

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Entwicklungen und Herausforderungen im zellularen Mobilfunk . . . . .    | 1         |
| 1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .  | 4         |
| <b>2 Funkübertragungssysteme</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1 Mehrantennensysteme . . . . .  | 7         |
| 2.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing . . . . .                     | 8         |
| 2.3 Kanalmodell . . . . .  | 12        |
| 2.4 Die Long Term Evolution/Frame-Struktur . . . . .                         | 13        |
| 2.4.1 Downlink Referenzsignale . . . . .                                     | 15        |
| 2.4.2 Synchronisationssignale . . . . .                                      | 16        |
| 2.4.2.1 Primary Synchronization Channel . . . . .                            | 17        |
| 2.4.2.2 Secondary Synchronization Channel . . . . .                          | 18        |
| 2.5 Grundlegende Funktionsblöcke eines MIMO-OFDM-Empfängers . . . . .        | 18        |
| 2.5.1 Empfängerstruktur . . . . .  | 18        |
| 2.5.2 Signalverarbeitungsblöcke . . . . .                                    | 20        |
| <b>3 Prototypenentwurf</b>   | <b>23</b> |
| 3.1 Anwendungen und Architekturen von Prototypensystemen . . . . .           | 23        |
| 3.1.1 Architekturen digitaler integrierter Schaltungen . . . . .             | 24        |
| 3.1.1.1 Digitaler Signalprozessor . . . . .                                  | 24        |
| 3.1.1.2 Field Programmable Gate Array . . . . .                              | 26        |
| 3.1.2 Hardwareaufbau des Prototypensystems . . . . .                         | 27        |
| 3.1.2.1 DSP-FPGA-Module . . . . .  | 27        |
| 3.1.2.2 Bus System/Kommunikation . . . . .                                   | 27        |
| 3.2 Implementierungsstrategien in der digitalen Signalverarbeitung . . . . . | 28        |
| 3.2.1 Festkommazahlen-Darstellung . . . . .                                  | 29        |
| 3.2.2 Abschätzungen zur Rechenleistung . . . . .                             | 30        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.3    | Algorithmentransformation . . . . .   | 33        |
| 3.2.3.1  | Diagramme/Graphen zur Darstellung von DSV-Algo-<br>rithmen . . . . .                            | 33        |
| 3.2.3.2  | Transformationsstrategien und spezielle Architekturen   | 34        |
| <b>4</b> | <b>Parameterschätzung und Synchronisation</b>   | <b>39</b> |
| 4.1      | Synchronisationseffekte . . . . .   | 40        |
| 4.1.1    | Zeitversatz . . . . .   | 40        |
| 4.1.2    | Frequenzversatz . . . . .   | 43        |
| 4.1.3    | Abtastzeitpunktversatz . . . . .  | 46        |
| 4.2      | Korrelationsbasierte Synchronisationsverfahren . . . . .  | 47        |
| 4.2.1    | CP-basierte Maximum Likelihood Schätzung . . . . .  | 48        |
| 4.2.2    | PSCH-Signal-basierte Schätzung . . . . .  | 51        |
| 4.2.2.1  | Autokorrelation/Reverse Autokorrelation . . . . .   | 54        |
| 4.2.2.2  | Kreuzkorrelation . . . . .  | 57        |
| 4.3      | Hybrides Synchronisationsverfahren . . . . .  | 61        |
| 4.3.1    | Implementierungaspekte: Hybrider Synchronisationsalgorithmus                                    | 67        |
| 4.4      | Kanalschätzung . . . . .  | 70        |
| 4.4.1    | LS-OFDM Kanalschätzung . . . . .  | 71        |
| 4.4.2    | Interpolationsverfahren . . . . .   | 72        |
| 4.4.2.1  | Lineare Interpolation . . . . .   | 72        |
| 4.4.2.2  | Kubische Spline Interpolation . . . . .   | 73        |
| 4.4.2.3  | Performance-Vergleich zwischen der linearen und der<br>kubischen Spline Interpolation . . . . . | 76        |
| 4.4.3    | Implementierungaspekte: Kubische Spline Interpolation . . . . .                                 | 78        |
| <b>5</b> | <b>Datendetektion</b>   | <b>83</b> |
| 5.1      | Maximum Likelihood Detektion . . . . .  | 86        |
| 5.2      | Lineare Detektionsverfahren . . . . .   | 86        |
| 5.3      | Successive Interference Cancellation . . . . .  | 87        |
| 5.4      | Iterative Baumsuchverfahren . . . . .   | 88        |
| 5.4.1    | Reellwertzerlegung . . . . .  | 90        |
| 5.4.2    | QR-Zerlegung . . . . .  | 93        |
| 5.4.2.1  | Givens Rotation . . . . .   | 93        |
| 5.4.2.2  | Alternative Ansätze zur Standard Givens Rotation . . . . .                                      | 95        |
| 5.4.2.3  | Systolische Arrays bei der QR-Zerlegung . . . . .   | 97        |
| 5.4.2.4  | Implementierungaspekte: QR-Zerlegung . . . . .  | 99        |
| 5.4.3    | Partielle Euklidische Distanz . . . . .   | 105       |
| 5.4.4    | Sphere Detektor . . . . .   | 109       |
| 5.4.4.1  | Komplexe Zahlenebene vs. Reellwertzerlegung . . . . .   | 112       |
| 5.4.5    | K-Best Detektor . . . . .   | 117       |
| 5.4.5.1  | Modifizierte partielle Euklidische Distanz . . . . .  | 118       |

---

|                              |  |            |
|------------------------------|--|------------|
| 5.4.5.2                      | Sortierungsstrategien/-algorithmen . . . . .                     | 124        |
| 5.4.5.3                      | Implementierungsaspekte: K <sup>+</sup> -Best Detektor . . . . . | 125        |
| <b>6</b>                     | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>133</b> |
| <b>A</b>                     | <b>Synchronisation</b>   | <b>137</b> |
| A.1                          | Delayprofile . . . . .   | 137        |
| <b>B</b>                     | <b>Optimierte PED Berechnung</b>                                 | <b>139</b> |
| B.1                          | Optimierte PED Berechnung für QAM64 . . . . .                    | 139        |
| B.2                          | Optimierte PED Berechnung für einen parallelen SE-SD . . . . .   | 141        |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> |  | <b>145</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  |  | <b>149</b> |