

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.1.1	Einführung in synchrone digitale Netze	1
1.1.2	Darstellung typischer Probleme synchroner Netze	2
1.2	Ausgangspunkt und Ziele	3
1.3	Überblick	4
2	Digitale Telekommunikationsnetze	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Netzfunktionen	5
2.3	ISO/OSI Schichtenmodell	6
2.4	Eigenschaften von Steuersignalen	7
2.4.1	Charakterisierung von Taktsignalen	8
2.4.2	Phasenrauschen und Frequenzdrift	10
2.5	Steuerung digitaler Datenübertragung	10
2.5.1	Einleitung	10
2.5.2	Steuerungsarten von Datenübertragung	11
2.5.3	Synchronisationsstrategien	11
2.5.4	Plesiochrone Datenübertragung	12
2.6	Zusammenfassung	14
3	Digitale Multiplexhierarchien	15
3.1	Einleitung	15
3.2	Digitales Multiplexen	15
3.3	PCM30/E1	16
3.3.1	Struktur der PCM30-Rahmen	16
3.3.2	Einsatzgebiete von PCM30	17
3.3.3	PCM30-Mehrfachrahmenstruktur	17
3.3.4	Synchroner Betrieb	18
3.3.5	Plesiochrone Betrieb	19
3.4	Synchrone Digitale Hierarchie (SDH)	19
3.4.1	Einleitung	19
3.4.2	Hierarchieebenen	20
3.5	Verbindungsebenenkommunikation bei rahmenbasierter Übertragung	20
3.5.1	Einleitung	20
3.5.2	Überwachung der Datenübertragung	20
3.5.3	Kommunikationslatenz	21
3.6	Zusammenfassung	22

4	ISPN	23
4.1	Einleitung	23
4.2	Diensteintegration	23
4.3	Zentrales Netzwerkmanagement	24
4.4	Hardware-Komponenten	24
4.5	Architektur des Synchronisationsnetzes	25
4.6	Takt- und Datenfluß in ISPN Knoten	25
4.6.1	Takthierarchie	25
4.6.2	Referenzselektion des Systemtakts	26
4.6.3	Entkopplung der Taktdomänen	26
4.6.4	Verbindungseinrichtungen	27
4.6.5	Datendomänen	28
4.7	Takt- und Datenfluß innerhalb einer NU	29
4.7.1	Schematischer Aufbau einer NU	29
4.7.2	Datenfluß und Taktrückgewinnung	29
4.7.3	Aufbau des Empfangspuffers	29
4.7.4	Taktdomänen	30
4.7.5	Generierung des Systemtakts	31
4.7.6	Taktreferenzwechsel	31
4.7.7	Verbindungsebenenkommunikation	32
4.7.8	Zusammenfassung	32
4.8	Software-Mechanismen	32
4.9	Erweiterung des Systems	33
4.10	Zusammenfassung der Randbedingungen für den Synchronisationsschutz	34
5	Modellierung des Übertragungssystems	35
5.1	Einleitung	35
5.2	Einführung in die Graphentheorie	35
5.3	Modellierung der Systems	41
5.4	Kategorisierung von Störungen	42
5.4.1	Einleitung	42
5.4.2	Abhängigkeit von Verbindungen	42
5.4.3	Induzierte und induzierende Mengen	45
5.4.4	Abhängigkeit von Nutzdatenkanälen	46
5.4.5	Beziehungen zwischen den Abhängigkeitsrelationen	48
5.4.6	Anmerkung zu nicht-trivialen Abhängigkeiten	53
5.4.7	Fazit	54
6	Verwendeter Algorithmusbegriff	55
6.1	Einleitung	55
6.2	Grundlegenden Eigenschaften von Algorithmen	55
6.3	Komplexität von Algorithmen	58
6.4	Bewertungskriterien für Synchronisationsschutzalgorithmen	58
6.5	Zusammenfassung	59
7	Bewertungskriterien für die Qualität von Taktbäumen	61
7.1	Einleitung	61
7.2	Trennung von Transport- und Synchronisationsschutz	62
7.2.1	Einleitung	62
7.2.2	Routingverfahren für leitungsvermittelten Datenverkehr	62
7.2.3	Ressourcenunabhängigkeit	62
7.2.4	Effektivität	63
7.2.5	Effizienz	63
7.2.6	Qualität	63
7.2.7	Robustheit	64

