

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>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</b>	<b>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	Telegrammdetektion . . . . .	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 Telegrammzyklusdauer 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</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>171</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>173</b>
<b>A</b>	<b>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>