

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einführung 15**
 - 1.1 Neue Netzarchitekturen 15
 - 1.1.1 Die grundsätzlichen Funktionen 18
 - 1.1.2 Private Netze 23
 - 1.1.3 Öffentliche Netze 25
 - 1.2 Das klassische Internet 27
 - 1.2.1 Das Prinzip Routing 28
 - 1.2.2 Layer-2-Transportnetze 31
 - 1.2.3 Die Grenzen der klassischen Ansätze 45
 - 1.3 Neue Anforderungen 47
 - 1.3.1 Echtzeitkommunikation 48
 - 1.3.2 Große Datenmengen 52
 - 1.3.3 Internet of Things und Industrie 4.0 53
 - 1.3.4 Virtualisierung 54
 - 1.3.5 Server am Netz oder in der Cloud 55
 - 1.4 Treibende Kräfte für einen neuen Ansatz 60
 - 1.4.1 Ein schnelles Transportnetz 60
 - 1.4.2 Änderungen in den Verkehrseigenschaften 60
 - 1.4.3 Netzarchitekturen 61
 - 1.4.4 Ein neuer Ansatz 64
 - 1.5 Recursive InterNetwork Architecture 75
 - 1.5.1 Probleme mit der klassischen Architektur 76
 - 1.5.2 Der RINA-Ansatz 79
 - 1.6 Zusammenfassung 86
- 2 Verkehrseigenschaften 91**
 - 2.1 Theoretische Betrachtungen 91
 - 2.2 Modellierung 97
 - 2.2.1 Selbstähnlichkeit und Hurst-Parameter 120
 - 2.2.2 Ermittlung von λ und μ 123
 - 2.2.3 Fraktaleverteilung 131
 - 2.2.4 Systemauslastung in Abhängigkeit vom Hurst-Parameter 132

2.3	Echtzeitkommunikation in IP-Netzen	141
2.3.1	Mischung IP und Echtzeitkommunikation	141
2.3.2	Wartezeitsystem mit Verlust	142
2.3.3	Ideales und reales Verhalten der Netze	147
2.4	Beurteilung der Netzbelastung	149
2.4.1	Einfluss der Paketlänge	150
2.4.2	Paketlänge und Ankunftsrate λ	152
2.4.3	Warteschlangen	160
2.4.4	Traffic Shaping	166
2.4.5	Der Einfluss von Jumbo-Frames	171
2.4.6	Verkehrsmischungen	179
2.4.7	Credit-Based Shaping	186
2.5	Verkehrsmuster	191
2.5.1	Datenverkehr	197
2.5.2	QUIC	205
2.5.3	Streaming	209
2.5.4	Virtualisierung	211
2.5.5	Gaming	214
2.6	VoIP und Video	218
2.6.1	Voice over IP (VoIP)	218
2.6.2	Video-Anwendungen	220
2.7	Fazit	222
2.8	Das Internet der Dinge	223
2.8.1	IoT-Erfassungsgeräte am Netz	225
2.8.2	Schnittstellen für die Datenerfassung	227
2.8.3	Architekturen	233
2.8.4	IoT-Protokolle	236
2.9	Industrie 4.0	244
2.9.1	Architektur	244
2.9.2	Time-Sensitive Networking (TSN)	247
2.9.3	Verkehrseigenschaften in Industrie 4.0	264
2.10	Forderungen an zukünftige Netze	267
2.10.1	Die Verkehrsmischung	267
2.10.2	Einfache Architekturen	268
3	Software-defined Networking	271
3.1	Der prinzipielle Ansatz	271
3.1.1	Grundlagen	271
3.1.2	SDN-Schnittstellen	275
3.1.3	Grundsätzliche SDN-Arbeitsweise	280
3.1.4	Bearbeitung innerhalb der Netzelemente	287

