

18 Networking-Trends

Die wichtigsten Meilensteine der Internet-Entwicklung bis Ende 2014, d.h. bis zum Zeitpunkt der Erstellung der 3. Auflage dieses Buches, präsentiert der damals verfasste Abschnitt 1.1.4. In darauffolgenden vier Jahren haben sich bedeutende Entwicklungstrends auf dem Gebiet Networking, auf dem das Protokoll IP in beiden Versionen 4 und 6 eine fundamentale Rolle spielt, herauskristallisiert. Das Ziel dieses Abschnittes ist es, die aktuellen, in Abb. 18.0-1 dargestellten 'Top 10 Networking Trends' näher zu erläutern.

Networking Trends 2022 im Überblick

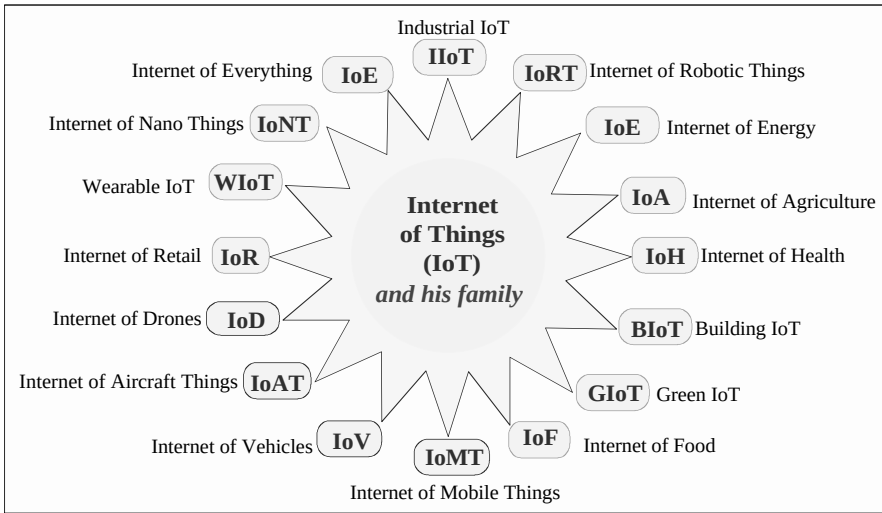


Abb. 18.0-1: Internet, Internet of Things und andere IP-Netze; Top 10 Networking Trends

Die aktuellen 'Top 10 Networking Trends' wollen wir nun abschließend kurz beleuchten. Da diese Entwicklungen sich derzeit im Fluss befinden, können die Resultate daher nicht in der notwendigen fachlichen Durchdringung dargestellt werden. Allerdings kann sich jeder Leser mittels der angegebenen Quellen ein Bild des aktuellen Standes bilden, wobei natürlich auch dann im Verborgenen bleibt, welche der aufgezeigten Tendenzen tatsächlich eingesetzt werden.

18.1 Internet of Things (IoT)

IoT-Familie

Das Spektrum von Einsatzmöglichkeiten des IoT ist so groß, dass zwischen diversen Arten des IoT zu unterscheiden ist. Es kann in diesem Zusammenhang sogar von einer IoT-Familie gesprochen werden. Abb. 18.1-1 präsentiert die Mitglieder dieser Familie mit teilweise überlappenden Nutzungsmöglichkeiten.

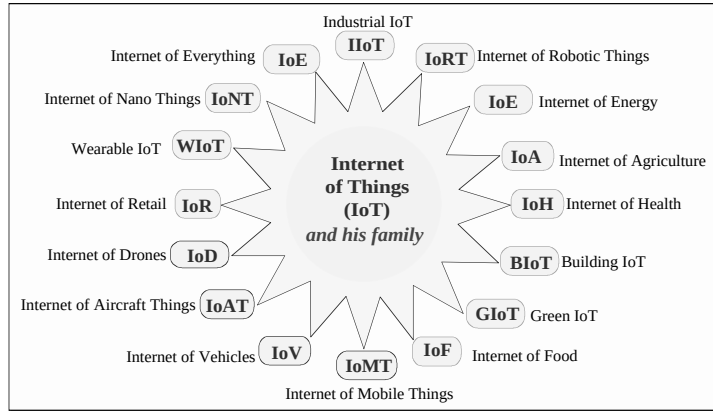


Abb. 18.1-1: Spezialisierte IoT-Varianten als Mitglieder der IoT-Familie

IoT-betreffende
Networking
Trends

Die Integration verschiedener allgegenwärtiger, zu unserem Alltag gehörender Dinge (*Things*) in das Internet führt zur Entstehung einer besonderen Internet-Erweiterung. Diese wird als *Internet of Things* (IoT) bzw. als *Internet der Dinge* bezeichnet. Das Konzept von IoT und seine Protokolle präsentiert Kapitel 17. An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, und dies geht aus Abb. 1.1-6 hervor, dass diverse Networking Trends auf eine Art mit dem IoT zusammenhängen und folglich auch seine weiteren Entwicklungen im gewissen Grade beeinflussen. Die folgenden Trends in der Weiterentwicklung von IoT sind hervorzuheben: *Industrial IoT* (IIoT), *Internet of Robotic Things* (IoRT), *Internet of Vehicles* (IoV), *Internet of Drones* (IoD), *Mobility in IoT* und *IoT Security*. Für Näheres darüber siehe:

- 1.a i-SCOOP: The Internet of Things (IoT) – essential IoT business guide
- 1.b i-SCOOP: Blockchain and the Internet of Things: the IoT blockchain opportunity and challenge
- 1.c Jorge Granjal, Edmundo Monteiro, Jorge Sá Silva: Security for the Internet of Things: A Survey of Existing Protocols and Open Research Issues; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 17(3), Jul 2015; DOI: 10.1109/COMST.2015.2388550
- 1.c Misty Blowers, Jose Iribarne, Edward Colbert, Alexander Kott: The Future Internet of Things and Security of its Control Systems; arXiv:1610.01953v1; Oct 2016
- 1.d P.P. Ray: A survey on Internet of Things architectures; Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences; Vol. 30 (3), Jul 2018, DOI: 10.1016/j.jksuci.2016.10.003

- 1.e Onoriode Uviase, Gerald Kotonya: IoT Architectural Framework: Connection and Integration Framework for IoT Systems; arXiv:1803.04780v1, 2018, DOI: 10.4204/EPTCS.264.1
- 1.f Alem Čolaković, Mesud Hadžialić: Internet of Things (IoT): A Review of Enabling Technologies, Challenges, and Open Research Issues; *Computer Networks*, Vol. 144, Oct 2018; DOI: 10.1016/j.comnet.2018.07.017

18.1.1 Industrial Internet of Things (IIoT)

Das IoT hat eine enorme Bedeutung für die Industrie, denn Dank ihm – insbesondere der Nutzung von Sensordaten und der M2M-Kommunikation (M2M: *Machine to Machine*) –, kann die Effizienz von Maschinen und Automaten verbessert werden. Die M2M-Kommunikation stellt hohe QoS-Anforderungen (QoS: *Quality of Service*) an die industriellen Netzwerke und folglich an das IoT. Zu ihrer Erfüllung ist eine besondere Realisierung des IoT erforderlich. Diese an die industriellen Anforderungen angepasste Art von IoT wird als IIoT (*Industrial IoT*) bezeichnet. Für Näheres über IIoT siehe: [1.1.a], [1.1.c] und [1.1.h].

IoT als Basis für
M2M-
Kommunikation

Um hohe QoS-Anforderungen erfüllen zu können, müssen für das IIoT spezielle Netzwerke eingerichtet werden. Zu deren Aufbau wurde das Verfahren TSCH (*Time-Slotted Channel Hopping*) konzipiert. Es stellt eine spezielle zeitsynchrone Realisierung des MAC-Protokolls (*Media Access Control*) zum Aufbau drahtloser industrieller Netzwerke dar. Bei TSCH handelt sich um eine Kombination des Frequenzmultiplexes und des synchronen Zeitmultiplexes, also um eine Variante des Frequenz- und Zeitmultiplexverfahrens FTDM (*Frequency-Time Division Multiplexing*). Die auf TSCH basierenden Netzwerke ermöglichen es im industriellen Bereich, das *Deterministic Networking* zu realisieren. Für weitere Informationen über IIoT und TSCH sei verwiesen auf:

IIoT und TSCH

- 1.1.a i-SCOOP: The Industrial Internet of Things (IIoT): the business guide to Industrial IoT
- 1.1.b i-SCOOP: IT and OT convergence – two worlds converging in Industrial IoT
- 1.1.c Li Da Xu, Wu He, Shancang Li: Internet of Things in Industries: A Survey; *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10(4), Nov 2014; DOI: 10.1109/TII.2014.2300753
- 1.1.c Martin Wollschlaeger, Thilo Sauter, Jürgen Jasperneite: The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0; *IEEE Electronics Magazine*, Mar 2017
- 1.1.d Anatol Badach: TSCH – Time-Slotted Channel Hopping; In book: *Protokolle und Dienste der Informationstechnologie*; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Jan 2018
- 1.1.f Jiangfeng Cheng, Weihai Chen, Fei Tao, Chun-Liang Lin: Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing; *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 10, Jun 2018, DOI: 10.1016/j.jii.2018.04.001

- 1.1.g Emiliano Sisinni, Abusayeed Saifullah, Song Han, Ulf Jennehag, Mikael Gidlund: Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions; IEEE Transactions on Industrial Informatics (Early Access), Jul 2018; DOI: 10.1109/TII.2018.2852491
- 1.1.h Hugh Boyes, Bil Hallaq, Joe Cunningham, Tim Watson: The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework; Computers in Industry, Vol. 101, Oct 2018; DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.015
- 1.1.i Cristina Paniagua, Jerker Delsing: Industrial Frameworks for Internet of Things: A Survey; IEEE Systems Journal, Vol. 15, Issue 1, Mar 2021; DOI: 10.1109/JSYST.2020.2993323
- 1.1.j Yulei Wu, Hong-Ning Dai, Haozhe Wang, Zehui Xiong, Song Guo: A Survey of Intelligent Network Slicing Management for Industrial IoT: Integrated Approaches for Smart Transportation, Smart Energy, and Smart Factory; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 24, Issue 2, Mar 2022; DOI: 10.1109/COMST.2022.3158270

18.1.2 Internet of Robotic Things

Verteilte
Robotersysteme

Dank der modernsten Technologien werden vor allem in der Industrie und auch anderswo, immer mehr Roboter eingesetzt. Sie werden auch auf eine spezielle Art und Weise in das IoT integriert, und dies führt zur Entstehung einer besonderen IoT-Art, die als *Internet of Robotic Things* (IoRT) bezeichnet wird. Mit dem IoRT wird das Ziel verfolgt, sowohl diverse Roboter untereinander als auch weit im IoT verbreitete Sensoren und als Aktuatoren bezeichnete intelligente Antriebs Elemente mit autonomen Robotern zu vernetzen. Diese Vernetzung bedeutet eine Verschmelzung von Robotik- und IoT-Technologien und ermöglicht, die IoT-Services um die Fähigkeiten intelligenter Robotersysteme zu erweitern. Dadurch kann ein neues breites Spektrum von IoRT-basierten Services angeboten werden. Für Näheres über IoRT siehe:

- 1.2.a Partha Pratim Ray: Internet of Robotic Things: Concept, Technologies, and Challenges; IEEE Access, Vol. 4, 2016; DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2647747
- 1.2.b Cristanel Razafimandimby, Valeria Loscri, Anna Maria Veg: Towards Efficient Deployment in Internet of Robotic Things; In book: Gravina R., et al. (Eds) 'Integration, Interconnection, and Interoperability of IoT Systems. Internet of Things (Technology, Communications and Computing)'. Springer, Jul 2017; DOI: 10.1007/978-3-319-61300-0_2
- 1.2.c Pieter Simoens, Mauro Dragone, Alessandro Saffiotti: The Internet of Robotic Things: A review of concept, added value and applications; International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 15(1), Jan - Feb 2018; DOI: 10.1177/1729881418759424
- 1.2.d Ovidiu Vermesan, Roy Bahr, Marco Ottella, Martin Serrano, at al: Internet of Robotic Things Intelligent Connectivity and Platforms; Frontiers in Robotics and AI, Sep 2020; DOI: 10.3389/frobt.2020.00104

