

Zukunft der IP-Netze

Virtualisierte, software-definierte, intelligente
Systemlösungen und -anwendungen

DAS INHALTS- VERZEICHNIS

» Hier geht's
direkt
zum Buch

Inhalt

Vorwort	XV
1 Digitalisierung, Virtualisierung, Künstliche Intelligenz und die Quantenwelt	1
1.1 Die Digitalisierung der Welt	2
1.1.1 Die erste Digitalisierung	3
1.1.2 Die zweite Digitalisierung	8
1.1.3 Die dritte Digitalisierung	11
1.1.4 Vor und nach dem Internet-Zeitalter	13
1.1.5 Objekte im digitalen Raum (Cyberspace)	15
1.1.6 Interaktion des digitalen Raums mit der Wirklichkeit	18
1.1.7 Unternehmens- und Geschäftsprozesse im digitalen Raum	19
1.2 Die Virtualisierung der Welt	22
1.2.1 Virtuelle Welten im digitalen Raum	22
1.2.2 Interaktion mit der virtuellen Welt	24
1.2.3 Anreicherung der realen Welt durch Informationen aus dem digitalen Raum: Augmented Reality	25
1.2.4 Besitztum an digitalen Objekten: Cybercurrency und Non-Fungible Token (NFT)	28
1.3 Die Sache mit der „künstlichen Intelligenz“	35
1.3.1 Vereinfachtes Funktionsmodell von KI-Systemen	36
1.3.2 Entwicklung der KI-Systeme	39

1.3.3	Siri, das Fräulein vom Amt – ist heute unpässlich	44
1.3.4	Die virtuelle Welt träumt	45
1.3.5	Usability: KI-Agenten	47
1.3.6	Die Beherrscher der digitalen Welt	49
1.4	Die Eroberung der digitalen Welt durch Quantencomputer	51
1.4.1	Quantenmechanik und Quantenprozesse	53
1.4.2	Quantencomputer	58
1.4.3	Quanteninformationstheorie	63
1.5	Schlussbemerkungen	66
Teil 1	Die neuen Netzwerkprotokolle	71
2	VPLS – Virtual Private LAN Service	73
2.1	Grundlegende Idee von VPLS	74
2.2	Logisches Modell von MPLS	76
2.2.1	Ethernet over MPLS (EoMPLS).....	78
2.2.2	VPLS erbracht durch Vollvermaschung von VSIs	81
2.3	Basisfunktionen von VSIs	82
2.3.1	VPLS-Modell im Hinblick auf die VSI-Vernetzung	83
2.3.2	Information im PE über bereitgestellte VPLSs	85
2.3.3	Learning von MAC-Adressen aus Broadcast Frames	89
2.3.4	Learning von MAC-Adressen aus Unicast Frames	90
2.4	Skalierbarkeit des VPLS	91
2.4.1	Auto Discovery und VPLS Signaling	92
2.4.2	Bekanntgabe von Informationen über PW Labels	93
2.5	Hierarchical VPLS als Multi-Tenant VPLS	94
2.5.1	H-VPLS und VLANs – Bedeutung von VLAN Stacking	96
2.5.2	H-VPLS als Multi-Tenant-VPLS.....	97
2.6	Schlussbemerkungen	97
3	Network Functions Virtualisation	99
3.1	Die grundlegende Idee von NFV.....	100
3.1.1	Verteilte NFVI	102

