
Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	V
Vorwort	VII
1 Einführung	1
1.1 Neue Netzarchitekturen	1
1.1.1 Die grundsätzlichen Funktionen	4
1.1.2 Private Netze	9
1.1.3 Öffentliche Netze	11
1.2 Das klassische Internet	13
1.2.1 Das Prinzip Routing	14
1.2.2 Layer-2-Transportnetze	17
1.2.3 Die Grenzen der klassischen Ansätze	29
1.3 Neue Anforderungen	31
1.3.1 Echtzeitkommunikation	31
1.3.2 Big Data	36
1.3.3 Internet of Things und Industrie 4.0	37
1.3.4 Virtualisierung	38
1.3.5 Server am Netz oder in der Cloud	39
1.4 Treibende Kräfte für einen neuen Ansatz	44
1.4.1 Ein schnelles Transportnetz	44
1.4.2 Änderungen in den Verkehrseigenschaften	44
1.4.3 Netzarchitekturen	45
1.4.4 Ein neuer Ansatz	48
2 Verkehrseigenschaften	55
2.1 Theoretische Betrachtungen	55
2.2 Modellierung	61
2.2.1 Selbstähnlichkeit und Hurst-Parameter	82
2.2.2 Ermittlung von λ und μ	85

2.2.3	Fraktaleverteilung	91
2.2.4	Systemauslastung in Abhängigkeit vom Hurst-Parameter	92
2.3	Echtzeitkommunikation in IP-Netzen	95
2.3.1	Mischung IP und Echtzeitkommunikation	95
2.3.2	Wartezeitsystem mit Verlust	96
2.3.3	Ideales und reales Verhalten der Netze	101
2.4	Beurteilung der Netzbelastung	103
2.4.1	Einfluss der Paketlänge	104
2.4.2	Paketlänge und Ankunftsrate λ	106
2.4.3	Warteschlangen	113
2.4.4	Traffic Shaping	119
2.4.5	Der Einfluss von Jumbo-Paketen	124
2.4.6	Verkehrsmischungen	132
2.4.7	Credit-Based Shaping	139
2.5	Neue Anforderungen	144
2.5.1	Datenverkehr	150
2.5.2	Streaming	159
2.5.3	Virtualisierung	161
2.5.4	Gaming	164
2.6	VoIP und Video	168
2.6.1	Voice over IP (VoIP)	168
2.6.2	Video-Anwendungen	170
2.7	Das Internet der Dinge	172
2.7.1	IoT-Erfassungsgeräte am Netz	174
2.7.2	Schnittstellen für die Datenerfassung	176
2.7.3	Architekturen	182
2.7.4	IoT-Protokolle	185
2.8	Industrie 4.0	193
2.8.1	Architektur	193
2.8.2	Time Sensitive Networks (TSN)	194
2.9	Forderungen an zukünftige Netze	200
2.9.1	Die Verkehrsmischung	200
2.9.2	Einfache Architekturen	201
3	Software-defined Networking	203
3.1	Der prinzipielle Ansatz	203
3.1.1	Grundlagen	203
3.1.2	SDN-Schnittstellen	207
3.1.3	Grundsätzliche SDN-Arbeitsweise	212
3.1.4	Bearbeitung innerhalb der Netzelemente	219

3.2	Transport der Pakete	219
3.3	Definitionen der Flow Table	220
3.3.1	Beispiele für Abläufe im Switch	235
3.4	Das OpenFlow-Protokoll	245
3.4.1	Verbindung zum Controller	245
3.4.2	Protokollabläufe	247
3.4.3	Die OpenFlow-Nachrichten	250
3.5	North-Interface	254
3.6	Topology Discovery	255
3.6.1	Der Rahmenaufbau	257
3.6.2	Die wichtigsten TLV-Parameter	258
3.6.3	Anwendung von LLDP in SDN	263
3.7	Der SDN-Controller	267
3.7.1	Abläufe im Controller	269
3.7.2	Verteilte Controller	271
3.7.3	Schnittstelle zur Controller-Zusammenschaltung (SDNi)	272
3.7.4	Leistungsfähigkeit	275
3.8	SDN-Overlay-Netze	276
3.8.1	Standortübergreifende Tunnel	276
3.8.2	Hypervisor-Based Overlay	278
3.8.3	VxLAN	279
3.8.4	VxLAN mit SDN	281
4	Virtualisierung und Cloud-Anwendungen	283
4.1	Grundansatz der Virtualisierung	283
4.2	Cloud-Anwendungen	285
4.3	Data Center	289
4.3.1	Vernetzung im Data Center	290
4.3.2	Hierarchisches Netz	291
4.3.3	Anforderungen an ein Netz im Data Center	292
4.3.4	SDN im Data Center	296
4.4	Data Center in der Cloud	297
4.4.1	Anpassung der Leistungsfähigkeit	299
4.4.2	Auto-Scaling in der Cloud	300
4.4.3	Ermittlung der Dienstauslastung	305
4.4.4	Ermittlung der Auslastung im SDN-Netz	306
4.4.5	Anpassungsgeschwindigkeit	307
4.4.6	Reale Systeme	310
4.5	SDN-Cloud-Anwendungen	315

