

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Selbstoptimierende Systeme	2
1.2	Zielsetzung dieser Arbeit	3
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	Echtzeitkommunikationsnetze	7
2.1	Echtzeit	7
2.1.1	Begriffserläuterungen	9
2.2	Kommunikationsnetze	12
2.2.1	Begriffserläuterungen	12
2.2.2	ISO/OSI-Referenzmodell	13
2.2.3	Medienzugriffsverfahren	15
2.2.4	Netzwerktopologien	17
2.2.5	Ethernet	18
2.2.6	TCP/UDP/IP	21
2.3	Echtzeitkommunikation	24
2.3.1	Dienstgüte und Dienstklasse	25
2.3.2	Ereignis- und zeitgesteuerte Echtzeitkommunikation	26
2.3.3	Feldbusse	26
2.4	Ethernet-basierte Echtzeitkommunikation	28
2.4.1	Switched-Ethernet	32
2.4.2	VLAN – Ein virtuelles lokales Netz	36
2.4.3	Priorisierung nach IEEE 802.1D	37
2.4.4	Uhrensynchronisation nach IEEE 1588	39

2.5	Standardisierte Echtzeitprotokolle	40
2.5.1	Leistungsklassen	41
2.5.2	Modbus/TCP	42
2.5.3	EtherNet/IP	43
2.5.4	Ethernet Powerlink	44
2.5.5	PROFINET	45
2.5.6	EtherCAT	47
2.6	Leistungsbewertung von Echtzeitprotokollen	49
2.6.1	Berechnung der Leistungsfähigkeit	49
2.6.2	Modbus/TCP	51
2.6.3	EtherNet/IP	54
2.6.4	Ethernet Powerlink	56
2.6.5	PROFINET	58
2.6.6	EtherCAT	60
2.6.7	Vergleich	62
2.7	Zusammenfassung	66
3	Eine rekonfigurierbare Switch-Architektur	69
3.1	Ein rekonfigurierbarer Ethernet-Switch	70
3.1.1	Die dynamische partielle Rekonfiguration eines FPGAs	72
3.1.2	Rekonfigurationsstrategien	74
3.1.3	Automatische Rekonfiguration des Switches	82
3.2	Prototypische Umsetzung	85
3.2.1	Software-Switch	86
3.2.2	Hardware-Switch	87
3.2.3	Rekonfigurationssteuerung	88
3.2.4	Bus-Architektur	89
3.3	Performanceevaluation	92
3.3.1	Messaufbau	92
3.3.2	Latenzzeiten und Jitter	94

3.3.3	Ressourcenverbrauch des rekonfigurierbaren Switches	96
3.3.4	Verifikation der Rekonfiguration ohne Paketverlust	97
3.3.5	Rekonfigurationszeit	98
3.3.6	Leistung und Ressourcenbedarf des rekonfigurierbaren Systems .	102
3.4	Zusammenfassung	104
4	Ein selbstsynchronisierendes Echtzeitprotokoll	107
4.1	Modell	109
4.2	Selbstsynchronisation	113
4.2.1	Prozess der Selbstsynchronisation	114
4.2.2	Harmonische Zykluszeiten	118
4.2.3	Beliebige Zykluszeiten	121
4.3	Weitere Topologien	125
4.3.1	Geteilte Verbindungen	125
4.3.2	In Bäume eingebettete Ringe	129
4.4	Ereignisgesteuerte Nachrichten	131
4.5	Zusammenfassung	132
5	Evaluierung einer SelfS-Portierung auf Ethernet	135
5.1	Portierung auf Ethernet	136
5.1.1	Paketformat	136
5.1.2	Erweiterung des Switches	138
5.1.3	Synchronisationsstatus	140
5.2	Simulationsmodell	140
5.2.1	Modell der Switch-Architektur	141
5.2.2	Modell des Verbindungskanals	142
5.2.3	Zusammenfassung der Modellparameter	143
5.3	Selbstsynchronisation	143
5.3.1	Synchronisationszeit	145
5.4	Echtzeiteigenschaften	147
5.4.1	Mittlere Paketumlaufzeit	148

5.4.2	Jitter der Paketumlaufzeit	149
5.4.3	Kompensierung des Jitters durch die IFG	151
5.4.4	Jitter bei großen Verarbeitungszeiten	153
5.4.5	Latenzzeit	154
5.5	Vergleich von Hardware- und Software-Switch	158
5.5.1	Dynamische Rekonfiguration	160
5.6	Experimentelle Validierung von SelfS	161
5.6.1	Aufbau des Testsystems	161
5.6.2	Ergebnisse Hardware-Switch	162
5.6.3	Ergebnisse Software-Switch	164
5.7	Vergleichende Leistungsbewertung	167
5.7.1	Zykluszeit	167
5.7.2	Latenzzeit	169
5.7.3	Jitter	170
5.7.4	Protokolleffizienz	171
5.8	Protokollerweiterungen	172
5.8.1	Variation der Basiszykluszeit	172
5.8.2	Fehlertoleranz	173
5.9	Zusammenfassung	175
6	Zusammenfassung und Ausblick	177
	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen	181
	Abbildungsverzeichnis	189
	Tabellenverzeichnis	191
	Literaturverzeichnis	193