

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Überblick über die Arbeit und eigener Beitrag . . . . .	1
1.3 Besondere Definitionen im Rahmen der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Stand der Technik und Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Telemetriesysteme . . . . .	5
2.1.1 Sensornetzwerke . . . . .	5
2.1.2 Kommunikationsprotokolle . . . . .	6
2.1.3 Existierende Systeme . . . . .	7
2.1.4 Schaltungstechnik aktueller Sensorknoten . . . . .	9
2.1.5 Energieverbrauch im Sensorknoten . . . . .	11
2.2 Reichweite von Telemetriesystemen . . . . .	12
2.2.1 Funkübertragungsmodell . . . . .	12
2.2.2 Modelle für den Pfadverlust . . . . .	13
2.2.3 Effektives Rauschen am Empfängereingang . . . . .	15
2.2.4 Sphere-packing bound als Empfangsgrenze . . . . .	15
2.2.5 Zulässiger Pfadverlust und maximale Entfernung . . . . .	17
2.3 Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .	20
2.3.1 Grundbegriffe . . . . .	20
2.3.2 Bedingte Wahrscheinlichkeit von Ereignissen . . . . .	22
2.3.3 Zufallsvariablen und Wahrscheinlichkeitsverteilung . . . . .	23
2.3.4 Bedingte Wahrscheinlichkeit von Zufallsvariablen . . . . .	25
2.3.5 Übergangswahrscheinlichkeit und Likelihood . . . . .	25
2.3.6 Komplexe Zufallsvariablen . . . . .	26
2.3.7 Parameterschätzung . . . . .	27
2.4 Telegrammdetection . . . . .	29
2.4.1 Signalentdeckungstheorie . . . . .	30
2.4.2 Nomenklatur und Übertragungsmodell AWGN . . . . .	30
2.4.3 Verfahren zum Finden der Präambel . . . . .	33
2.4.4 Neyman-Pearson Detektor . . . . .	37
2.4.5 Maximum Likelihood Detektor . . . . .	41
2.4.6 Übertragungsmodell AWGN und unbestimmte Phase . . . . .	42
2.4.7 Überblick über die verfügbare Literatur . . . . .	47
2.4.8 Einordnung der vorliegenden Arbeit . . . . .	50
2.5 Übertragungssicherheit von Funksystemen . . . . .	51
2.5.1 Störmodell CCW/ofB . . . . .	52
2.5.2 Wahrscheinlichkeit, dass sich Aussendungen überlagern . . . . .	52
2.5.3 Vorwärtsfehlerkorrektur . . . . .	54
2.5.4 Untere Schranke für den Binary Symmetric Channel . . . . .	56

2.5.5	Obere Schranke für den Binary Symmetric Channel . . . . .	59
2.5.6	Untere Schranke für den Binary Erasure Channel . . . . .	60
2.5.7	Obere Schranke für den Binary Erasure Channel . . . . .	62
2.5.8	Weitere Literaturstellen und Einordnung der vorliegenden Arbeit . . . . .	62
2.6	Zusammenfassung . . . . .	64
<b>3</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>65</b>
3.1	Erhöhung der Reichweite von Funksystemen . . . . .	65
3.2	Begrenzung der Sendedauer durch den Energiespeicher . . . . .	66
3.3	Höhere Störanfälligkeit bei größerer Sendedauer . . . . .	70
3.4	Fragmentierung auf der Medienzugriffssteuerungsschicht . . . . .	71
3.5	Zusammenfassung . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Eigener Beitrag</b>	<b>73</b>
4.1	Fragmentierung auf der Bitübertragungsschicht . . . . .	73
4.1.1	Grundlegende Idee und Logik der Analyse . . . . .	74
4.1.2	Aufbau von Übertragungssystemen mit Fragmentierung . . . . .	75
4.1.3	Beschränkung der Telegrammyzyklusdauer durch Quarzabweichungen .	76
4.2	Optimale Nutzung des Energiespeicher kondensators . . . . .	80
4.2.1	Spannungsverlauf über dem Energiespeicher kondensator . . . . .	80
4.2.2	Berechnung der asymptotischen Fragmentdauer . . . . .	81
4.2.3	Maximierung der Fragmentdauer bei bestehender Schaltung . . . . .	83
4.2.4	Maximierung der Fragmentdauer durch Schaltungsanpassung . . . . .	84
4.2.5	Minimierung des Telegrammspreizungsfaktors . . . . .	86
4.2.6	Definition eines Systementwurfsprozesses . . . . .	89
4.2.7	Abschätzungen für den Systementwurf . . . . .	90
4.2.8	Beschränkung der Informationsmenge pro Telegramm . . . . .	91
4.2.9	Zusammenfassung . . . . .	93
4.3	Detektion der aufgeteilten Telegramme . . . . .	95
4.3.1	Angenommenes System- und Übertragungsmodell . . . . .	95
4.3.2	Neyman-Pearson Detektor für fragmentierte Präambeln . . . . .	97
4.3.3	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der optimalen Entscheiderwerte .	98
4.3.4	Leistungsfähigkeit des optimalen Detektors . . . . .	102
4.3.5	Aus der Literatur bekannte, vereinfachte Detektoren . . . . .	103
4.3.6	Vereinfachte Amplitudenkombination (SMC) . . . . .	107
4.3.7	Binäre Symbolkombination (BYC) . . . . .	110
4.3.8	Übertragung ohne Symbolsynchronisation und nichtlineare Modulation	114
4.3.9	Zusammenfassung . . . . .	118
4.4	Übertragungssicherheit und Systemdurchsatz . . . . .	120
4.4.1	Auslöschung von Fragmenten . . . . .	121
4.4.2	Verhalten periodischer Störer . . . . .	122
4.4.3	Überlagerung von Symbolen als Markov-Kette . . . . .	123
4.4.4	Wahrscheinlichkeit der Überlagerung von Symbolen . . . . .	128
4.4.5	Fehlerkorrekturfähigkeit bei Auslöschung . . . . .	133
4.4.6	Fehlerkorrekturfähigkeit bei Verfälschung . . . . .	136
4.4.7	Übertragungssicherheit bei Störung durch andere Systeme . . . . .	138
4.4.8	Systemdurchsatz bei Anwendung von Fragmentierung . . . . .	144
4.4.9	Zusammenfassung . . . . .	153