- 1.2.e Davide Villa, Xinchao Song, Matthew Heim, Liangshe Li: Internet of Robotic Things: Current Technologies, Applications, Challenges and Future Directions; arXiv:2101.06256v1, Jan 2021; DOI: 10.48550/arXiv.2101.06256
- 1.2.f Aqsa Sayeed, Chaman Verma, Neerendra Kumar, Neha Koul, Zoltán Illés: Approaches and Challenges in Internet of Robotic Things; Future Internet, Vol. 14. Issue 9, Sep 2022; DOI:10.3390/fi14090265

18.1.3 Internet of Vehicles

Zur Unterstützung autonom fahrender Fahrzeuge mithilfe von IoT müssen im IoT verschiedene zeitkritische Services realisiert werden. Die Unterstützung des autonomen Fahrens führt daher zur Entstehung einer besonderen, als *Internet of Vehicles* (IoV) bezeichneten Variante von IoT. Dabei kann Fog Computing [Abschnitt 17.1] als Basis für das IoV angesehen werden. Im IoV sollen verschiedene Arten der drahtlosen Vernetzung von autonom fahrenden Fahrzeugen realisiert werden, insbesondere:

Voraussetzung
des autonomen
Fahrens

- *Vehicle-to-Vehicle*: Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ermöglicht, dass autonom fahrende, benachbarte Fahrzeuge untereinander kommunizieren und sich damit z.B. über den Straßenzustand informieren können. V2V
- *Vehicle-to-Infrastructure*: Mittels Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation können autonom fahrende Fahrzeuge auf straßenseitige Infrastrukturelemente (z.B. entlang von Straßen installierte Verkehrsleitsysteme) wie z.B. Ampeln und andere Verkehrszeichen aufmerksam gemacht werden. Hiermit kann die Verkehrssicherheit verbessert werden. V2I
- *Vehicle-to-Pedestrian*: Fahrzeug-zu-Fußgänger-Kommunikation kann als präventive Maßnahme betrachtet werden, dank dieser ein autonom fahrendes Fahrzeug Fußgänger und Radfahrer erkennen kann, um folglich eine potenzielle Kollision zu verhindern und Schaden von den Verkehrsteilnehmern abzuwenden. V2P
- *Vehicle-to-Network*: Fahrzeug-zu-Netzwerk-Kommunikation erlaubt z.B. über Mobilfunk Verbindungen mit großer Reichweite zwischen Fahrzeug und Netzwerk, um z.B. einen Cloud-Zugang aufbauen zu können. V2N

Für weitere Informationen über IoV siehe:

- 1.3.a Yang Fangchun, Wang Shangguang, Li Jinglin, Liu Zhihan, Sun Qibo: An Overview of Internet of Vehicles; China Communications, Oct 2014
- 1.3.b Kang Kai, Wang Cong and Luo Tao: Fog Computing for Vehicular AdHoc Networks: Paradigms, Scenarios, and Issues; The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Vol. 23(2), Apr 2016; DOI 10.1016/S1005-8885(16)60021-3
- 1.3.c Omprakash Kaiwartya, et al.: Internet of Vehicles: Motivation, Layered Architecture, Network Model, Challenges, and Future Aspects; IEEE Access, Vol. 4, Sep 2016; DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2603219
- 1.3.f Juan Contreras, Sherali Zeadally, Juan Antonio Guerrero-Ibanez: Internet of Vehicles: Architecture, Protocols and Security; IEEE Internet of Things Journal (Early Access), Apr 2017; DOI: 10.1109/JIOT.2017.2690902

- 1.3.g Fangchun Yang, Jinglin Li, Tao Lei, Shangguang Wang: Architecture and key technologies for Internet of Vehicles: a survey; *Networks*, Vol. 2(2), Jun 2017; DOI: 10.1007/s41650-017-0018-6
- 1.3.h Eugen Borcoci, Serban Obreja, Marius Vochin: Internet of Vehicles Functional Architectures-Comparative Critical Study, *The Ninth International Conference on Advances in Future Internet AFIN*, Sep 2017
- 1.3.i Min Chen, Yuanwen Tian, Giancarlo Fortino, Jing Zhang, Iztok Humar: Cognitive Internet of Vehicles, *Computer Communications*; Vol. 120, May 2018; DOI: 10.1016/j.comcom.2018.02.006

18.1.4 Internet of Drones

Kommunikation
der UAVs

Die Drohnen, unbemannte und kurz als UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*) bezeichnete Luftfahrzeuge, gewinnen immer mehr an Bedeutung. Sie können ohne eine an Bord befindliche menschliche Besatzung selbständig durch einen Computer oder vom Boden über eine Fernsteuerung navigiert und für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Aus diesem Grund werden Drohnen als mobile Objekte in das Internet, insbesondere in das IoT, integriert. Dadurch entsteht eine besondere Art von IoT, und man nennt diese *Internet of Drones* (IoD). Als Literatur über IoD siehe:

- 1.4.a Ilker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, Samil Temel: Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey; Vol. 11(3), May 2013; DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004
- 1.4.b Ozgur Koray Sahingoz: Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges; *J. Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 74 (1), Apr 2014; DOI 10.1007/s10846-013-9959-7
- 1.4.c Naser Hossein Motlagh, Tarik Taleb, Osama Arouk: Low-Altitude Un-manned Aerial Vehicles-Based Internet of Things Services: Comprehensive Survey and Future Perspectives; *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3(6), Dec 2016; DOI: 10.1109/JIOT.2016.2612119
- 1.4.d Armir Bujari, et al.: Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models; *International Journal of Distributed Sensor Networks*; Vol. 13(10), 2017; DOI: 10.1177/1550147717738192
- 1.4.e Mariana Rodrigues, et al.: UAV Integration Into IoIT: Opportunities and Challenges; *ICAS 2017: The Thirteenth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*, May 2017
- 1.4.f Muhammad Asghar Khan, Ijaz Mansoor Qureshi, Engr Alamgir Safi, Inam Ullah Khan: Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review of Communication architectures, and Routing protocols; *First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (Intellect 2017)*; Nov 2017; DOI: 10.1109/INTELLECT.2017.8277614
- 1.4.g Weisen Shi, et al.: Drone Assisted Vehicular Networks: Architecture, Challenges and Opportunities; *IEEE Network*, Vol.32(3), May/June 2018; DOI: 10.1109/MNET.2017.1700206

- 1.4.h Gaurav Choudhary, Vishal Sharma, Takshi Gupta, Jiyouon Kim, Ilsun You: Internet of Drones (IoD): Threats, Vulnerability, and Security Perspectives; arXiv:1808.00203v2, Aug 2018
- 1.4.i Mohammad Wazid, Ashok Kumar Das, Jong Hyouk Lee: Authentication protocols for the internet of drones: taxonomy, analysis and future directions; Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing; Aug 2018; DOI: 10.1007/s12652-018-1006-x

18.1.5 Mobility in IoT

An das IoT wird u.a. eine breite Palette von mobilen *Sensoren*, *Aktuatoren* und mobile virtualisierte Rechner in Form von VMs (*Virtual Machines*) angebunden. Diese können z.B. in selbstfahrenden Autos, in Drohnen bzw. in anderen UAVs installiert sein. Mit mobilen VMs am IoT-Rande (IoT Edge) werden verschiedene mobile Services erbracht, sodass man von *Mobile Edge Computing* (MEC) spricht. Mobile VMs können aber auch als mobile Fog Nodes fungieren [Abschnitt 17.1]. Dies deutet darauf hin, dass die Unterstützung der Mobilität im IoT (Mobility in IoT) von enorm großer Bedeutung ist. Für Näheres über Mobilität im IoT sei verwiesen auf:

Mobile Edge
Computing

- 1.5.a Rodrigo Roman, Javier Lopez, Masahiro Mambo: Mobile edge computing, Fog et al.: A survey and analysis of security threats and challenges; arXiv:1602.00484v2, Nov 2016; DOI: 10.1016/j.future.2016.11.009
- 1.5.b Safwan M. Ghaleb, et al.: Mobility management for IoT: a survey; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Dec 2016; DOI 10.1186/s13638-016-0659-4
- 1.5.c Jabiry M. Mohammed, Bi-Lynn Ong, R. Badlishan Ahmad, Mohammed Hakawati: Internet of Things (IoT) Mobility Support based on distributed Sensor Proxy MIPv6; Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 95(17), Sept. 2017
- 1.5.d Tuan Nguyen gia, et al.: Fog Computing Approach for Mobility Support in Internet-of-Things Systems; IEEE Access PP(99):1-1; Jun 2018, DOI:10.1109/ACCESS.2018.2848119

18.1.6 IoT Security

Mit IoT soll die Vision verwirklicht werden, unsere Alltagseinrichtungen unterschiedlicher Art und mit unterschiedlichen Fähigkeiten sowohl untereinander als auch mit Rechnern am Internet so zu vernetzen, dass sie alle Internet-Services nutzen können. Mit der Verwirklichung dieser Vision entstehen verschiedene potenzielle Sicherheitsbedrohungen, dabei aber auch solche, die wir heute noch nicht kennen.

Um die IoT-Sicherheit möglichst auf einem hohen Niveau zu gewährleisten, sind klassische Ansätze nicht mehr ausreichend. Hierfür ist zurzeit noch ein breites Spektrum von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten erforderlich. Vor allem müssen unsere

Klassische
IT-Security
reicht nicht aus

Alltagseinrichtungen am IoT eine besondere sicherheitsrelevante Intelligenz besitzen, also sicherheitsbewusst (*security aware*) sein. Für Näheres über IoT-Sicherheit siehe:

- 1.6.a T. Heer, et al.: Security Challenges in the IP-based Internet of Things, *Wireless Personal Communications*; Vol. 61(3), Dec 2011; DOI: 10.1007/s11277-011-0385-5
- 1.6.b Sabrina Sicari, et al.: Security, Privacy & Trust in Internet of Things: The road ahead; *Computer Networks* Vol. 76, Jan 2015; DOI: 10.1016/j.comnet.2014.11.008
- 1.6.c Jorge Granjal, Edmundo Monteiro, Jorge Sá Silva: Security for the Internet of Things: A Survey of Existing Protocols and Open Research Issues; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 17(3), Jul 2015; DOI: 10.1109/COMST.2015.2388550
- 1.6.e M. A. Ferrag, L. A. Maglaras, H. Janicke, J. Jiang: Authentication Protocols for Internet of Things: A Comprehensive Survey, arXiv, Dec 2016
- 1.6.e Rodrigo Roman, Javier Lopez, Masahiro Mambo: Mobile edge computing, Fog et al.: A survey and analysis of security threats and challenges; arXiv:1602.00484v2, Nov 2016; DOI: 10.1016/j.future.2016.11.009
- 1.6.e Shancang Li, Li Da Xu, Imed Romdhani (Contributor): *Securing the Internet of Things*: 2017 Elsevier Inc.; ISBN: 978-0-12-804458-2
- 1.6.f Xiruo Liu, Meiyuan Zhao, Sugang Li, Feixiong Zhang, Wade Trappe: A Security Framework for the Internet of Things in the Future Internet Architecture; *Future Internet*, Vol. 9(3), 2017; DOI: 10.3390/fi9030027
- 1.6.g B. B. Zarpelão, R. S. Miani, C. T. Kawakani and S. C. de Alvarenga: A Survey of Intrusion Detection in Internet of Things, *Journal of Network and Computer Applications*; Vol. 84, Apr 2017; DOI: 10.1016/j.jnca.2017.02.009
- 1.6.h Pooja, Dr. R. K. Chauhan: Review on Security Attacks and Countermeasures in Wireless Sensor Networks; *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, Vol. 8(5), May-Jun 2017
- 1.6.i Chao Lin, et al.: Security and Privacy for the Internet of Drones: Challenges and Solutions; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 56(1), Jan 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700390
- 1.6.j Djedjig Nabil, D. Tandjaoui, Imed Romdhani, Faiza Medjek: Trust Management in Internet of Things; In book: *Security and Privacy in Smart Sensor Networks*; May 2018; DOI: 10.4018/978-1-5225-5736-4.ch007
- 1.6.k Francesco Restuccia, Salvatore D'Oro, Tommaso Melodia: Securing the Internet of Things in the Age of Machine Learning and Software-defined Networking; *IEEE Internet of Things Journal (Early Access)*, Jun 2018; DOI: 10.1109/JIOT.2018.2846040
- 1.6.l Djamel Eddine Kouicem, Abdelmadjid Bouabdallah, Hicham Lakhlef: Internet of things security: A top-down survey; *Computer Networks*, Vol. 141, Aug 2018; DOI: 10.1016/j.comnet.2018.03.012
- 1.6.m Shui Yu, Guojun Wang, Xiting Liu, Jianwei Niu: Security and Privacy in the Age of the Smart Internet of Things: An Overview from a Networking