3.1.2	Tunneling zwischen vSwitches nach NVGRE	104
3.1.3	Weg zur Verwirklichung von NFV	106
3.2	Systemkomponenten der NFV-Referenzarchitektur	107
3.2.1	Bedeutung der Orchestrierung	109
3.2.2	Network Services und Unternehmensprozesse	110
3.2.3	Bedeutung von NFV-MANO	111
3.3	Beispiele für Vernetzungen von VSIs	114
3.3.1	Arten der Vernetzung von VNFs	115
3.4	Orchestration und Management von VNFs	118
3.4.1	Network Service Lifecycle Management	120
3.5	Schlussbemerkungen	121
4	SFC – Service Function Chaining	123
4.1	Die Idee von SFC	124
4.1.1	Funktionelle Komponenten und Architektur von SFC	127
4.1.2	Grundlegende Aufgabe von SF Forwarding	128
4.2	Virtualisierung von Rechnern – die erste Säule von SFC.....	130
4.2.1	SF Forwarding innerhalb einer Virtualisierungsplattform	131
4.2.2	Virtual Overlay Networks – die zweite Säule von SFC	133
4.2.3	SF Forwarding zwischen Virtualisierungsplattformen	134
4.2.4	Tunneling-Konzepte für die Bildung von VONs mit SFs	135
4.2.5	Beispiel für den Einsatz von SFC	138
4.3	Network Service Header (NSH) – Struktur und Bedeutung	140
4.3.1	Network Service Header (NSH) mit MD-Type=0x1.....	142
4.3.2	Network Service Header (NSH) mit MD-Type=0x2.....	142
4.3.3	Network Service Header (NSH) – Wer macht was?	143
4.4	SFC-Topologie als SF-Graph	143
4.4.1	Raum mit den Koordinaten „Network Service“ und „Service Function“	144
4.4.2	Ermittlung der Lokation von SFs und der Transportart	145
4.5	NFV, SFC und SDN – ihre Gemeinsamkeiten	146
4.5.1	Umsetzung von SFC in der Praxis – ein mögliches Szenario	149
4.6	Schlussbemerkungen	149

- 5 SRv6 – IPv6 Segment Routing 151**
 - 5.1 Multiplane-Struktur von Netzen mit SRv6 152
 - 5.1.1 Hierarchie der Funktionen in IPv6-Netzen mit SRv6 153
 - 5.1.2 Bedeutung von SDN bei SRv6 154
 - 5.1.3 Analogie zwischen SRv6 und MPLS 155
 - 5.2 Grundlegende Eigenschaften des SRv6 156
 - 5.2.1 Arten von SRv6-Domains 158
 - 5.2.2 Operationen entlang eines SRv6-Path 160
 - 5.2.3 SRH im IPv6-Paket 161
 - 5.2.4 Übermittlung über einen SRv6-Path 164
 - 5.2.5 Verlauf der SRH-Analyse 165
 - 5.3 SRv6 Network Programming 167
 - 5.3.1 Struktur von SID bei SRv6-NP 168
 - 5.3.2 Remote Network Function Call bei SRv6-NP 169
 - 5.4 Kategorien von SRv6 Network Functions..... 171
 - 5.4.1 Nutzung von T.Insert und T.Encaps 173
 - 5.4.2 Nutzung von End und End.X 175
 - 5.4.3 Spezifikation einiger Endfunktionen 176
 - 5.4.4 Einsatz von End.DX4 und End.DX6..... 178
 - 5.5 Schlussbemerkungen 179

- Teil 2 Software Defined Networking..... 181**

- 6 SDN – Software Defined Networking 183**
 - 6.1 Quelle und Architektur von SDN 185
 - 6.1.1 Voraussetzung für Realisierung 187
 - 6.1.2 Allgemeine logische Architektur des SDN 188
 - 6.1.3 SDN-Architektur ohne Virtualisierung von Netzwerkressourcen .. 189
 - 6.1.4 SDN-Architektur mit Virtualisierung von Netzwerkressourcen..... 191
 - 6.1.5 SDN-Architektur der ONF 193
 - 6.2 Einsatz von SDN 194
 - 6.2.1 SDN in Datacentern 195
 - 6.2.2 Hierarchische SDN-Architektur 198
 - 6.2.3 Hierarchische Strukturen von SDN beim IoT 199
 - 6.2.4 Rekursiv-hierarchische SDN im IoT 200