4.5 Konkreter Systementwurf und Implementierung . . . . .	154
4.5.1 Aufbau des Senders und Definition des Übertragungsverfahrens . . . . .	154
4.5.2 Aufbau des Empfängers . . . . .	155
4.5.3 Entwurf der Präambel . . . . .	157
4.5.4 Simulationsergebnisse der Detektion . . . . .	159
4.5.5 Simulationsergebnisse der Telegrammfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	160
4.5.6 Aufbau zweier Telemetrieübertragungsstrecken . . . . .	161
4.5.7 Durchgeführte Telemetrieübertragungen . . . . .	163
4.5.8 Ermittlung der Empfängerempfindlichkeit . . . . .	165
4.5.9 Übertragung in gestörter Umgebung . . . . .	167
4.5.10 Zusammenfassung . . . . .	168
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>171</b>
<b>6 Ausblick</b>	<b>173</b>
<b>A Mathematische Berechnungen und Herleitungen</b>	<b>175</b>
A.1 Approximation der Sphere Packing Bound . . . . .	175
A.2 NP-Detektor für AWGN Störung . . . . .	175
A.3 ML-Detektor für AWGN Störung . . . . .	177
A.4 Likelihood für AWGN Störung und unbestimmte Phase . . . . .	177
A.5 Verteilung der Summe von Zufallsvariablen . . . . .	178
A.6 Berechnungen zur Fragmentdauer . . . . .	180
A.6.1 Monotonie über die Pausenzeit . . . . .	180
A.6.2 Monotonie über den Senderstrom . . . . .	181
A.6.3 Monotonie über die Versorgungsspannung . . . . .	181
A.6.4 Grenzwert für unendliche Pausenlänge . . . . .	182
A.6.5 Monotonie über den Batteriespitzenstrom . . . . .	182
A.7 Berechnungen zum Telegrammspreizungsfaktor . . . . .	184
A.7.1 Monotonie über die Pausenzeit . . . . .	184
A.7.2 Realisierbarkeitsschranke . . . . .	185
A.8 Vereinfachte Schranken . . . . .	186
A.8.1 Fragmentdauer und Pausendauer . . . . .	186
A.8.2 Telegrammspreizungsfaktor . . . . .	187
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>189</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>197</b>
<b>Erläuterung von Abkürzungen</b>	<b>199</b>
<b>Verwendete mathematische Zeichen</b>	<b>203</b>
A.9 Allgemeine Schreibweisen . . . . .	203
A.10 Definierte Symbole . . . . .	203
A.11 Stochastische Funktionen . . . . .	206
A.12 Operatoren . . . . .	207
A.13 Griechische Symbole . . . . .	208
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>209</b>