- Perspective; IEEE Communications Magazine, Vol. 56(9), Sep 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2018.1701204
- 1.6.n RFC 8576: Internet of Things (IoT) Security: State of the Art and Challenges; Apr 2019
- 1.6.o Jian Zhang, Huajian Chen, Liangyi Gong, Jing Cao, Zhaojun Gu: The Current Research of IoT Security, IEEE Fourth International Conference on Data Science in Cyberspace, Jun 2019; DOI: 10.1109/DSC.2019.00059
- 1.6.p Vikas Hassija, Vinay Chamola, Vikas Saxena, Divyansh Jain, Pranav Goyal, Biplob Sikdar: A Survey on IoT Security: Application Areas, Security Threats, and Solution Architectures; IEEE Access, Vol. 7, Jun 2019; DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924045
- 1.6.q Hui Wu, Haiting Han, Xiao Wang, Shengli Sun: Research on Artificial Intelligence Enhancing Internet of Things Security: A Survey; IEEE Access, Vol. 8, Aug 2020; DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3018170

18.2 Software-Defined Networking (SDN)

Die grundlegende Idee von SDN besteht darin [Abschnitt 17.1], die Software in zur Übermittlung von Daten bestimmten Netzwerkkomponenten möglichst von ihrer Hardware zu trennen und diese dann auf eine bzw. mehrere zentrale, als Controller bezeichnete Steuerungskomponente/n auszulagern. Dies führt zu neuen Möglichkeiten der Entwicklung, de facto Programmierung, diverser Network Services. SDN ermöglicht auf diese Weise eine dem Bedarf entsprechende, schnelle Einrichtung verschiedener SD Networks und SD Network Services. Folglich kann sogar von *Programmable Network Services* bzw. von *Network Programmability* gesprochen werden. Die Idee von SDN liegt insbesondere den Networking Trends zugrunde – hervorgehoben seien insbesondere *SD WANs*, *SD Optical Networking*, *SD Data Centers*, *SD IoT*, *Wireless SD Networking* und *SD Internet of Vehicles*. Für Näheres über SDN siehe:

Programmable
Network Services

- 2.a Anatol Badach: SDN – Software Defined Networking; In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Dec 2012, DOI 10.13140/RG.2.1.4963.4001
- 2.b Sandra Scott-Hayward, Gemma O’Callaghan, Sakir Sezer: SDN Security: A Survey; IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS), Nov 2013; DOI: 10.1109/SDN4FNS.2013.6702553
- 2.c Yosr Jarraya, Taous Madi, Mourad Debbabi: A Survey and a Layered Taxonomy of Software-Defined Networking; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 16(4), 2014; DOI: 10.1109/COMST.2014.2320094
- 2.d RFC 7426: Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology; Jan 2015
- 2.e Hamid Farhady, HyunYong Lee, Akihiro Nakao: Software-Defined Networking: A survey; Computer Networks, Vol. 81, Apr 2015; DOI: 10.1016/j.comnet.2015.02.014

- 2.f Akram Hakiri, et al.: Software-Defined Networking: Challenges and research opportunities for Future Internet; *Computer Networks*, Vol. 75, Part A, Dec 2014; DOI: 10.1016/j.comnet.2014.10.015
- 2.g Bruno Astuto A. Nunes, et al.: A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 16(3), 2014; DOI: 10.1109/SURV.2014.012214.00180
- 2.h Diego Kreutz, et al.: Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey; *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103(1), Jan 2015; DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999
- 2.i Junjie Xie, Deke Guo, Zhiyao Hu, Ting Qu, Pin Lv: Control plane of software defined networks: A survey; *Computer Communications*, Vol. 67, Aug 2015, DOI: 10.1016/j.comcom.2015.06.004
- 2.j Izzat Alsmadi, Dianxiang Xu: Security of Software Defined Networks: A survey; *Computers & Security*, Vol. 53, Sep 2015; DOI: 10.1016/j.cose.2015.05.006
- 2.k ONF TR-521: SDN Architecture; Issue 1.1; 2016
- 2.l Rahim Masoudi, AliGhaffari: Software defined networks: A survey; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 67, May 2016; DOI: 10.1016/j.jnca.2016.03.016
- 2.m Taimur Bakhshi: State of the Art and Recent Research Advances in Software Defined Networking; *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2017, Article ID 7191647; Jan 2017; DOI: 10.1155/2017/7191647
- 2.n Murat Karakus, Arjan Durrezi: Quality of Service (QoS) in Software Defined Networking (SDN): A survey; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 80, Feb 2017; DOI: 10.1016/j.jnca.2016.12.019
- 2.o Mehmet Fatih Tuysuz, Zekiye Kubra Ankarali, Didem Gözüpek: A survey on energy efficiency in software defined networks; *Computer Networks*, Vol. 113, Feb 2017; DOI: 10.1016/j.comnet.2016.12.012
- 2.p Sanjev Singh, Rakesh Kumar Jha: A Survey on Software Defined Networking: Architecture for Next Generation Network, *Journal of Network and Systems Management*, 2017, Vol. 25, DOI 10.1007/s10922-016-9393-9
- 2.q Fetia Bannour, Sami Souihi, Abdelhamid Mellouk: Distributed SDN Control: Survey, Taxonomy and Challenges; *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2017, DOI 10.1109/COMST.2017.2782482
- 2.r Yustus Eko Oktian, SangGon Lee, HoonJae Lee, JunHuy Lam: Distributed SDN controller system: A survey on design choice; *Computer Networks*, Vol. 121, Jul 2017; DOI: 10.1016/j.comnet.2017.04.038
- 2.s Sibylle Schallera, Dave Hoodb: Software defined networking architecture standardization; *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, 2017; DOI: 10.1016/j.csi.2017.01.005
- 2.t Michel S. Bonfim, Kelvin L. Dias, Stenio F. L. Fernandes: Integrated NFV/SDN Architectures: A Systematic Literature Review; Jan 2018; arXiv:1801.01516v1

- 2.u Rashid Amin, Martin Reisslein, Nadir Shah: Hybrid SDN Networks: A Survey of Existing Approaches; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 20(4), May 2108; DOI: 10.1109/COMST.2018.2837161
- 2.v Anatol Badach: SDN – Software Defined Networking, In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Mai 2020
- 2.w Roaa Shubbar, Mohammad Alhisnawi, Aladdin Abdulhassan, Mahmood Ahmadi: A Comprehensive Survey on Software-Defined Network Controllers; in Book: Next Generation of Internet of Things; Jan 2021; DOI: 10.1007/978-981-16-0666-3_18
- 2.x Ozgur Yurekten, Mehmet Demirci: SDN-based cyber defense: A survey; Future Generation Computer Systems, Vol. 115, Feb 2021; DOI: 10.1016/j.future.2020.09.006

18.2.1 Software-Defined WANs (SD-WANs)

Das Konzept von SDN kann zur flexiblen Gestaltung und zum Management privater WANs eingesetzt werden, um diese schnell an aktuelle Anforderungen, z.B. im Hinblick auf die Erfüllung von QoS (*Quality of Service*) und Garantie der Sicherheit, anpassen zu können. In diesem Zusammenhang spricht man von *Software-Defined WANs* (SD-WANs). Ein SD-WAN kann vereinfacht als Software-basierte Lösung für WANs angesehen werden. Zum Einrichten eines SD-WAN für den Transport von IP-Datenpaketen können unterschiedliche Netzwerktechnologien eingesetzt werden. Dabei erfolgt die Konfiguration und Steuerung der Funktionen und Leistungsmerkmale über eine oder mehrere Software-Instanzen innerhalb einer speziellen, den Hardware-Komponenten übergeordneten SD-WAN Control Plane. Für weitere Information über SD-WANs siehe:

Intelligent
Integration von
WANs

- 2.1.a Happiest Minds Technologies Pvt. Ltd.; Author: Purnendu: SDWAN: Re-architecting WAN with Software Defined Networking
- 2.1.b CATO-Networks: MPLS, SD-WAN, Internet, and Cloud Network; Understanding the Trade-offs for Your Next Generation WAN
- 2.1.c pwc: SD-WAN for service providers; Threat or opportunity?
- 2.1.d ONUG-SD-WAN-WG-Whitepaper: Software-Defined WAN Use Case; Oct 2014
- 2.1.d Sanjay Uppal, Steve Woo, Dan Pitt, Lee Doyle (Special Foreword): Software Defined WAN For Dummies; John Wiley & Sons, 2015, ISBN: 978-1-119-101482
- 2.1.e MEF Forum: Understanding SD-WAN Managed Services: Service Components, MEF LSO Reference Architecture and Use Cases, Jul 2017
- 2.1.f Fan Gu: SD-WAN Strategy to Address Key Trends and Scalability; IEEE Softwarization, Sep 2017
- 2.1.g Juniper Networks Contrail SD-WAN Design & Architecture Guide; 2018

- 2.1.h Rodolfo Alvizu, et al.: Comprehensive Survey on T-SDN: Software-Defined Networking for Transport Networks; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19(4), Jun 2017; DOI: 10.1109/COMST.2017.2715220

18.2.2 Software-Defined Optical Networking (SDON)

SDON als Ersatz für Signalisierungsprotokolle

Ein wichtiges Merkmal von SDN ist die logische Trennung der *Data Plane* mit diversen Systemkomponenten zur Datenübermittlung von der *Control Plane* mit Systemkomponenten zur Ansteuerung von Systemkomponenten innerhalb der Data Plane. Diese Besonderheit von SDN ist insbesondere in optischen Netzen anzutreffen, in denen optische Switches und optische Multiplexer eine Data Plane bilden, zu deren Ansteuerung ein separates 'nicht-optisches' IP-Netz mit einem speziellen *Signalisierungsprotokoll* zwecks Auf- und Abbau optischer Verbindungen erforderlich ist. Dieses Merkmal prädestiniert optische Netze in besonderer Weise für die Anwendung der SDN-Technologie. Kommt SDN beim Aufbau optischer Netze zum Einsatz, wird von *Software-Defined Optical Networking* (SDON) gesprochen.