4.6	Network Function Virtualization	318
4.6.1	Der grundsätzliche Ansatz	318
4.6.2	NFV-Architektur nach ETSI	319
4.6.3	Virtualisierte Netzfunktionen	322
4.6.4	Beispiel LTE und IMS	323
4.6.5	Anpassung der bereitgestellten VM	333
4.6.6	Beispiel Festnetz (NGN)	335
4.6.7	Management und Orchestration	341
4.6.8	Service Function Chaining (SFC)	344
4.7	Open Stack	346
4.8	Performance in virtuellen Systemen	346
5	Netzarchitekturen mit NFV und SDN	349
5.1	NFV und SDN ergänzen sich	349
5.2	Eine Plattform für Netzbetreiber	350
5.2.1	Beispiele für eine universelle Plattform	352
5.2.2	Die Netzarchitektur	353
5.2.3	Das Festnetz	354
5.2.4	Mobilfunknetz	356
5.2.5	WAN-Internet-Architekturen	362
5.2.6	Der private Internetzugang	362
5.2.7	Vernetzung im Business-Bereich	363
5.3	SDN-Privatnetze (SD-LAN)	368
5.3.1	Die klassische LAN-Architektur	368
5.3.2	Migration	370
5.3.3	Vorteile der SDN-Architektur	371
5.3.4	Standortübergreifende Vernetzung	372
5.3.5	Vernetzung mit SD-WAN	373
5.3.6	Energie sparen	375
5.3.7	Security-Funktionen	377
5.4	Eine einheitliche Plattform	380
5.5	Erste Realisationen	383
6	Traffic Engineering	387
6.1	Grundlagen	387
6.2	Neue Möglichkeiten im SDN	389
6.2.1	Werkzeuge für das Traffic Engineering	389
6.2.2	Call- und Admission Control	390
6.3	Monitoring	392
6.4	Wege durch das Netz	395
6.4.1	Vergleich zum Routing	398

6.4.2	Schnelle Netzanpassung	398
6.4.3	Lastabhängige Verkehrslenkung	401
6.4.4	Schrittweise Einführung neuer Vorgaben	402
6.5	Dynamik der Steuerung	408
6.5.1	Vordefinierte Verkehrsströme	408
6.5.2	Session-based-Verkehrslenkung	410
6.5.3	Session Handling im IMS und NGN	413
6.5.4	Policy	414
6.5.5	Auswirkungen auf die Performance	418
7	TeraStream	421
7.1	Der Weg zum TeraStream	421
7.2	Die Netzstruktur	423
7.3	Adressierung im TeraStream-Netz	426
7.4	Zugang zum TeraStream-Netz	428
7.4.1	Multi-Service Access Node (MSAN)	429
7.4.2	DSL-Hybrid-Anschlüsse	433
7.4.3	Optical Line Termination (OLT)	434
7.4.4	Layer-2-Switch, Layer-2-Aggregation	436
7.4.5	Access für die Mobilnetze	437
7.5	Die R1-Router	438
7.5.1	Schnittstellen	438
7.5.2	Die optische Verbindung der R1-Systeme	439
7.6	Das Backbone-Netz	442
7.6.1	Performance-Betrachtungen	444
7.6.2	Data Center	445
7.6.3	Beispiele für Festverbindungen	448
7.7	Betrieb und Verwaltung	450
7.7.1	Operational Support System (OSS)	450
7.7.2	Bereitstellung (Provisioning)	451
7.8	Internationale Vernetzung	453
Anhang		455
	Abkürzungen	455
	Quellen und Literatur	459