

# Inhaltsverzeichnis

|  |          |
|--|----------|
| <b>Zusammenfassung</b>   | <b>I</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b> |
| <b>2 Theorie und Methoden</b>  | <b>7</b> |
| 2.1 Aufbau und Funktion eines SiPM . . . . .                                     | 7        |
| 2.2 Quasi-statisches Verhalten von SiPM . . . . .                                | 12       |
| 2.2.1 Sperrrichtung . . . . .  | 13       |
| 2.2.2 Durchlassrichtung . . . . .  | 15       |
| 2.3 Kapazität der Mikrozellen . . . . .  | 15       |
| 2.4 Signalform eines SiPM . . . . .  | 16       |
| 2.5 Überspannungsabhängige Vervielfachung von Photoelektronen . . . . .          | 19       |
| 2.6 Dunkelzählrate . . . . .   | 21       |
| 2.7 Optisches Übersprechen . . . . .   | 25       |
| 2.8 Afterpulse Wahrscheinlichkeit . . . . .                                      | 27       |
| 2.9 Einzel-Photonen-Zeitauflösung . . . . .                                      | 31       |
| 2.9.1 Messung und Analyse digitalisierter Signalformen . . . . .                 | 32       |
| 2.9.2 Analyse der Signalformen mit Analog-Elektronik . . . . .                   | 33       |
| 2.10 Transit-Zeit-Differenz . . . . .  | 37       |
| 2.11 Zeitauflösung und Energieauflösung mit Szintillator und radioaktiver Quelle | 38       |
| 2.11.1 Energieauflösung . . . . .  | 40       |
| 2.11.2 Koinzidenz-Zeitauflösung . . . . .  | 41       |
| 2.12 Absolute Photonen-Nachweis-Effizienz . . . . .                              | 42       |
| 2.13 Spektrale Empfindlichkeit . . . . .   | 46       |
| 2.13.1 Messung der spektralen Leistung der Lichtquelle . . . . .                 | 48       |
| 2.13.2 Kontrolle des Messverfahrens mit bekanntem Referenzdetektoren .           | 51       |
| 2.13.3 Messung der spektralen Empfindlichkeit von SiPM . . . . .                 | 53       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3 Verifizierung der Messverfahren für das Zeitverhalten von SiPM</b>  | <b>55</b>  |
| 3.1 Vergleich verschiedener Vorverstärkerkonzepte . . . . .  | 55         |
| 3.1.1 Beschreibung der verwendeten Vorverstärker . . . . .   | 56         |
| 3.1.2 Vergleich der Vorverstärkerkonzepte hinsichtlich SPTR . . . . .  | 57         |
| 3.2 Untersuchungen zur Genauigkeit der SPTR-Messverfahren . . . . .  | 60         |
| 3.2.1 Untersuchung der Auflösungsgrenze bei der Analyse digitalisierter Pulsformen . . . . .                                       | 61         |
| 3.2.2 Untersuchung der Auflösungsgrenze bei der Analyse der Pulsform mit Diskriminatoren und Koinzidenzschaltung . . . . .         | 64         |
| 3.2.3 Vergleich der beiden SPTR-Messverfahren . . . . .  | 68         |
| 3.3 Untersuchung der Messgenauigkeit der Transit-Zeit-Differenz-Messung . . .  | 70         |
| <b>4 Systematische Untersuchung der Zeitauflösung verschiedener SiPM</b>   | <b>75</b>  |
| 4.1 Vergleich verschiedener Signalpfade . . . . .  | 76         |
| 4.2 Quantifizierung der Abhängigkeit zwischen SPTR und Detektorfläche . . .  | 78         |
| 4.3 Transit-Zeit-Differenz-Messungen zur Analyse von Signallaufzeiten . . . .  | 81         |
| 4.3.1 TTD-Messungen an SiPM mit $3 \times 3 \text{ mm}^2$ aktiver Fläche . . . . .   | 81         |
| 4.3.2 TTD-Messungen an SiPM mit $1.2 \times 1.2 \text{ mm}^2$ und $6 \times 6 \text{ mm}^2$ aktiver Fläche . . . . .               | 87         |
| 4.4 Messung der Zeitauflösung mit verschiedenen Anschlusskonfigurationen .   | 89         |
| <b>5 Simulation der Signalform und Transit-Zeit-Differenz von SiPM</b>   | <b>95</b>  |
| 5.1 Grundlage des Simulationsmodells . . . . .   | 95         |
| 5.2 Simulation der SiPM ohne optischer Barriere . . . . .  | 97         |
| 5.3 Simulation der SiPM mit optischer Barriere . . . . .   | 101        |
| 5.3.1 Skalierung des Simulationsmodells für SiPM mit verschiedener aktiver Fläche . . . . .  | 110        |
| 5.3.2 Untersuchung der parasitären Leitungsparameter und deren Einfluss  | 113        |
| <b>6 Optimierung des Zeitverhaltens von SiPM</b>   | <b>117</b> |
| 6.1 Untersuchung verschiedener Anschlusskonfigurationen mit Hilfe des Simulationsmodells und Vergleich mit TTD-Messungen . . . . . | 117        |
| 6.2 Modifikation der Passivierungsschichtdicke zur Reduktion der TTD . . . .   | 119        |
| 6.3 Modifikation des Leiterbahnwiderstandes . . . . .  | 126        |
| 6.4 Auswirkung technologischer Modifikationen in Kombination mit verschiedenen Leiterbahnlayouts auf das Zeitverhalten . . . . .   | 133        |
| 6.5 Vergleich der modifizierten SiPM hinsichtlich SPTR . . . . .   | 136        |
| 6.6 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Herstellern . . . . .   | 138        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.7 Aufführung weiterer technischer Optimierungsmöglichkeiten . . . . . | 142        |
| <b>7 Diskussion und Ausblick</b>  | <b>145</b> |
| <b>Literatur</b>  | <b>151</b> |
| <b>Abkürzungen</b>  | <b>165</b> |
| <b>Formelzeichen</b>  | <b>167</b> |
| <b>Literatur</b>  | <b>169</b> |
| <b>Danksagung</b>   | <b>185</b> |