6.3	Software Defined Optical Networking	203
6.3.1	OpenFlow-Switche und das OpenFlow Protocol	205
6.3.2	Aufbau und Funktionsweise eines OF-Switch.....	207
6.3.3	OF-Switch mit beispielhaftem Flow-Table Einsatz	208
6.3.4	OF-Switch-Funktionen bei einer einzigen Flow Table	212
6.4	SDN bei MPLS, GMPLS und SPB	217
6.4.1	Link Aggregation, Multiplexing und Multipathing beim SDN	219
6.4.2	Beispiele für Group-Table-basierte Funktionen	222
6.5	SDN, NFV und SRv6 Network Programming.....	223
6.5.1	SDN und SRv6 Network Programming	224
6.5.2	Symbiose von SDN mit NFV und SRv6-NP	225
6.5.3	Die Idee von vSDN.....	226
6.5.4	Bedeutung von SRv6-NP für vSDN	228
6.5.5	Fernaufrufe von VNFs bei SRv6-NP	229
6.5.6	Multi-Tenancy-Architektur von SDN.....	232
6.6	Software Defined Anything Networking	233
6.7	Schlussbemerkung.....	237
7	SD-IoT – Software Defined Internet of Things	239
7.1	Symbiose von IoT mit NFV und SDN	240
7.2	Funktionale Architektur von IoT	242
7.2.1	IoT-Definition aus funktionaler Sicht	243
7.2.2	Allgemeines Multilayer-Modell des IoT	243
7.2.3	Hierarchische SDN-Architektur beim IoT	245
7.3	Grundlegende Idee von SD-IoT	246
7.3.1	SD-IoT-Devices als virtuelle Rechner	246
7.3.2	Modelle zur Bereitstellung von SD-IoT-Services	247
7.3.3	Definition von SD-IoT.....	247
7.3.4	Grundlegende Reichweiten von SD-IoT	247
7.3.5	Control & Orchestration Level	248
7.3.6	Reichweiten von Systemlösungen für SD-IoT	248
7.3.7	Anschauliche Interpretation der Reichweite von SD-IoT	249
7.3.8	Controller in Edge und Fog Sublayers	249
7.3.9	Controller auf Fog und Clouds Sublayers.....	251

7.4	Entwicklung von SD-IoT-Systemen	253
7.4.1	Software Defined Smart Home	253
7.4.2	Software Defined City Park System	255
7.4.3	Proxy-basierte IoT-Services.....	257
7.4.4	Bedeutung des Network Hypervisor im IoT-Proxy-System	258
7.4.5	Proxy-basierte SD-IoT-Architektur	259
7.4.6	Besonderheiten von SDSHs	261
7.4.7	Proxy-basierte SDSH City Service	261
7.4.8	vSD-IoT versus Server mit VMs	263
7.5	Entwicklungsstadien des IoT	265
7.6	Schlussbemerkungen	266
8	SD-WAN – Software Defined Wide Area Network	267
8.1	Funktionale Anforderungen an ein WAN	268
8.1.1	Klassische Systemlösung für WAN-Dienste	270
8.1.2	Funktionale Bedeutung des SD-WAN	272
8.1.3	SD-WAN als Data Plane in logischer SDN-Architektur	274
8.1.4	Logische Struktur von SD-WANs	274
8.2	Vom Internet über LISP zum SD-WAN	276
8.2.1	DNS als Control Plane im herkömmlichen Internet.....	277
8.2.2	Definition von SD-WAN aus technischer Sicht	279
8.3	Grundgedanke von LISP	279
8.3.1	Logische Struktur des Internets mit LISP	280
8.3.2	Kommunikationsvarianten mit LISP	281
8.3.3	LISP-spezifische Kommunikation über ein SD-WAN	281
8.3.4	Übermittlung von IP-Paketen bei LISP	282
8.3.5	Bedeutung von RLOC und EID in Kurzfassung	284
8.3.6	LISP als Muster für das SD-WAN	284
8.3.7	Adressierung der IP-Pakete bei LISP als Schritt zum SD-WAN.....	286
8.3.8	Hybrides ERM-System in Kurzfassung	287
8.4	ERM-System als Vorbild für die Control Plane im SD-WAN	288
8.4.1	Einsatz von IPsec im SD-WAN	288
8.4.2	Datenübermittlung über das SD-WAN	291
8.5	Schlussbemerkungen	293

