

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	III
Danksagung.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsfragen	3
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung	5
1.4 Struktur der Arbeit.....	6
2 Stand der Technik	9
2.1 Schaltanlage.....	9
2.2 Stationsleittechnik.....	10
2.3 Schutzsystem	12
2.3.1 Wandler.....	13
2.3.2 Schutzgerät	14
2.3.3 Leistungsschalter	15
2.4 Verteilte kommunikationsabhängige Schutzfunktionen	16
2.4.1 Sammelschienschutz	16
2.4.2 Rückwärtige Verriegelung	17
2.4.3 Schaltfehlerschutz (Anlagenverriegelung).....	18
2.4.4 Dezentraler Synchronitätscheck	18
2.4.5 Leistungsschalterversagerschutz.....	19
2.4.6 Fehlerklärung in einer Ringsammelschienenstation	20
2.4.7 Mitnahmeverfahren beim Distanzschutz mit Unterreichweite	21
2.5 Konventionelle Signalübertragung in Schaltanlagen.....	22
2.5.1 Übertragungsmedien.....	22
2.5.2 Elektromagnetische Verträglichkeit	22
2.5.3 Signal- und Datenmodelle	24
2.6 Kommunikationsprotokolle der Energietechnik.....	24
2.6.1 IEC 60870-5 – Fernwirk Einrichtungen und -systeme.....	24
2.6.2 IEC 60870-6 – TASE.2-Dienste und –Protokoll zur Netzleitstellenkopplung... 28	

2.6.3 IEEE C37.94-2002 – IEEE Standard for N times 64 Kilobit per Second Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer Equipment	28
2.6.4 IEEE C37.118.2-2011 – IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems	29
2.6.5 IEC 61850 – Kommunikationsnetze und -systeme für die Automatisierung in der elektrischen Energieversorgung	30
3 Anforderungen.....	37
3.1 Echtzeitfähigkeit und Skalierbarkeit	37
3.2 Zuverlässigkeit.....	39
3.3 Datenintegrität.....	40
3.4 Sicherheit.....	41
3.5 Umgebungsbedingungen.....	42
3.6 Zusammenfassung und Abgrenzung.....	43
4 Systementwurf	45
4.1 Stand der Forschung und Entwicklung.....	45
4.2 Architekturvarianten	46
4.3 Technologievarianten	48
4.3.1 Industrielle Feldbuskommunikation.....	48
4.3.2 Bustopologien	52
4.3.3 Medienzugriffsverfahren.....	53
4.3.4 Übertragungsprozeduren	54
- 4.4 Konzept für eine zyklische Echtzeit-Kommunikation.....	56
5 Informations- und Kommunikationsmodell	63
5.1 Funktionen, Informationen und Daten	63
5.1.1 Funktionen	64
5.1.2 Informationen.....	64
5.1.3 Daten.....	66
5.1.4 Vergleich zum Informationsmodell der IEC 61850-5	68
5.2 Modellierung des Systems	69
5.2.1 Auswahl der Methodik	69
5.2.2 Einführung in Petri-Netze.....	71
5.2.3 Modellierung der Stations- und Prozesskommunikation.....	72
5.3 Mathematisches Modell der Informations- und Datenrate	76
5.3.1 Feldtypen	76
5.3.2 Berechnung der Nachrichtenrate	77
5.3.3 Analyse der Datenrate.....	79
5.4 Analyse der Architekturvarianten	82

5.5 Optimierung der Telegrammstruktur und -kodierung.....	85
5.5.1 Quelle	86
5.5.2 Messwert	87
5.5.3 Einheit und Größenordnung	88
5.5.4 Zeitstempel	88
5.5.5 Qualität	90
5.5.6 Prüfsumme	90
5.5.7 Analyse und Vergleich mit SV und GOOSE.....	91
5.6 Zusammenfassung	94
6 Experimentelle Prüfung der Echtzeitfähigkeit	97
6.1 Definition der End-zu-End Verzögerung	97
6.2 Echtzeitanforderung des Konzepts.....	100
6.3 Prüflinge.....	101
6.4 Messverfahren	101
6.5 Test der Prüflinge	103
6.5.1 Reaktionszeit	103
6.5.2 Jitter	104
6.6 Test des Gesamtsystems	105
7 Zuverlässigkeit und Wartungsaufwand.....	109
7.1 Analysemethoden	109
7.1.1 Fehlerbaumanalyse	109
7.1.2 Zuverlässigkeits-Blockdiagramm (ZBD)	110
7.2 Fehlermodell	111
7.3 Probabilistische Kenngrößen	112
7.4 Berechnung und Auswertung.....	115
7.5 Analyse der Einflussfaktoren.....	120
7.6 Bewertung der Unsicherheiten.....	123
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	127
Formelzeichen und Abkürzungen	I
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Literaturverzeichnis	XIII
Anhang	XXIII
Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis.....	XXV
Lebenslauf	XXVII