

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>15</b>
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
<b>2</b>	<b>Verkehrseigenschaften</b>	<b>91</b>
2.1	Theoretische Betrachtungen	91
2.2	Modellierung	97
2.2.1	Selbstähnlichkeit und Hurst-Parameter	120
2.2.2	Ermittlung von $\lambda$ und $\mu$	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 $\lambda$	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
<b>3</b>	<b>Software-defined Networking</b>	<b>271</b>
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
<b>4</b>	<b>Virtualisierung und Cloud-Anwendungen</b>	<b>387</b>
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
<b>5</b>	<b>Netzarchitekturen mit NFV und SDN</b>	<b>453</b>
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

---

<b>6</b>	<b>SDN-Traffic Engineering</b>	<b>509</b>
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
<b>Anhang</b>		<b>543</b>
	Abkürzungen	543
	Quellen und Literatur	548
	Stichwortverzeichnis	559