7.2.8	Fazit	64
7.3	Metriken	65
7.3.1	Metrikbegriff	65
7.3.2	Typische Metrikklassen	65
7.4	Anforderungen an Metriken	66
7.5	Metrikattribute	66
7.5.1	Physische Attribute	66
7.5.2	Synthetische Attribute	67
7.5.3	Attributklassen	67
7.6	Globale Metriken	68
7.6.1	Einleitung	68
7.6.2	Taktqualität	68
7.6.3	Ausfallwahrscheinlichkeit (multiplikativ)	70
7.6.4	Abhängige Nutzdatenkanäle	71
7.6.5	Kombinierte Störungs-Metrik für Taktbäume	72
7.6.6	Einsatzgebiet der Metriken	74
7.7	Redundanz-Metrik	75
7.7.1	Taktversorgung von Stoßstellenknoten	75
7.7.2	Redundanz der Taktverteilung	77
7.7.3	Alternativ-Pfade	78
7.7.4	Zusammenfassung	79
7.8	Verteilte Metriken	79
7.8.1	Grundlagen	79
7.8.2	Inversionsdauer (additiv)	80
7.8.3	Umschaltbedingte Störungen (additiv)	80
7.8.4	Umschaltdauer (additiv)	82
7.8.5	Ausfallwahrscheinlichkeiten (multiplikativ)	82
7.8.6	Taktqualität (additiv, konvex)	84
7.8.7	Kombination verteilter Metriken	87
7.8.8	Laufzeitkomplexität	88
7.8.9	Zusammenfassung	88
7.9	Fazit	89
8	Analyse existierender Transport- und Synchronisationsschutzmechanismen	91
8.1	Einleitung	91
8.2	Paket- und rahmenbasierte Datenübertragung	91
8.2.1	Routing und Switching	91
8.2.2	Topologie und Modellierung der Netze	92
8.2.3	Metriken	93
8.3	Wegefindung bei paketvermittelter Übertragung	93
8.3.1	Eigenschaften von Routingprotokollen	93
8.3.2	Dynamische Routingprotokolle	94
8.4	Distanzvektor-Routing	94
8.4.1	Algorithmusbeschreibung	94
8.4.2	Routingschleifen	95
8.4.3	Schleifenerkennung und -vermeidung	96
8.4.4	Laufzeit- und Speicherplatzkomplexität	97
8.4.5	Fazit	97
8.5	Routen mit Verbindungsstatus	98
8.5.1	Algorithmusbeschreibung	98
8.5.2	Zuverlässiges Fluten	99
8.5.3	Laufzeit- und Speicherplatzkomplexität	99
8.5.4	Fazit	99
8.6	Spanning-Tree Protokoll	100

8.6.1	Einsatzgebiet	100
8.6.2	Lernende Netzbrücken (Learning Bridges)	100
8.6.3	Aktive Topologie	102
8.6.4	Aufgaben des Spanning-Tree Protokolls	103
8.6.5	Operationsprinzip	103
8.6.6	Algorithmusbeschreibung	104
8.6.7	STP Metrik	110
8.6.8	Beispiel zur Notwendigkeit der Port-Zustände bei der Schleifenvermeidung	111
8.6.9	Schleifenvermeidung bei der Rahmenweiterleitung	113
8.6.10	Eigenschaften des Algorithmus	114
8.6.11	Konstanz des Speicherplatzbedarfs	116
8.6.12	Fazit	116
8.7	Rapid Spanning-Tree Protokoll	117
8.7.1	Einleitung	117
8.7.2	Erweiterung des Operationsprinzips	117
8.7.3	Port-Rollen und -Zustände	118
8.7.4	Kontrolle des Flutungsprozesses durch ein Handshake-Verfahren	119
8.7.5	Entwurfphilisophie	122
8.7.6	Schleifenvermeidung	122
8.7.7	Laufzeit- und Speicherplatzkomplexität	123
8.7.8	Fazit	124
8.8	Synchronisationsschutzverfahren für SDH-Systeme	124
8.8.1	Einleitung	124
8.8.2	Synchronisationsnetze	125
8.8.3	Arten von Synchronisationsschutzmechanismen	128
8.8.4	Synchronisationsnetzplanung	129
8.8.5	SDH Equipment Timing Source (SETS)	133
8.8.6	Synchronization Supply Unit (SSU)	135
8.8.7	Synchronization Status Messages (SSM)	136
8.8.8	Schleifenvermeidung zwischen SETS	138
8.8.9	Kommunikation zwischen SETS und SSU	140
8.8.10	Schleifenvermeidung beim SDH-Synchronisationsschutz	144
8.8.11	Laufzeit- und Speicherplatzkomplexität	146
8.8.12	Einsatz des Synchronisationsschutzmechanismus	146
8.8.13	Fazit	147
8.9	Ergebnis	148
8.9.1	Zusammenfassung der Wegelenkungsproblematik	148
8.9.2	Fazit	149
9	Simulation des synchronen digitalen Übertragungssystems	151
9.1	Einleitung	151
9.2	Schichtenmodell	152
9.3	Ereignissimulation	152
9.3.1	Simulierte Ereignisse der physischen Schicht	152
9.3.2	Implementierung der Ereignissimulation	153
9.4	Simulationssequenz	153
9.5	Leitungssimulation	154
9.6	Knotensimulation	154
9.7	Taktsimulation	154
9.8	Rahmensynchronisation	155
9.9	Zusammenfassung	156

