

Inhaltsverzeichnis

I	Abbildungsverzeichnis	XII
II	Tabellenverzeichnis	XVI
III	Definition von Begriffen und Abkürzungen	XVII
1	Einleitung	1
1.1	Industrielle Revolution	1
1.2	Motivation: Umsetzung von Ethernet TSN in der Feldebene	2
1.3	Problembeschreibung und Forschungsfrage.....	4
1.4	Zielsetzung: Kompatibilitätsverfahren für Ethernet TSN	7
1.5	Aufbau der Arbeit	8
2	Entwicklung der industriellen Kommunikation und der Anforderungen	9
2.1	Architektur und Anwendungseigenschaften.....	9
2.2	Entwicklung der industriellen Kommunikation	11
2.3	Definierte Anwendungsfälle und Systemanforderungen	13
3	Stand der Wissenschaft und Technik	17
3.1	Echtzeit-Ethernet vor der Einführung von Ethernet TSN.....	17
3.1.1	Klassifizierung	18
3.1.2	Konvergenz, Koexistenz, Interoperabilität.....	20
3.1.3	Grenzen der Flexibilisierung	20
3.2	IEEE 802.3-Ethernet.....	22
3.2.1	Express MAC.....	22
3.2.2	Fast Ethernet und Gigabit-Ethernet	23
3.2.3	Zwei-Draht-Ethernet (Single Pair Ethernet)	23
3.3	IEEE 802.1 Higher Layer LAN Protocols (Bridging)	25
3.3.1	Adressierung und Virtual LAN.....	26
3.3.2	MAC-Bridging-Verfahren.....	27

3.3.3	Uhrensynchronisation	30
3.3.4	Warteschlangenverwaltung (Traffic Shaping)	39
3.4	Ethernet TSN-Profile und Protokollintegrationen	43
3.4.1	TSN-Profil für die industrielle Automation IEC/IEEE 60802	44
3.4.2	PROFINET over TSN	48
3.5	Ethernet-Hardware für die industrielle Kommunikation	57
3.5.1	Feldgerätetypen	57
3.5.2	Nicht rekonfigurierbare Hardware	58
3.5.3	Rekonfigurierbare und programmierbare Hardware	60
3.6	Planung und Konfiguration von Ethernet TSN-Netzwerken	61
3.6.1	Planung eines Ethernet TSN-Netzwerks	61
3.6.2	Konfiguration von Ethernet TSN-Netzwerken	63
3.6.3	Scheduling von Ethernet TSN-Netzwerken	65
3.7	Migrationsstrategien von Echtzeit-Ethernet zu Ethernet TSN	70
3.7.1	PROFINET over TSN	71
3.7.2	EtherCAT-TSN-Profile	72
3.7.3	Forschungsarbeiten und Ansätze Migration zu Ethernet TSN .	73
4	Analyse der Kompatibilität von Ethernet TSN und PROFINET-Hardware	75
4.1	Definition des Analysebereiches	75
4.2	Kompatibilitätsanalyse Ethernet TSN und PROFINET-Hardware	76
4.3	Inkompatibilitäten	77
4.3.1	Identifikation zeitgesteuerter Kommunikation	77
4.3.2	Adresstabelle zu klein	77
4.3.3	VLAN-Remapping-Hardware nicht vorhanden	78
4.3.4	Synchronisationsgenauigkeit zu gering	78
4.4	Spezielle Forschungsfragen	80
5	Kompatibilitätsverfahren	81
5.1	Übersicht	81
5.2	Ethernet TSN-kompatibler Bridge-Modus Time Aware Forwarding .	83

5.3	Verteilter kooperativer Domänenschutz (VKDS)	87
5.4	Individuelle Bestimmung Zeitsynchronisationsgüte (IZG)	93
6	Validierung der Verfahren.....	97
6.1	Validierungsmethode und Metriken.....	97
6.1.1	Validierung und Leistungsmessung in vernetzten Systemen ..	97
6.1.2	Auswahl einer grundlegenden Validierungsmethode	98
6.1.3	Leistungseigenschaften und Funktionen.....	98
6.2	Prüfling.....	101
6.3	Eingesetzte Geräte sowie Test- und Messequipment	102
6.3.1	Ethernet-Lastgeneratoren.....	103
6.3.2	Messtechnik	104
6.4	Time Aware Forwarding	105
6.4.1	Testumgebungen.....	105
6.4.2	Definition von Formelzeichen.....	107
6.4.3	Latenzzeit	109
6.4.4	Zeitgesteuerte Kommunikation	111
6.4.5	Stoßfreie Rekonfiguration	119
6.4.6	Fehlertest	128
6.4.7	Austauschbarkeit	131
6.5	Verteilter kooperativer Domänenschutz.....	134
6.5.1	Rekonfiguration der Domänengrenze	135
6.6	Individuelle Bestimmung der Zeitsynchronisationsgüte	137
6.6.1	Testumgebung	137
6.6.2	Unterschied Synchronisationsgenauigkeit Protokolle	138
6.6.3	Prognosemodell.....	139
6.7	Anwendungstest an einer Produktionsanlage in der SmartFactoryOWL.....	142
7	Zusammenfassung und Bewertung	147
	Referenzen	153