Die grundlegende Idee von SDON illustriert Bild 9545 in [2.2.f]. Für Näheres über SDON sei verwiesen auf:

- 2.2.a Akhilesh Thyagaturu, Anu Mercian, Michael P. McGarry, Martin Reisslein, Wolfgang Kellerer: Software Defined Optical Networks (SDONs): A Comprehensive Survey; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, Issue 4, Fourthquarter 2016
- 2.2.b Yuan Cao et al.: Resource allocation in software-defined optical networks secured by quantum key distribution; Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), Jul/Aug 2017
- 2.2.c Rodolfo Alvizu, et al.: Comprehensive Survey on T-SDN: Software-Defined Networking for Transport Networks; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19, No. 4, 2017
- 2.2.d Víctor López, Rodrigo Jiménez, Óscar González de Dios, Juan Pedro Fernández-Palacios: Control plane architectures for elastic optical networks; IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 10, Issue 2, Feb 2018
- 2.2.e Wei Li, Zhe Yang, Weihua Zhao, Zhengwei Qi, Fei Liu: A Review of Research on Software-Defined Optical Network; 2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City, Jan 2019
- 2.2.f Anatol Badach: SD-WAN Software Defined Wide Area Network; In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Feb 2021
- 2.2.g Wang Tong, Azhar Hussain, Wang Xi Bo, Sabita Maharjan: Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey; IEEE Access, Vol. 7, Jan 2019; DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891073

18.2.3 Software-Defined Data Centers (SDDCs)

Die Virtualisierung von Hard- und Software-Ressourcen im Datacenter führt zur Entstehung virtueller Datacenter. Ein virtuelles Datacenter (*Virtual Data Center*, VDC) kann aus einer vollständig virtualisierten, isolierten und verteilten Computing-Infrastruktur bestehen. Dies bedeutet, dass die wesentlichen funktionellen Komponenten dieser Infrastruktur virtualisiert und als *Data Center Services* (DC Services) eingerichtet werden können. Die hauptsächlichen Bausteine von DC Services sind: Netzwerk-Virtualisierung, Storage-Virtualisierung und Server-Virtualisierung. In einem physischen Datacenter können somit mehrere voneinander isolierte, dem individuellen Bedarf von Kunden angepasste virtuelle Datacenter eingerichtet werden. Das dem Konzept von SDN grundlegende Prinzip eignet sich ideal zur flexiblen Gestaltung solcher Services. Beim Einsatz der Idee von SDN zwecks der Bereitstellung virtueller Datacenter spricht man von *Software-Defined Data Centers* (SDDCs). Ein VDC kann somit als SDDC bezeichnet werden. Für Näheres über SDDCs sei auf die folgende Literatur verwiesen:

SD Data Centers

- 2.3.a Distributed Management Task Force, Inc. (DMTF): Software Defined Data Center (SDDC) Definition; Document Identifier: DSP-IS0501; 2015-11-23; Version: 1.0.0
- 2.3.b Dell Inc.: The Future of the Data Center is Software Defined; Mar 2016
- 2.3.c Jeremy van Doorn: Software Defined Data Centers Network Virtualization & Security
- 2.3.d M. Gharbaoui, B. Martini, D. Adami, S. Giordano, P. Castoldi: Cloud and network orchestration in SDN data centers: Design principles and performance evaluation; *Computer Networks*, Vol. 108, Oct 2016; DOI: 10.1016/j.comnet.2016.08.029
- 2.3.e Guan Xu, Bin Dai, Benxiong Huang, Jun Yang, Sheng Wen: Bandwidth-aware energy efficient flow scheduling with SDN in data center networks; *Future Generation Computer Systems*, Vol. 68, Mar 2017; DOI: 10.1016/j.future.2016.08.024
- 2.3.f Hong Zhong, Yaming Fang, Jie Cui: LBBSRT: An efficient SDN load balancing scheme based on server response time; *Future Generation Computer Systems*, Vol. 68, Mar 2017; DOI: 10.1016/j.future.2016.10.001
- 2.3.g Bin Dai, Guan Xu, Bengxiong Huang, Peng Qin, Yang Xu: Enabling network innovation in data center networks with software defined networking: A survey, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 94, Sep 2017; DOI: 10.1016/j.jnca.2017.07.004
- 2.3.h VMware: Architecture and Design: VMware Validated Design for Software-Defined Data Center 4.2; Feb 2018

18.2.4 Software-Defined IoT (SD-IoT)

Das Konzept von SDN (siehe zum Vergleich die Abbildungen 9766 bis 9769 in Quelle [2.4h]) hat eine ausgesprochen große Bedeutung im IoT, denn insbesondere in IoT-

IoT Services

Clouds können spezielle, sog. SDN-Controller eingesetzt werden, um SDN-enabled Access Gateways an der Internet Edge entsprechend der aktuell geltenden Anforderungen (z.B. in Bezug auf Sicherheit) mittels einer Cloud über das Internet schnell zu konfigurieren [Abb. 17.1-9]. Darüber hinaus soll das IoT einer enorm großen Menge auf der Erdkugel verteilter Geräte (Sensoren, Aktuatoren) das Sammeln und somit die Verarbeitung von Echtzeitinformationen ermöglichen, was dazu führt, dass diese zur Bereitstellung neuer intelligenter IoT Services genutzt werden können. Beim Einsatz von SDN zur Bereitstellung intelligenter IoT Services spricht man von *Software-Defined IoT* (SD-IoT). Für weitere Informationen über SD-IoT siehe:

- 2.4.a T. Ninikrishna, Sutapa Sarkar, Richa Tengshe, Mahesh K. Jha, Laxmi Sharma, V. K. Daliya, Sudhir K. Routray: *Software defined IoT: Issues and challenges*; International Conference on Computing Methodologies and Communication, Jul 2017; DOI: 10.1109/ICCMC.2017.8282560
- 2.4.b Tryfon Theodorou, Lefteris Mamas: *Software defined topology control strategies for the Internet of Things*; IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN), Nov 2017; DOI: 10.1109/NFV-SDN.2017.8169884
- 2.4.c Samaresh Bera, Sudip Misra, Athanasios V. Vasilakos: *Software-Defined Networking for Internet of Things: A Survey*; IEEE Internet of Things Journal, Vol. 4(6), Dec 2017; DOI: 10.1109/JIOT.2017.2746186
- 2.4.d Pritish Mishra, Deepak Puthal, Mayank Tiwary, Saraju P. Mohanty: *Software Defined IoT Systems: Properties, State of the Art, and Future Research*; IEEE Wireless Communications, Vol. 26, Issue 6, Dec 2019; DOI: 10.1109/MWC.001.1900083
- 2.4.e Abdullah Al Hayajneh, Md Zakirul Alam Bhuiyan, Ian McAndrew: *Improving Internet of Things (IoT) Security with Software-Defined Networking (SDN)*; Computers, Vol 9, Feb 2020
- 2.4.f Iqbal Alam, et al.: *A Survey of Network Virtualization Techniques for Internet of Things Using SDN and NFV*; ACM Computing Surveys, Vol 53, Apr 2020
- 2.4.g Wajid Rafique, Lianyong Qi, Ibrar Yaqoob, et al.: *Complementing IoT Services through Software Defined Networking and Edge Computing: A Comprehensive Survey*; IEEE Communications Surveys & Tutorials (Early Access), May 2020
- 2.4.h Anatol Badach: *SD-IoT Software Defined Internet of Things*, In book: *Protokolle und Dienste der Informationstechnologie*; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Oct 2020

18.2.5 Wireless Software-Defined Networking

Die grundlegende, auf der Trennung zwischen der *Network Plane* und der *Control Plane* in Netzwerken beruhende Idee von SDN [Abb. 12.1-3] eignet sich ideal für eine neue Gestaltung der Mobilität im IoT. In diesem Zusammenhang spricht man von *Wireless SD Networking*. Insbesondere die SDN-Idee bei der Integration verschiedener Ad-hoc Networks wie z.B. MANET (*Mobile Ad-hoc-NETwork*), VANET

(*Vehicle Ad-hoc-NETwork*) und FANET (*Flying Ad-hoc Network*) in das IoT kann die Bereitstellung von intelligenten IoT Services ermöglichen. Für weitere Informationen über Wireless SD Networking siehe:

- 2.5.a Ian Ku, et al.: Towards Software-Defined VANET: Architecture and Services; 13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), Jun 2014; DOI: 10.1109/MedHocNet.2014.6849111
- 2.5.b Nachiketnas A. Jagadeesan, Bhaskar Krishnamachari: Software-defined networking paradigms in wireless networks: A survey; *ACM Computing Surveys*, Vol. 47(2), Jan 2015
- 2.5.c Bin Cao, Fang He, Yun Li, Chonggang Wang, Wenqiang Lang: Software defined virtual wireless network: framework and challenges; *IEEE Network*, Vol. 29(4), Jul-Aug 2015; DOI: 10.1109/MNET.2015.7166185
- 2.5.d S. V. Manisekaran, R. Venkatesan: An analysis of software-defined routing approach for wireless sensor networks; *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 56, Nov 2016
- 2.5.e Yanwen Wang, Hainan Chen, Xiaoling Wu, Lei Shu: An energy-efficient SDN based sleep scheduling algorithm for WSNs; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 59, Jan 2016; DOI: 10.1016/j.jnca.2015.05.002
- 2.5.f Israat Tanzeena Haque, Nael Abu-Ghazaleh: Wireless Software Defined Networking: A Survey and Taxonomy; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18(4), May 2016; DOI: 10.1109/COMST.2016.2571118
- 2.5.g Hans C. Yu, Giorgio Quer, Ramesh R. Rao: Wireless SDN mobile ad hoc network: From theory to practice; 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2017; DOI: 10.1109/ICC.2017.7996340
- 2.5.h Junfeng Wang, et al.: A software defined network routing in wireless multihop network; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 85, May 2017; DOI: 10.1016/j.jnca.2016.12.007
- 2.5.i Manisha Chahal, et al.: A Survey on software-defined networking in vehicular ad hoc networks: Challenges, applications and use cases; *Sustainable Cities and Society*, Vol. 35, Nov 2017
- 2.5.j Afsane Zahmatkesh; Thomas Kunz: Software Defined Multihop Wireless Networks: Promises and Challenges; *Journal of Communications and Networks*, Vol. 19(6), Dec 2017; DOI: 10.1109/JCN.2017.000094
- 2.5.k Márcio L. F. Miguel, et al.: A CoAP Based Control Plane for Software Defined Wireless Sensor Networks; *Journal of Communications and Networks*, Vol. 19(6), Dec 2017; DOI: 10.1109/JCN.2017.000095
- 2.5.l Konstantinos Poularakis, George Iosifidis, Leandros Tassiulas: SDN-enabled Tactical Ad Hoc Networks: Extending Programmable Control to the Edge; arXiv:1801.02909v1, Jan. 2018
- 2.5.m Paolo Bellavista, Alessandro Dolci, Carlo Giannelli: MANET-oriented SDN: Motivations, Challenges, and a Solution Prototype; 2018 IEEE 19th International Symposium on 'A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks' (WoWMoM), Jun 2018; DOI: 10.1109/WoWMoM.2018.8449805

18.2.6 Software-Defined Internet of Vehicles (SD-IoV)

Rekursiv-
hierarchische
Architektur

Die Unterstützung der Mobilität verschiedener Einrichtungen ist im IoT von großer Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die Steuerung und Kontrolle mobiler Fahrzeuge unterschiedlicher Art im *Internet of Vehicles* (IoV). Um Mobilität mithilfe von SDN zu unterstützen, muss das Konzept eine besondere, rekursiv organisierte hierarchische Art der Steuerung mobiler Einrichtungen im IoT ermöglichen. Hierfür muss es nach einer rekursiv-hierarchischen SDN-Architektur organisiert werden. Bild 9548 in [2.4.h] illustriert die Idee dieser SDN-Architektur. Für Näheres über SD-IoV siehe:

- 2.6.a Saif Al-Sultan, Moath M. Al-Doori, Ali H. Al-Bayatti, Hussien Zedan: A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 37, Jan 2014
- 2.6.b Fangchun Yang, Shangguang Wang, Jinglin Li, Zhihan Liu, Qibo Sun: An overview of Internet of Vehicles; *China Communications*, Vol. 11, Issue 10, Oct 2014
- 2.6.c Chen Jiacheng, Zhou Haibo et al.: Software defined Internet of vehicles: architecture, challenges and solutions; *Journal of Communications and Information Networks*; Vol. 1, Issue 1, Jun 2016
- 2.6.d Omprakash Kaiwartya, Abdul Hanan Abdullah et al.: Internet of Vehicles: Motivation, Layered Architecture, Network Model, Challenges, and Future Aspects; *IEEE Access, Special Section on Future Networks, Architectures, Protocols and Applications*, Vol. 4, Sep 2016
- 2.6.e Sergio Correia, Azzedine Boukerche. Rodolfo I. Meneguette: An Architecture for Hierarchical Software-Defined Vehicular Networks; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, Jul 2017
- 2.6.f Eugen Borcoci, Serban Obreja, Marius Vochin: Internet of Vehicles Functional Architectures - Comparative Critical Study; *AFIN 2017 : The Ninth International Conference on Advances in Future Internet*, Sep 2017
- 2.6.g Yaomin Zhang, Haijun Zhang, et al.: Software-Defined and Fog-Computing-Based Next Generation Vehicular Networks; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 56, Sep 2018
- 2.6.h Muhammad Tahir Abbas, Afaq Muhammad, Wang-Cheol Song: SD-IoV: SDN enabled routing for internet of vehicles in road-aware approach; *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, May 2019
- 2.6.i Lionel Nkenyereye, Lewis Nkenyereye, et al.: Software-Defined Network-Based Vehicular Networks: A Position Paper on Their Modeling and Implementation; *Sensors*, Vol. 19, Issue 17, Aug 2019
- 2.6.j Shiva Raj Pokhre: Software Defined Internet of Vehicles for Automation and Orchestration; *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 22, Issue 6, Jun 2021; DOI: 10.1109/TITS.2021.3077363
- 2.6.k Anteneh S. Al-Heety, Zahriladha Zakaria, et al.: A Comprehensive Survey: Benefits, Services, Recent Works, Challenges, Security, and Use Cases for SDN-VANET; *IEEE Access*, Vol. 8, May 2020

18.3 Network Function Virtualization (NFV)

VM-based VNFs

Die Virtualisierung von Rechnern und deren Bereitstellung auf speziellen leistungsfähigen Wirt-Servern in Form von sog. *Virtual Machines* (VMs) sowie *Virtual Networking* als Vernetzung von sogar auf unterschiedlichen Wirt-Servern untergebrachten VMs sind in der Netzwerkwelt bereits geläufig. Und wenn man schon Rechner und ihre Vernetzung virtualisiert, so bietet es sich an, im folgenden Schritt verschiedene, auf der Basis von VMs realisierte Netzwerkkomponenten (Router, Switches, Firewalls usw.) und ihre Vernetzung, d.h. verschiedene Netzwerkfunktionen (*Network Functions*), als Softwarekomponenten in virtualisierter Form bereitzustellen. Diese Idee hat zu *Network Functions Virtualisation* (NFV) geführt, bei der man von *virtualisierten Netzwerkfunktionen* spricht. Sie werden kurz VNFs (*Virtualised Network Functions*) genannt. Im Zusammenhang mit NFV sind die Networking Trends *Software-Defined VNFs Networking* (*SD VNFs Networking*), *Service Function Chaining* (SFC), *VNFs Management and Orchestration* und *Network Slicing* hervorzuheben. Für Näheres über NFV siehe:

- 3.a ETSI GS NFV 001: Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases; Oct 2013
- 3.b ETSI GS NFV-SEC 001 - V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); NFV Security; Problem Statement; Oct 2014
- 3.c ETSI GS NFV 002 V1.2.1: Network Functions Virtualisation (NFV) - Architectural Framework; Dec 2014
- 3.d ETSI GS NFV-MAN 001 V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV) - Management and Orchestration; Dec 2014
- 3.e ETSI GS NFV-INF 001 - V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Infrastructure Overview; Jan 2015
- 3.f Anatol Badach: NFV – Network Functions Virtualisation; In book: *Protokolle und Dienste der Informationstechnologie*, WEKA-Verlag, Editor: Heinz Schulte; Jan 2015, DOI 10.13140/RG.2.1.4701.2562
- 3.g Rashid Mijumbi, et al.: Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18(1), Sep 2016; DOI: 10.1109/COMST.2015.2477041
- 3.h Eugen Borcoci: Network Function Virtualization and Software Defined Networking Cooperation; *InfoSys 2015 Conference*, May 2015
- 3.i Rashid Mijumbi, et al.: Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18(1), Sep 2016; DOI: 10.1109/COMST.2015.2477041
- 3.j ETSI GR NFV 001 - V1.2.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases; May 2017
- 3.k Shariq Haseeb, et al.: Network Function Virtualization (NFV) based architecture to address connectivity, interoperability and manageability challenges in Internet of Things (IoT); *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 260 (2017); DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012033

- 3.l Michel S. Bonfim, Kelvin L. Dias, Stenio F. L. Fernandes: Integrated NFV/SDN Architectures: A Systematic Literature Review; Jan 2018; arXiv:1801.01516v1
- 3.m U. Rehman, Rui L. Aguiar, João Paulo Barraca: Network Functions Virtualization: The Long Road to Commercial Deployment; IEEE Access, Vol. 7, May 2019; DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915195
- 3.n Tianzhu Zhang, Han Qiu, Leonardo Linguaglossa, Walter Cerroni, Paolo Giaccone: NFV Platforms: Taxonomy, Design Choices and Future Challenges; IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 18, Issue 1, Mar 2021, DOI: 10.1109/TNSM.2020.3045381

18.3.1 Software-Defined VNFs Networking

SD VNFs
Networking

Von großer Bedeutung ist die Tatsache, dass die Konzepte SDN und NFV sich sowohl ähneln als auch ideal ergänzen. Vor allem der Orchestrator bei SDN entspricht der Funktion nach vollkommen dem Orchestrator bei NFV. Folglich können einige Ideen und somit auch Funktionskomponenten von SDN für NFV übernommen werden, was zu SD VNFs Networking führt. Für Näheres darüber siehe:

- 3.1.a Anatol Badach: NVGRE – Network Virtualization using Generic Routing Encapsulation; In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie, WEKA-Verlag, Editor: Heinz Schulte; Oct 2014, DOI 10.13140/RG.2.1.2872.8802
- 3.1.b ETSI GS NFV-SWA 001 - V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Virtual Network Functions Architecture; Dec 2014
- 3.1.c ETSI GS NFV 002 - V1.2.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework; Dec 2014
- 3.1.d ETSI GS NFV-EVE 005 - V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Ecosystem; Report on SDN Usage in NFV Architectural Framework; Dec 2015
- 3.1.e Lorena Isabel Barona López, et al.: Trends on virtualisation with software defined networking and network function virtualisation; IET Networks, Vol. 4(5), Sep 2015; DOI: 10.1049/iet-net.2014.0117
- 3.1.f Jie Li, Eitan Altman, Corinne Touati: A General SDN-based IoT Framework with NVF Implementation; ZTE Communications, ZTE Corporation, 2015, Vol. 13 (3)
- 3.1.g Yong Li, Min Chen: Software-Defined Network Function Virtualization: A Survey; IEEE Access, Vol. 3, Dec 2015c DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2499271
- 3.1.h Verizon: Verizon Network Infrastructure Planning: SDN-NFV Reference Architecture; Version 1.0, Feb 2016
- 3.1.i Qiang Duan, Nirwan Ansari, Mehmet Toy: Software-Defined Network Virtualization: An Architectural Framework for Integrating SDN and NFV for Service Provisioning in Future Networks; IEEE Network, Vol. 30(5), Sep 2016; DOI: 10.1109/MNET.2016.7579021

- 3.1.j Shariq Haseeb, et al.: Network Function Virtualization (NFV) based architecture to address connectivity, interoperability and manageability challenges in Internet of Things (IoT); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 260, 2017
- 3.1.k Open Networking Foundation: REFERENCE DESIGN: ONF TS-101: Trellis: NFV Fabric, Version 1.0; Mar 2019
- 3.1.l Michel S. Bonfim, Kelvin L. Dias, Stenio F. L. Fernandes: Integrated NFV/SDN Architectures: A Systematic Literature Review; ACM Computing Surveys, Vol. 51, Issue 6, Nov 2019
- 3.1.m Partha Pratim Ray, Neeraj Kumar: SDN/NFV architectures for edge-cloud oriented IoT: A systematic review; Computer Communications, Vol. 169, Mar 2021; DOI: 10.1016/j.comcom.2021.01.018
- 3.1.n Ziye Jia, Min Sheng, Jiandong Li, Di Zhou, Zhu Han: VNF-Based Service Provision in Software Defined LEO Satellite Networks; IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 20, Issue 9, Sep 2021; DOI: 10.1109/TWC.2021.3072155

18.3.2 Service Function Chaining (SFC)

Mit der Verfügbarkeit von Rechnern in Form von VMs eröffnen sich vollkommen neue Möglichkeiten, unterschiedlich an Geschäftsprozesse angepasste Netzwerkdienste spontan bereitzustellen. Denn auf der Basis von VMs können zur Einrichtung verschiedener komplexer Netzwerkdienste diverse Funktionskomponenten als virtuelle, standardisierte Netzwerkfunktionsmodule im Voraus für einen Einsatz vorbereitet und dann bei Bedarf als Softwarekomponenten ad hoc verfügbar gemacht werden. Sie werden kurz als VNFs (*Virtualised Network Functions*) bzw. auch als SFs (*Service Functions*) bezeichnet. Da die Realisierung jedes Netzwerkdienstes auf der Basis von durch virtualisierte Rechner erbrachte SFs oft zu einer Verkettung von SFs führt, spricht man in diesem Zusammenhang von *Service Function Chaining* (SFC). Unter SFC werden somit zahlreiche Konzepte und Lösungen zur Kooperation von hauptsächlich softwaremäßig realisierten SFs zwecks der Erbringung diverser Netzwerkdienste verstanden. Für weitere Information über SFC siehe:

Rekursive
Vernetzung von
VNFs

- 3.2.a ETSI GS NFV 002, V1.2.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework; Dec 2014
- 3.2.b Anatol Badach: SFC Service Function Chaining; In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie, WEKA-Verlag, Editor: Heinz Schulte; Jan 2015, DOI 10.13140/RG.2.1.4701.2562
- 3.2.c Barbara Martini, Federica Paganelli: A Service-Oriented Approach for Dynamic Chaining of Virtual Network Functions over Multi-Provider Software-Defined Networks; Future Internet, Vol. 8(2), Jun 2016; DOI:10.3390/fi802002
- 3.2.d Deval Bhamare, Raj Jain, Mohammed Samaka, Aiman Erbad: A survey on service function chaining; Journal of Network and Computer Applications, Vol. 75, Nov 2016; DOI: 10.1016/j.jnca.2016.09.001