10 Neuentwickelte Synchronisationsschutzalgorithmen	157
10.1 Einleitung	157
10.1.1 Rückblick und Ziele	157
10.1.2 Randbedingungen	157
10.1.3 Überblick	158
10.2 Grundlegende Eigenschaften der Schutzalgorithmen	158
10.2.1 Operationsprinzip	158
10.2.2 Basisfunktionen	159
10.2.3 Metriehierarchie	160
10.2.4 Physische Metrik	161
10.2.5 Topologische und synthetische Metrik	164
10.2.6 Kommunikationsrollen	165
10.2.7 Flutung und Aggregation	165
10.2.8 Behandlung von Störungen des Empfangsprozesses	166
10.2.9 Ein-Pfad-Inversion	166
10.2.10 Schutzerfordernde Ereignisse	169
10.2.11 Ausführbedingung des Synchronisationsschutzalgorithmus	169
10.2.12 Auslösen der Referenzselektion	170
10.2.13 Knotengedächtnis	171
10.2.14 Steuerung des Inversionsprozesses	173
10.2.15 Globaler Ablauf der Synchronisationsstörung -und wiederherstellung	173
10.2.16 Zusammenfassung	173
10.3 Einfacher Flutungsalgorithmus	174
10.3.1 Algorithmusparameter	174
10.3.2 Minimale topologische Metrik	175
10.3.3 Minimaler Synchronisationsschutzalgorithmus	175
10.3.4 Knotenrolle	176
10.3.5 Bestimmung der Taktqualität (Flutung)	176
10.3.6 Flutungsbestätigung (Aggregation)	177
10.3.7 Tokenerwerb	178
10.3.8 Alternativenbestimmung	179
10.3.9 Referenzselektion	181
10.3.10 Robustheit gegenüber Tokenverlust und -verdopplung	183
10.3.11 Korrektheit	184
10.3.12 Speicherplatzbedarf	184
10.3.13 Laufzeit	185
10.3.14 Einfluß der Inversionspfadlänge auf die Laufzeit	185
10.3.15 Veranschaulichung von Flutung und Aggregation	186
10.3.16 Zusammenfassung	187
10.4 Erweiterung des Flutungsalgorithmus	189
10.4.1 Inversionsverzögerung	189
10.4.2 Schnelle Terminierung der Inversion	191
10.4.3 Schnelle Änderung der Taktqualität	192
10.4.4 Parallele Inversion	196
10.4.5 Kreiserkennung	199
10.4.6 Optimierung der topologischen Metrik	202
10.4.7 Überspringen von Taktstoßstellen	206
10.4.8 Zusammenfassung	209
10.5 Erweiterter Flutungsalgorithmus	210
10.5.1 Konfigurationsparameter	210
10.5.2 Erweiterter Synchronisationsschutzalgorithmus	211
10.5.3 Bestimmung der Taktqualität (Flutung)	212
10.5.4 Tokenerwerb	213
10.5.5 Referenzselektion	215

INHALTSVERZEICHNIS

10.5.6 Zusammenfassung	217
10.6 Selbstkonfiguration der Taktverteilung	217
10.6.1 Erkennen existierender Konfigurationen	218
10.6.2 Einfache topologische Metrik	218
10.6.3 Erweiterte topologische Metrik	218
10.6.4 Fazit	219
10.7 Vergleich und Bewertung der Algorithmen	220
10.7.1 Gemeinsamkeiten der analysierten Verfahren	220
10.7.2 Analyse des aktuellen Stands der Technik	221
10.7.3 Einfluß von Verzögerungszählern und Hysteresen auf die Konvergenzzeit	223
10.7.4 Neuentwickelte Synchronisationsschutzverfahren	224
11 Zusammenfassung	225
11.1 Bedeutung von Schutzverfahren	225
11.2 Lösung inhärenter Problematiken von Schutzverfahren	226
11.3 Entwicklung anwendungsbezogener Metriken für Synchronisationstopologien	226
11.4 Neuentwickelte Schutzverfahren	227
11.5 Ausblick	228
11.6 Fazit	229
Literaturverzeichnis	230