Teil 3	Das „Internet der Dinge“	295
9	6TiSCH-Netzwerke für Industrial IoT	297
9.1	6TiSCH-Netzwerke	298
9.2	Idee von TSCH	300
9.2.1	TSCH Schedule Matrix (TSM)	302
9.2.2	Multilayer-Protokollarchitektur	304
9.2.3	Spezifikation von Tracks	307
9.2.4	Funktionen von 6P	310
9.3	Kommunikation über TSCH Data Link	311
9.3.1	Struktur der 6P MAC-Frames	312
9.3.2	6P-Nachrichten	315
9.4	6P-Transactions	317
9.4.1	Hinzufügen von Zellen	318
9.4.2	Duplikate und abweichende Nachrichtenfolgen	322
9.5	Schlussbemerkungen	324
10	Digital Twins in IoT	327
10.1	Bedeutung digitaler Zwillinge	328
10.1.1	Services mit digitalen Zwillingen	330
10.1.2	Wissensbasis für digitale Zwillinge	333
10.1.3	Einsatz im Gesundheitswesen	333
10.2	Logisches Modell von Services mit DTs	335
10.2.1	Allgemeines Multilayer-Modell des IoT	337
10.2.2	Modell für den Einsatz von DTs im IoT	339
10.3	Virtuelle Sensoren und Aktuatoren	341
10.3.1	Überwachung der Gebäudesicherheit	341
10.3.2	Services in Smart Cities	343
10.3.3	Smartphone als Gesundheitsassistent	344
10.4	Digital Twin Federation	346
10.4.1	Verbund Ökosystem-relevanter Funktionen	347
10.4.2	Einsatzmöglichkeiten digitaler Zwillinge	348
10.5	Schlussbemerkungen	353

11 IIoT – Intelligent IoT	355
11.1 Allgemeine logische IoT-Architektur	357
11.1.1 Funktionelle Bereiche im IoT	359
11.2 Quellen der Intelligenz im IoT	361
11.2.1 Menschliche Kognition als Ideenquelle	363
11.2.2 Context-Aware Thinking/Computing	365
11.2.3 Modell der künstlichen Kognition	367
11.2.4 Kognitive Prozesse	368
11.3 Logische Multilayer-Architektur	370
11.3.1 Arten von Computing und Intelligenz	371
11.3.2 Support Computing for Distinguished Content Aware Computing (DCAC)	374
11.3.3 Support Computing for IoT	375
11.4 Dew Computing (DC)	377
11.4.1 Idee von Dew Computing	378
11.4.2 Dew Computing beim autonomen Fahren	378
11.5 Big Data im IoT	379
11.5.1 Big Data Attributes	380
11.5.2 ML-Techniken	381
11.6 Schwarmintelligenz im IIoT	382
11.6.1 Typische IIoT-Applikationen	383
11.7 Schlussbemerkung	384
12 Sicherer Einsatz und Betrieb des IoT	385
12.1 IoT-Hardware und IoT-Kommunikation	387
12.1.1 IoT-Kommunikationsprotokolle	389
12.1.2 Übertragung der IoT-Daten	391
12.1.3 RIOT als Betriebssystem	393
12.2 Sichere Datenübertragung bei CoAP	396
12.2.1 Das Arbeitsmodell von CoAP	397
12.2.2 Transportverschlüsselung bei CoAP mit DTLS	403
12.2.3 OSCORE für CoAP	411

12.3 Operationalisierung des IoT 421

 12.3.1 ToFU: Trust on First Use 423

 12.3.2 Bootstrapping Remote Secure Key Infrastructure 424

 12.3.3 SUIT – Software Update für das IoT 426

 12.3.4 Nummer 5 lebt!..... 430

12.4 Correctness – Die Mutter aller Sicherheit..... 433

 12.4.1 Code Correctness..... 435

 12.4.2 Data Correctness 438

 12.4.3 Verifiable Data Structures..... 440

12.5 Post-quantum Kryptographie beim IoT 444

 12.5.1 Klassische, pre-quantum Kryptographie 445

 12.5.2 Implementierungen der post-quantum Kryptographie 447

 12.5.3 Hybride Verfahren 449

12.6 Schlussbemerkungen 451

Abkürzungsverzeichnis 455

Abbildungsverzeichnis 461

Tabellenverzeichnis 469

Literaturverzeichnis 471

Stichwortverzeichnis 477