- 3.2.e Janos Elek, David Jocha, Robert Szabo: Network Function Chaining in DCs: the Unified Recurring Control Approach; Fourth European Workshop on Software Defined Networks, Oct 2015; DOI: 10.1109/EWSDN.2015.54
- 3.2.f Deval Bhamare, et al.: Optimal virtual network function placement in multi-cloud service function chaining architecture; Computer Communications, Vol. 102, Apr 2017; DOI: 10.1016/j.comcom.2017.02.011
- 3.2.g Ahmed AbdelSalam, et al.: Implementation of Virtual Network Function Chaining through Segment Routing in a Linux-based NFV Infrastructure, Apr 2017, arXiv:1702.05157v4
- 3.2.g Taixin Li, Huachun Zhou, Hongbin Luo: A new method for providing network services: Service function chain; Nov 17; DOI: 10.1016/j.osn.2015.09.005
- 3.2.h Haruna Umar Adoga, Dimitrios P. Pezaros: Network Function Virtualization and Service Function Chaining Frameworks: A Comprehensive Review of Requirements, Objectives, Implementations, and Open Research Challenges; Future Internet, Vol. 14, Issue 2, Feb 2022; DOI: 10.3390/fi14020059
- 3.2.i Hajar Hantouti, Nabil Benamar, Tarik Taleb: Service Function Chaining in 5G & Beyond Networks: Challenges and Open Research Issues; IEEE Network, Vol. 34, Issue 4, Jul/Aug 2020, DOI: 10.1109/MNET.001.1900554
- 3.2.j MIRJALILY Ghasem, LUO Zhiqian: Optimal Network Function Virtualization and Service Function Chaining: A Survey; Chinese Journal of Electronics, Vol. 27, No 4, Jul 2018; DOI:10.1049/cje.2018.05.008

18.3.3 VNFs Management and Orchestration

SDN Controller
als Dirigent von
VNFs

Zur Schaffung eines Network Services auf der Grundlage von VNFs werden in der Regel mehrere VNFs benötigt. Diese VNFs werden durch verschiedene VMs erbracht und können räumlich weit auseinanderliegen. Ein solcher Network Service stellt de facto eine aus mehreren räumlich verteilten VNFs bestehende 'Service-Komposition' dar. Solch eine Komposition ist mit einer von mehreren Musikern gespielten Musikkomposition vergleichbar. Eine VNF entspricht in diesem Fall einem Musiker. Wird die Komposition von mehreren Musikern gespielt, müssen sie dirigiert werden, es ist also ein Dirigent nötig. So ist es auch im Falle der VNFs, wenn mehrere zusammen agieren müssen, um einen Network Service zu erbringen. Als ihr 'Dirigent' fungiert dann ein SDN Controller. So entspricht die Bereitstellung von Network Services, die durch mehrere VNFs erbracht werden, weitgehend der Vorbereitung eines von mehreren Musikern gespielten Konzerts. Es wird daher eine Orchestrierung von VNFs (*VNFs Orchestration*) und von Network Services sowie ihres Management benötigt. Für weitere Details zum VNFs Management und Orchestration siehe:

- 3.3.a ETSI GS NFV-MAN 001, V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration; Dec 2014
- 3.3.b Daniel King, et al.: Network service orchestration standardization: A technology survey; Computer Standards & Interfaces, Vol. 54(4), Nov. 2017; DOI: 10.1016/j.csi.2016.12.006

- 3.3.c Charalampos Rotsos, et al.: Network service orchestration standardization: A technology survey; *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54(4), Nov 2017; DOI: 10.1016/j.csi.2016.12.006
- 3.3.d 3GPP TS 28.531: Management and orchestration of networks and network slicing; Provisioning
- 3.3.e 3GPP TS 28.533: Management and orchestration; Architecture framework
- 3.3.f ETSI GS NFV-IFA 014 V2.4.1: Network Functions Virtualisation (NFV) Release 2; Management and Orchestration; Network Service Templates Specification, Feb 2018
- 3.3.g Karamjeet Kaur, Veenu Mangat, Krishan Kumar: A review on Virtualized Infrastructure Managers with management and orchestration features in NFV architecture; *Computer Networks*, Vol 217, Nov 2022; DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109281
- 3.3.h Karamjeet Kaur, Veenu Mangat, Krishan Kumar: A review on Virtualized Infrastructure Managers with management and orchestration features in NFV architecture; *Computer Networks*, Vol 217, Nov 2022; DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109281

18.3.4 Network Slicing

Man könnte sich einzelne virtuelle private Netzwerkinfrastrukturen im Datacenter als 'virtuelle Netzwerkscheiben' vorstellen, welche voneinander isoliert werden. Da die virtuellen Netzwerkscheiben als *Network Slices* bezeichnet werden, spricht man im Zusammenhang mit der Bildung von *Network Slicing*. *Network Slices* können dank der Orchestrierung von VNFs gebildet werden. Ihr Management erfolgt nach dem Prinzip von SDN. Auf der Basis von Network Slicing werden beispielsweise private mobile 5G-Netzwerke gebildet. Es ist zu erwarten, dass Network Slicing in der Netzwerkwelt zukünftig von fundamentaler Bedeutung sein wird. Für weitere Details über Network Slicing siehe:

Bildung virtueller
'Netzwerkscheiben'

- 3.4.a NGMN Alliance: Description of Network Slicing Concept, Version 1.0, Jan 2016
- 3.4.b ETSI GR NFV-EVE 012, V3.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3; Evolution and Ecosystem; Report on Network Slicing Support with ETSI NFV Architecture Framework; Dec 2017
- 3.4.c 3GPP TR 28.801, V15.1.0: Study on management and orchestration of network slicing for next generation network (Release 15); Jan 2018
- 3.4.d Alex Galis: Perspectives on Network Slicing – Towards the New 'Bread and Butter' of Networking and Servicing; *IEEE Softwarization*, Jan 2018
- 3.4.e Luis M. Contreras, Diego R. López: A Network Service Provider Perspective on Network Slicing; *IEEE Softwarization*, Jan 2018
- 3.4.f Daniele Ceccarelli, Young Lee, Huawei: Transport Aspects of Network Slicing: Existing Solutions and Gaps; *IEEE Softwarization*, Jan 2018

- 3.4.g Huanzhuo Wu, et al.: Network Slicing for Conditional Monitoring in the Industrial Internet of Things; IEEE Softwarization, Jan 2018
- 3.4.h Ibrahim Afolabi, Tarik Taleb, Konstantinos Samdanis, Adlen Ksentini, Hannu Flinck: Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 20, Issue 3, Mar 2018; DOI: 10.1109/COMST.2018.2815638
- 3.4.i Ibrahim Afolabi, Tarik Taleb, Konstantinos Samdanis, Adlen Ksentini, Hannu Flinck: Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 20, Issue 3, Mar 2018; DOI: 10.1109/COMST.2018.2815638
- 3.4.j Sławomir Kukliński, et al.: A reference architecture for network slicing; NET-SOFT 2018, 4th IEEE Conference on Network Softwarisation, Jun 2018
- 3.4.k Hao Jiang, Nakjung Choi, Marina Thottan, Jacobus Van der Merwe: Fest-Net: A Flexible and Efficient Sliced Transport Network; IEEE 7th International Conference on Network Softwarization, Jul 2021, DOI: 10.1109/Net-Soft51509.2021.9492625

18.4 (Docker) Container Networking

Container
Technologie als
Virtualisierung
auf Betriebs-
systemebene

Die Bereitstellung von *Virtual Machines* (VMs) und auf der Grundlage von VNFs (*Virtualized Network Functions*) kann als eine Art Virtualisierung auf Hardwareebene angesehen werden. Eine VNF kann aber auch auf der Basis eines oder mehrerer Rechner/s eingerichtet werden, in dem/denen – sozusagen als 'Virtualisierung auf Betriebssystemebene' – die sog. *Container-Technologie* (CT) realisiert wird. Die Idee dieser Virtualisierungsart basiert darauf, dass in einem physischen Rechner mit seinem Betriebssystem, z.B. Linux, eine besondere Applikation installiert wird, die als virtualisiertes Betriebssystem mit Applikationen angesehen werden kann. Dabei können die Applikationen ihren Funktionen entsprechend gruppiert und in sog. (virtuellen) Containern 'untergebracht' werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Container-basierter Virtualisierung*.

Mobilität von
Containern mit
Applikationen

Man könnte sich so ein virtualisiertes Betriebssystem mit seinen Applikationen als ein als *Docker* bezeichnetes Schiff mit seinen Containern vorstellen. Ein wichtiger Vorteil nicht-virtueller Container besteht darin, dass sie relativ einfach von einem Ort zum anderen, z.B. Schiff zu Schiff, bewegt werden können. Auch die Mobilität virtueller Container mit Applikationen kann einfach erreicht werden, indem man diesem – auf einem Docker mit einer offiziellen IP-Adresse – eine private IP-Adressen zuweist. Auf jedem Docker kann das NAT-Verfahren (*Network Address Translation*) realisiert werden [Abschnitt 6.3]. Durch dieses kann jeder virtuelle Container mit seiner privaten IP-Adresse auf jedem Docker neu installiert werden und dabei – auch häufig – seine private IP-Adresse erhalten bleiben. In Folge kann jeder Container mit seiner privaten IP-Adresse von einem physischen Rechner auf einen anderen bewegt werden. Dies bedeutet, dass eine uneingeschränkte Mobilität von Containern möglich ist, in denen

verschiedene VNFs durch die in ihnen enthaltenen Applikationen realisiert werden können.

Die Mobilität von Containern trägt dazu bei, dass VNFs bei der Realisierung der Container-Technologie in einer Cloud mithilfe der Datenübermittlung von einer Cloud in andere transportiert werden können. Container Networking liegt insbesondere den Networking Trends *Container-based Network Services*, *Cloud Computing Containerization*, *Mobile VNFs Networking* und *Containerized IoT Services* zugrunde. Für weitere Informationen zum Thema Container Networking siehe:

- 4.a Martin Fowler: *Microservices Resource Guide*
- 4.b David Bernstein: *Containers and Cloud: From LXC to Docker to Kubernetes*; IEEE Cloud Computing, Vol. 1(3), Sep 2014; DOI: 10.1109/MCC.2014.51
- 4.c Di Liu, Libin Zhao: *The research and implementation of cloud computing platform based on docker*; 11th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), Dec 2014; DOI: 10.1109/ICCWAMTIP.2014.7073453
- 4.d Richard Cziva, Simon Jouet, Kyle J. S. White, Dimitrios P. Pezaros: *Container-based Network Function Virtualization for Software-Defined Networks*; 2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), Jul 2015 DOI: 10.1109/ISCC.2015.7405550
- 4.e Jason Anderson, et al.: *Performance considerations of network functions virtualization using containers*; International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Feb 2016; DOI: 10.1109/ICNC.2016.7440668
- 4.f Roberto Morabito: *Virtualization on Internet of Things Edge Devices With Container Technologies: A Performance Evaluation*; IEEE Access, Vol. 5, May 2017; DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2704444
- 4.g Richard Cziva, Dimitrios P. Pezaros: *Container Network Functions: Bringing NFV to the Network Edge*; IEEE Communications Magazine Vol. 55(6), Jun 2017; DOI: 10.1109/MCOM.2017.1601039
- 4.h Phil Lowden: *Cisco Container Networking Overview and Roadmap*; Nov 2017
- 4.i VMware: *CONTAINERS AND CONTAINER NETWORKING: For Network Engineers*; Jan 2018
- 4.j Jae-Geun Cha, Sun Wook Kim: *Design and Evaluation of Container-based Networking for Low-latency Edge Services*; 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Oct 2021; DOI: 10.1109/ICTC52510.2021.9620212
- 4.k Sridhar K. N. Rao. Federica Paganelli, Al Morton: *Benchmarking Kubernetes Container-Networking for Telco Usecases*; IEEE Global Communications Conference, Dec 2021; DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685803

18.4.1 Container-based Network Services

Grundlagen für verteilte Anwendungsar- chitekturen

In einem Container können mehrere Applikationen enthalten sein, von denen jede eine eigenständige Ausführungsumgebung hat und dadurch isoliert von anderen Applikationen ausgeführt werden kann. Die voneinander isolierten Applikationen können dazu dienen, verschiedene Netzwerkfunktionen, sog. VNFs, zu kreieren. Daraufhin können mithilfe von VNFs bestimmte Netzwerkdienste erbracht werden. Sie werden als *Container-based Network Services* oder *Microservices* bezeichnet. Für weitere Informationen darüber siehe:

- 4.1.a Martin Šušal: Container service chaining
- 4.1.b Roberto Morabito, Nicklas Beijar: Enabling Data Processing at the Network Edge through Lightweight Virtualization Technologies; IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops); Jun 2016; DOI: 10.1109/SECONW.2016.7746807
- 4.1.c Sergio Livi, et al.: Container-Based Service Chaining: A Performance Perspective; 5th IEEE International Conference on Cloud Networking (Cloudnet), Oct 2016; DOI: 10.1109/CloudNet.2016.51
- 4.1.d Kuljeet Kaur, Tanya Dhand, Neeraj Kumar, Sherali Zeadally: Container-as-a-Service at the Edge: Tradeoff between Energy Efficiency and Service Availability at Fog Nano Data Centers; IEEE Wireless Communications, Vol. 24(3), Jun 2017; DOI: 10.1109/MWC.2017.1600427
- 4.1.e Kyungwoon Lee, Youngpil Kim, Chuck Yoo: The Impact of Container Virtualization on Network Performance of IoT Devices; Mobile Information Systems, Vol. 2018, Article ID 9570506, May 2018; DOI: 10.1155/2018/9570506
- 4.1.f Cisco: Cloud-Native Network Functions (CNFs), White Paper; Jun 2018; Document ID:1529344804993194
- 4.1.g Qi Zhang, Ling Liu, Calton Pu, Qiwei Dou, Liren Wu, Wei Zhou: Comparative Study of Containers and Virtual Machines in Big Data Environment; arXiv:1807.01842v1, Jul 2018

18.4.2 Cloud Computing Containerization

Container as a Service (CaaS)

Sowohl in einem physischen als auch in einem virtualisierten Rechner, d.h. auf einer Virtual Machine (VM), können mehrere Container mit diversen Microservices eingerichtet werden. Auf der Basis der beiden Rechnerarten, in denen verschiedene *Container-based Network Services* in Form von VNFs verfügbar sind, können sog. *Clouds* gebildet werden. Infolgedessen kann die Container Technologie auch in Clouds realisiert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Cloud Computing Containerization*. Für Näheres darüber siehe:

- 4.2.a Claus Pahl, Brian Lee: Containers and Clusters for Edge Cloud Architectures - A Technology Review; The 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud 2015); Aug 2015; DOI: 10.1109/FiCloud.2015.35

- 4.2.b Hui Kang, Michael Le, Shu Tao: Container and Microservice Driven Design for Cloud Infrastructure DevOps, IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), Apr 2016; DOI: 10.1109/IC2E.2016.26
- 4.2.c Nane Kratzke: A Brief History of Cloud Application Architectures; Applied Sciences, Vol. 8(8), Aug 2018, DOI: 10.3390/app8081368
- 4.2.d ETSI GS NFV-EVE 011 V3.1.1 (2018-10): Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3; Virtualised Network Function; Specification of the Classification of Cloud Native VNF Implementations Disclaimer
- 4.2.e Anshita Malviya, Rajendra Kumar Dwivedi: A Comparative Analysis of Container Orchestration Tools in Cloud Computing; 9th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), Mar 2022; DOI: 10.23919/INDIACom54597.2022.9763171
- 4.2.f Sanjay Hardikar, Pradeep Ahirwar, Sameer Rajan: Containerization: Cloud Computing based Inspiration Technology for Adoption through Docker and Kubernetes; Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Aug 2021; DOI: 10.1109/ICESC51422.2021.9532917

18.4.3 Mobile VNFs Networking

Von einem Container in einem physischen bzw. in einem virtuellen Rechner können mehrere VNFs erbracht werden. Jedem Container kann eine private IP-Adresse zugewiesen werden. Dadurch entsteht die Möglichkeit, dass jeder Container mit einer privaten IP-Adresse von einem Docker, quasi einem 'virtuellen Schiff', zu einem anderen transportiert werden kann. Diese Mobilität von Containern mit VNFs schließt die *Mobilität von VNFs* mit ein. Verschiedene mobile VNFs können dank der Realisierung des Mobile VNFs Networking untereinander auf eine Weise vernetzt werden, dass die Einrichtung eines Mobile Network Service möglich ist. Für weitere Informationen darüber siehe:

Mobile Virtual
Network Services

- 4.3.a Rajendra Chayapathi, Syed Farrukh Hassan, Paresh Shah: Network Functions Virtualization (NFV) with a Touch of SDN; Addison-Wesley, Nov 2016; ISBN-13: 978-0-13-446305-6
- 4.3.b Ajay Simha: Red Hat Reference Architecture Series: NFV reference architecture for deployment of mobile networks; Version 1.3, Jan 2017
- 4.3.c Project: H2020-ICT-2014-2 5G NORMA Definition and specification of connectivity and QoE/QoS management mechanisms; Final Report, Jun 2017
- 4.3.3 Ana Hermosilla, Alejandro Molina Zarca, Jorge Bernal Bernabe, Jordi Ortiz, Antonio Skarmeta: Security Orchestration and Enforcement in NFV/SDN-Aware UAV Deployments; IEEE Access, Vol. 8, Jul 2020; DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010209

18.4.4 Containerized IoT Services

Fog Node →
Container für
VNFs

Im IoT hat sowohl Cloud Computing als auch Fog Computing eine fundamentale Bedeutung. Wie bereits erwähnt, führt ein Networking Trend zur *Cloud Computing Containerization*. Da Fog Computing [Abb. 17.1-4] als eine besondere Art von Cloud Computing betrachtet werden kann, bei der eine Mini Cloud einen Fog Node darstellt, führt der Einsatz der Container Technologie zur Containerization beider Arten von Computing. Dank dieser Containerization kommt die Container Technologie auch im IoT zum Einsatz, sodass man von *Containerized IoT Services* sprechen kann. Für weitere Informationen darüber sei verwiesen auf:

- 4.4.a Azhar Sayeed, Dejan Leskaroski: Cloud Native Applications in a Telco World - How Micro Do You Go?
- 4.4.b Bukhary Ikhwan Ismail, et al.: Evaluation of Docker as Edge computing platform; Proc. IEEE Conference on Open Systems (ICOS), Aug 2015; DOI: 10.1109/ICOS.2015.7377291
- 4.4.c Riccardo Petrolo, Roberto Morabito, Valeria Loscrì, Nathalie Mitton: The design of the gateway for the cloud of things; Annals of Telecommunications, Vol. 72, Issue 1–2, Feb 2017; DOI 10.1007/s12243-016-0521-z
- 4.4.d Roberto Morabito, Ivan Farris, Antonio Iera, Tarik Taleb: Evaluating Performance of Containerized IoT Services for Clustered Devices at the Network Edge; IEEE Internet of Things Journal, Vol. 4(4), Aug. 2017; DOI: 10.1109/JIOT.2017.2714638
- 4.4.e Koustabh Dolui, Csaba Kiraly: Towards Multi-container Deployment on IoT Gateways; Oct 2018; arXiv:1810.07753v1
- 4.4.e Hyunsik Yang, Younghan Kim: Design and Implementation of Fast Fault Detection in Cloud Infrastructure for Containerized IoT Services; Sensors, Vol. 20, Issue 16, Aug 2020; DOI: 10.3390/s20164592

18.5 Cloud Computing Services

Bedeutung von
Cloud Computing

Mit der Entwicklung von IoT gewinnt das als Cloud Computing bezeichnete Service-Modell enorm an Bedeutung [Abb. 17.1-4]. Die große Bedeutung von Cloud Computing besteht hauptsächlich darin, dass man dem Cloud Computing zugrunde liegenden Modell nach bei Bedarf spontan über Netzwerke auf einen Pool konfigurierbarer Computing-Ressourcen (z.B. Netzwerke, Server, Speicher, Applikationen und Dienste) zugreifen kann. Infolge der immensen Menge verschiedener weltweit im IoT verteilter Devices und Objekte werden riesige global verstreute Datenmengen erzeugt. Diese müssen zuerst entsprechend gespeichert und dann schnell verarbeitet werden. Dabei kommt das Konzept von Cloud Computing zum Einsatz, wobei die IoT-spezifischen Clouds als eine Art 'IoT Service Platforms' fungieren. Mit Cloud Computing sind insbesondere die Networking Trends *Infrastructure as a Service* (IaaS), *Software-Defined CC Networking*, *Cloud Native Microservices* und *Mobile*

CC in 5G verbunden. Für weitere Informationen über Cloud Computing sei verwiesen auf die folgende Literatur:

- 5.a i-SCOOP: Cloud computing – from private, public and hybrid cloud to cloud services and cloud evolutions
- 5.b B. Wanga, Z. Qi, R. Ma, H. Guan, A. V. Vasilakos: A survey on data center networking for cloud computing; *Computer Networks*, Vol. 91, 2015; DOI: 10.1016/j.comnet.2015.08.040
- 5.c Jatinder Singh, Thomas Pasquier, Jean Bacon, Hajoon Ko, David Eysers: Twenty Security Considerations for Cloud-Supported Internet of Things; *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3(3), Jun 2016; DOI: 10.1109/JIOT.2015.2460333
- 5.d Blesson Varghese, Rajkumar Buyya: Next Generation Cloud Computing: New Trends and Research Directions, Sep 2017, arXiv:1707.07452v3
- 5.e Syed Noorhassan Shirazi, Antonios Gouglidis, Arsham Farshad, David Hutchison: The Extended Cloud: Review and Analysis of Mobile Edge Computing and Fog from a Security and Resilience Perspective; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 35(11), Nov 2017, DOI: 10.1109/JSAC.2017.2760478
- 5.f Yahya Al-Dhuraibi, Fawaz Paraiso, Nabil Djarallah, Philippe Merle: Elasticity in Cloud Computing: State of the Art and Research Challenges; *IEEE Transactions on Services Computing*, Vol. 11(2), Mar - Apr 2018; DOI: 10.1109/TSC.2017.2711009
- 5.g Amirhossein Farahzadi, et al.: Middleware technologies for cloud of things: a survey; *Digital Communications and Networks*, Vol. 4(3), Aug 2018; DOI: 10.1016/j.dcan.2017.04.005
- 5.h Shubham Gupta, Anand Gupta, Gori Shankar: Cloud Computing: Services, Deployment Models and Security Challenges; 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC); Oct 2021; DOI: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591794
- 5.i Xuan-Quy Pham, Tien-Dung Nguyen, Thien Huynh-The, Eui-Nam Huh, Dong-Seong Kim: Distributed Cloud Computing: Architecture, Enabling Technologies, and Open Challenges; *IEEE Consumer Electronics Magazine Early Access*; Jul 2022; DOI: 10.1109/MCE.2022.3192132

18.5.1 Infrastructure-as-a-Service (IaaS)

Enthält eine Cloud einen derartigen Pool konfigurierbarer Computing-Ressourcen, um die bedarfsabhängige Bereitstellung durch einen Cloud-Provider einer virtuellen, aus verschiedenen VNFs bestehenden netzwerkspezifischen Infrastruktur zu ermöglichen, wird von einem *Infrastructure-as-a-Service* (IaaS) gesprochen. Als IaaS können verschiedene private und voneinander isolierte, virtuelle Infrastrukturen angeboten werden. Dies wird auch *Network Slicing* genannt. Bei der Realisierung von IaaS spielt *Service Function Chaining* (SFC) eine wichtige Rolle. Für Näheres über IaaS siehe:

IaaS als Basis für
Network Slicing

- 5.1.a Antonio Celesti, Davide Mulfari, Maria Fazio, Massimo Villari, Antonio Puliafito: Exploring Container Virtualization in IoT Clouds; *IEEE Interna-*

tional Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), May 2016; DOI: 10.1109/SMARTCOMP.2016.7501691