3.2	Transport der Pakete	287
3.3	Definitionen der Flow Table	288
3.3.1	Beispiele für Abläufe im Switch	303
3.3.2	Unterstützung von Echtzeit-Übertragungen	313
3.4	Das OpenFlow-Protokoll	319
3.4.1	Verbindung zum Controller	319
3.4.2	Protokollabläufe	321
3.4.3	Die OpenFlow-Nachrichten	324
3.5	North-Interface	328
3.6	Topology Discovery	329
3.6.1	Der Rahmenaufbau	331
3.6.2	Die wichtigsten TLV-Parameter	332
3.6.3	Anwendung von LLDP in SDN	337
3.7	Der SDN-Controller	341
3.7.1	Abläufe im Controller	343
3.7.2	Verteilte Controller	345
3.7.3	Schnittstelle zur Controller-Zusammen-schaltung (SDNi)	346
3.7.4	Leistungsfähigkeit	349
3.8	Künstliche Intelligenz im Controller	350
3.9	Wide Area Networks (WAN)	353
3.9.1	Klassische WAN-Lösungen	354
3.9.2	SDN-Overlay-Netze	360
3.9.3	WAN-Zusammenfassung	368
3.10	Secure Access Service Edge (SASE)	371
3.11	Segment Routing	374
3.11.1	Grundsätzliche Arbeitsweise	378
3.11.2	Verkehrslenkung (Traffic Engineering)	380
3.11.3	Protokolle und Funktionen	381
4	Virtualisierung und Cloud-Anwendungen	387
4.1	Grundansatz der Virtualisierung	387
4.2	Cloud-Anwendungen	389
4.3	Data Center	393
4.3.1	Vernetzung im Data Center	394
4.3.2	Hierarchisches Netz	395
4.3.3	Anforderungen an ein Netz im Data Center	396
4.3.4	SDN im Data Center	400
4.4	Data Center in der Cloud	401
4.4.1	Anpassung der Leistungsfähigkeit	403
4.4.2	Auto-Scaling in der Cloud	404

- 4.4.3 Ermittlung der Dienstauslastung 409
 - 4.4.4 Ermittlung der Auslastung im SDN-Netz 410
 - 4.4.5 Anpassungsgeschwindigkeit 411
 - 4.4.6 Reale Systeme 414
- 4.5 SDN-Cloud-Anwendungen 419
- 4.6 Network Function Virtualization 422
 - 4.6.1 Der grundsätzliche Ansatz 422
 - 4.6.2 NFV-Architektur nach ETSI 423
 - 4.6.3 Virtualisierte Netzfunktionen 426
 - 4.6.4 Beispiel LTE und IMS 427
 - 4.6.5 Anpassung der bereitgestellten VM 437
 - 4.6.6 Beispiel Festnetz (NGN) 439
 - 4.6.7 Management und Orchestration 445
 - 4.6.8 Service Function Chaining (SFC) 448
- 4.7 Open Stack 450
- 4.8 Performance in virtuellen Systemen 450
- 5 Netzarchitekturen mit NFV und SDN 453**
 - 5.1 NFV und SDN ergänzen sich 453
 - 5.2 Eine Plattform für Netzbetreiber 454
 - 5.2.1 Beispiele für eine universelle Plattform 456
 - 5.2.2 Die Netzarchitektur 457
 - 5.2.3 Das Festnetz 458
 - 5.2.4 Mobilfunknetz 460
 - 5.2.5 WAN-Internet-Architekturen 465
 - 5.2.6 Der private Internetzugang 465
 - 5.2.7 Vernetzung im Business-Bereich 466
 - 5.3 5G-Netze 471
 - 5.3.1 5G-Netzarchitekturen 471
 - 5.3.2 Network Slicing 475
 - 5.3.3 Private 5G-Netze 481
 - 5.4 SDN-Privatnetze (SD-LAN) 487
 - 5.4.1 Die klassische LAN-Architektur 487
 - 5.4.2 Migration 489
 - 5.4.3 Vorteile der SDN-Architektur 490
 - 5.4.4 Standortübergreifende Vernetzung 491
 - 5.4.5 Vernetzung mit SD-WAN 492
 - 5.4.6 Energie sparen 495
 - 5.4.7 Security-Funktionen 498
 - 5.5 Eine einheitliche Plattform 501
 - 5.6 Erste Realisationen 504

- 6 SDN-Traffic Engineering 509**
 - 6.1 Grundlagen 509
 - 6.2 Neue Möglichkeiten im SDN 511
 - 6.2.1 Werkzeuge für das Traffic Engineering 511
 - 6.2.2 Call- und Admission Control 512
 - 6.3 Monitoring 514
 - 6.4 Wege durch das Netz 517
 - 6.4.1 Vergleich zum Routing 520
 - 6.4.2 Schnelle Netzanpassung 520
 - 6.4.3 Lastabhängige Verkehrslenkung 523
 - 6.4.4 Schrittweise Einführung neuer Vorgaben 524
 - 6.5 Dynamik der Steuerung 530
 - 6.5.1 Vordefinierte Verkehrsströme 530
 - 6.5.2 Session-based-Verkehrslenkung 532
 - 6.5.3 Session Handling im IMS und NGN 535
 - 6.5.4 Policy 536
 - 6.5.5 Auswirkungen auf die Performance 540
- Anhang 543**
 - Abkürzungen 543
 - Quellen und Literatur 548
 - Stichwortverzeichnis 559