 7.4.1 Einfluss der Frame-Größe . . . . .                   | 144            |
| 7.4.2 Einfluss der Anzahl der CPU-Kerne . . . . .          | 146            |
| 7.5 Zusammenfassung . . . . .                              | 150            |
| <br><b>8 Fallstudie: Paketverarbeitungsarten</b>           | <br><b>151</b> |
| 8.1 Modellentwurf . . . . .                                | 152            |
| 8.2 Modellkalibrierung . . . . .                           | 156            |
| 8.2.1 Minimal Forwarding . . . . .                         | 158            |
| 8.2.2 IP-Routing . . . . .                                 | 159            |
| 8.2.3 IPsec-Verschlüsselung . . . . .                      | 160            |
| 8.3 Modellvalidation . . . . .                             | 161            |
| 8.4 Auswertung der Resultate . . . . .                     | 163            |
| 8.4.1 Durchsatz . . . . .                                  | 165            |
| 8.4.2 Paketlatenz . . . . .                                | 167            |
| 8.4.3 Paketverlust . . . . .                               | 169            |
| 8.5 Zusammenfassung . . . . .                              | 172            |
| <br><b>9 Fallstudie: QoS-sensitive Paketverarbeitung</b>   | <br><b>173</b> |
| 9.1 QoS-Unterstützung im Linux-Betriebssystem . . . . .    | 174            |
| 9.2 Konzept zur QoS-sensitiven Paketverarbeitung . . . . . | 176            |
| 9.2.1 Verkehrsklassifizierung . . . . .                    | 177            |
| 9.2.2 Verkehrspriorisierung . . . . .                      | 178            |
| 9.3 Modellentwurf . . . . .                                | 180            |
| 9.3.1 Modellierung der Linux NAPI mit Task Units . . . . . | 182            |
| 9.3.2 Modellannahmen und Limitierungen . . . . .           | 185            |
| 9.4 Modellkalibrierung . . . . .                           | 186            |
| 9.5 Modellverifizierung . . . . .                          | 191            |

|       |                                                             |     |
|-------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 9.6   | Auswertung der Resultate . . . . .                          | 195 |
| 9.6.1 | Einfluss des Echtzeit-Anteils auf den Maximaldurchsatz . .  | 197 |
| 9.6.2 | Einfluss des Echtzeit-Anteils auf die Paketlatenz . . . . . | 198 |
| 9.6.3 | Einfluss der Last bei konstantem Echtzeit-Anteil . . . . .  | 201 |
| 9.7   | Zusammenfassung . . . . .                                   | 205 |

**V    Fazit und Ausblick** **207**

**10 Fazit und Ausblick** **209**

|      |                    |     |
|------|--------------------|-----|
| 10.1 | Fazit . . . . .    | 209 |
| 10.2 | Ausblick . . . . . | 213 |

**Abkürzungsverzeichnis** **217**

**Abbildungsverzeichnis** **221**

**Tabellenverzeichnis** **225**

**Literaturverzeichnis** **227**