- 5.1.b Heli Amarasinghe, Abdallah Jarray, Ahmed Karmouch: Fault-tolerant IaaS management for networked cloud infrastructure with SDN; IEEE International Conference on Communications (ICC'17), May 2017; DOI: 10.1109/ICC.2017.7996342
- 5.1.c Steven Van Rossem, et al.: A Vision for the Next Generation Platform-as-a-Service; Proceedings of 2018 IEEE 1st 5G World Forum
- 5.1.d Jasmeen Kaur Ahluwalia, Carla Mouradian, Mohammad Nazmul Alam, Roch Glitho: A Cloud Infrastructure as a Service for an Efficient Usage of Sensing and Actuation Capabilities in Internet of Things; IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Apr 2022; DOI: 10.1109/NOMS54207.2022.9789805
- 5.1.e Betty Elezabeth Samuel, Saahira Banu Ahamed, Padmanayaki Selvarajan: A Review of Efficient Mobility Techniques for Privacy and Secured Cloud Computing Architectures for Infrastructure as a Service; 7th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES); Jun 2022; DOI: 10.1109/ICCES54183.2022.9835763

18.5.2 Software-Defined Cloud Computing Networking

Software-Defined
CC Networking

Ein IaaS kann dem Bedarf entsprechend auf eine festgelegte Zeitdauer und sogar auf der Basis mehrerer vernetzter Clouds eingerichtet werden. Somit gilt im Allgemeinen die Vernetzung von Clouds, also *Cloud Computing Networking* (CC Networking), als Voraussetzung für die Bereitstellung von IaaS. Hierbei ist auch eine flexible Lösung nötig, um die notwendigen VNFs zu bestimmen, diese dem aktuellen Bedarf entsprechend untereinander virtuell zu vernetzen, zu konfigurieren und im Laufe der Zeit zu managen. Um diese Aufgaben bei IaaS zu bewältigen, werden einige Konzepte von SDN übernommen, und demzufolge spricht man von *Software-Defined CC Networking*. Für weitere Information darüber siehe:

- 5.2.a Rajkumar Buyya, Rodrigo N. Calheiros, Jungmin Son, Amir Vahid Dastjerdi, Young Yoony: Software-Defined Cloud Computing: Architectural Elements and Open Challenges, Feb 2015; arXiv:1408.6891v2
- 5.2.b Foresta Francesco: Integration of SDN Frameworks And Cloud Computing Platforms: An Open Source Approach; Master Thesis, Universita di Bologna; Academic Year 2016/2017
- 5.2.c Jungmin Son, Rajkumar Buyya: A Taxonomy of Software-Defined Networking (SDN)-Enabled Cloud Computing; ACM Computing Surveys, Vol.51(3), May 2018; DOI: 10.1145/3190617
- 5.2.d Aaqif Afzaal Abbasi, Almas Abbasi, Shahaboddin Shamshirband, Anthony Theodore Chronopoulos, Valerio Persico, Antonio Pescapè: Software-Defined Cloud Computing: A Systematic Review on Latest Trends and Developments; IEEE Access, Vol. 7, Jul 2019; DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2927822

- 5.2.e Ahmad AA AlKhatib, Thaeer Sawalha, Shadi AlZu'bi: Load Balancing Techniques in Software-Defined Cloud Computing: an overview; *Seventh International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, Apr 2020; DOI: 10.1109/SDS49854.2020.9143874
- 5.2.f David Espinel Sarmiento, Adrien Lebre, Lucas Nussbaum, Abdelhadi Chari: Decentralized SDN Control Plane for a Distributed Cloud-Edge Infrastructure: A Survey; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 23, Issue 1, Jan 2021; DOI: 10.1109/COMST.2021.3050297

18.5.3 Cloud-Native Microservices

Ein weiterer wichtiger Trend ist die Integration von Cloud Computing in öffentliche Netzwerkinfrastrukturen mit dem Ziel der Bereitstellung und flexiblen Nutzung virtueller Netzwerkfunktionen, d.h. VNFs, in diesen. Da VNFs als netzwerkspezifische Funktionsbausteine, also eine Art 'Network-App' dienen, werden sie auch als *Microservices* bezeichnet. Solche virtuellen Microservices (z.B. vRouter, vFirewalls) ermöglichen die schnelle Einrichtung diverser komplexer Network Services. Wurden VNFs bzw. Microservices speziell für Cloud-Computing-Architekturen entwickelt und optimiert, so werden sie entsprechend *Cloud-native VNFs* und *Cloud-native Microservices* genannt. Für Weiteres darüber siehe:

Cloud-native
VNFs bzw.
Microservices

- 5.3.a Azhar Sayeed, Dejan Leskaroski: Cloud Native Applications in a Telco World - How Micro Do You Go?
- 5.3.b Antonio Celesti, et al.: Exploring Container Virtualization in IoT Clouds; *IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, May 2016; DOI: 10.1109/SMARTCOMP.2016.7501691
- 5.3.c Hamzeh Khazaei, Hadi Bannazadeh, Alberto Leon-Garcia: SAVI-IoT: A Self-Managing Containerized IoT Platform, *IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, Aug 2017; DOI: 10.1109/FiCloud.2017.27
- 5.3.d Cisco: Cloud-Native Network Functions (CNFs); White Paper, Jun 2018; Document ID:1529344804993194
- 5.3.e 5G-PPP Software Network Working Group: From Webscale to Telco, the Cloud Native Journey; July 2018
- 5.3.f Tetiana Yarygina: Exploring Microservice Security; PhD Thesis, Department of Informatics, University of Bergen, Jul 2018
- 5.3.g ETSI GS NFV-EVE 011 V3.1.1 (2018-10): Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3; Virtualised Network Function; Specification of the Classification of Cloud Native VNF Implementations Disclaimer
- 5.3.h Shihabur Rahman Chowdhury, Mohammad A. Salahuddin, Noura Limam, Raouf Boutaba: Re-Architecting NFV Ecosystem with Microservices: State of the Art and Research Challenges; *IEEE Network*, Vol. 33, Issue 3, May/Jun 2019; DOI: 10.1109/MNET.2019.1800082

- 5.3.i Rasel Chowdhury, Chamseddine Talhi, Hakima Ould-Slimane, Azzam Mourad: A Framework for Automated Monitoring and Orchestration of Cloud-Native applications; *International Symposium on Networks, Computers and Communications*, Oct 2020; DOI: 10.1109/ISNCC49221.2020.9297238
- 5.3.j Syed Danial Ali Shah, Mark A. Gregory, Shuo Li: Cloud-Native Network Slicing Using Software Defined Networking Based Multi-Access Edge Computing: A Survey; *IEEE Access*, Vol. 9, Jan 2021; DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050155

18.5.4 Mobile Cloud Computing in 5G

Mobility von
VNFs in
5G-Netzen

Heutzutage haben mobile Kommunikation und mobiles Computing in allen Bereichen unseres Lebens eine große Bedeutung. Die Möglichkeiten der Nutzung des Mobile Computing kann noch durch die Symbiose mit Cloud Computing verbessert werden. Um dies zu erreichen, wird ein neuer Trend namens *Mobile Cloud Computing* (MCC) verfolgt. Diesem wird aktuell, insbesondere im Hinblick auf die neu entwickelten zellularen 5G-Mobilfunknetze, im Forschungsbereich viel Aufmerksamkeit gewidmet. Für weitere Information über MCC siehe:

- 5.4.a Min Chen, Yin Zhang, Yong Li, Shiwen Mao, Victor C. M. Leung: EMC: Emotion-Aware Mobile Cloud Computing in 5G; *IEEE Network*, Vol. 29(2), Mar - Apr 2015; DOI: 10.1109/MNET.2015.7064900
- 5.4.b Nasir Abbas, Yan Zhang, Amir Taherkordi, Tor Skeie: Mobile Edge Computing: A Survey; *IEEE Internet of Things Journal*, 2018; DOI: 10.1109/JIOT.2017.2750180
- 5.4.c Talal H. Noor, Sherali Zeadally, Abdullah Alfazi, Quan Z. Sheng: Mobile cloud computing: Challenges and future research directions; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 115, Aug 2018; DOI: 10.1016/j.jnca.2018.04.018
- 5.4.d Lofty Sahi, Monica Sood. Sapna Saini: Analysis and Evaluation of Mobile Cloud Computing: Service Models, Applications, and Issues; *4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Oct 2018; DOI: 10.1109/I2CT42659.2018.9058061
- 5.4.e Zimutian Yang: A Survey of Security Issues in Mobile Cloud Computing; *A Survey of Security Issues in Mobile Cloud Computing; International Conference on Signal Processing and Machine Learning (CONF-SPML)*, Nov 2021; DOI: 10.1109/CONF-SPML54095.2021.00032
- 5.4.f Nahla F. Omran, Sara A. Lotfy, Elnomery A. Zanaty: A Systematic review of Mobile cloud computing Applications and its impact on Learning and Big data; *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, Vol.13, No 02, 2022
- 5.4.g Ghadeer Alwafi, Mona Alrougi, Rahaf Alsulami, Shaimaa Salama: A Survey of Mobile Cloud Computing Challenges and Solutions; *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*; Vol. 7, Issue 3, Mar 2021; <https://doi.org/10.31871/IJNTR.7.3.6>

18.6 Fog Computing und Artificial Intelligence

Fog Computing (FC) kann als Ergänzung von Cloud Computing im IoT angesehen werden [Abschnitt 17.1]. Die Funktionen von FC werden im IoT durch eine horizontal verteilte große Menge von Fog Nodes, einer Art Mini-Clouds, entlang des Internet-Kontinuums zwischen Clouds und Things in die Nähe seiner Benutzer und somit der IoT-Devices gebracht. FC führt also zu einer Verteilung von Computing-Ressourcen. Dadurch können diese überall möglichst nah an Benutzern und IoT-Devices platziert werden. Die am Internet Edge entlang platzierten Computing-Ressourcen tragen dazu bei, dass die 'Intelligenz' verteilter Systeme aus IoT-Clouds zu den diese benötigten 'IoT-Objekten' hin bewegt werden kann.

Bedeutung von Fog Computing im IoT

Fog Computing stellt eine Computing-Architektur dar, die für am Internet Edge installierten IoT-Objekten die von ihnen benötigte, zusätzliche Intelligenz 'liefert'. Dadurch können diese Objekte lokal und alternativ zu Cloud Computing einige intelligente Funktionen durchführen. Aus diesem Grund gewinnen die von Fog Nodes am Internet Edge erbrachte künstliche Intelligenz (*Artificial Intelligence*, AI) und ihr maschinelles Lernen (*Machine Learning*, ML) ständig an Bedeutung. Mittels Fog Nodes können auch diverse Microservices, u.a. welche mit VNFs, am Internet Edge verfügbar gemacht werden.

Fog Computing: 'Lieferant' der Intelligenz für IoT-Objekte

Die Idee, Intelligenz und Verarbeitungsfähigkeiten möglichst in direkter Nähe des Internet Edge zu positionieren, wird auch bei Edge Computing verfolgt. Fog Computing und Edge Computing unterscheiden sich hauptsächlich darin, wo genau die Intelligenz und Rechenleistung erbracht werden. Mit Fog Computing kann diese Funktionalität überall im Internet-Kontinuum zwischen IoT Clouds und Internet Edge erbracht werden. Mit Edge Computing wird sie direkt am Internet Edge erbracht – und zwar oft in IoT Access Gateways. Um mobilen Endeinrichtungen in 5G-Mobilfunknetzen Intelligenz und Unterstützung bei der Informationsverarbeitung bereitzustellen, werden spezielle Clouds am Internet Edge in Basisstationen dieser Netze installiert. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Mobile Edge Computing* (MEC).

Edge Computing, Mobile Edge Computing

Auf Fog Computing bzw. (Mobile) Edge Computing und der Nutzung von AI basieren die Networking Trends: *Time-Sensitive IoT / 5G Applications*, *Intelligent IoT*, *Cognitive IoT*, *Ambient Intelligence in IoT* und *IoT Service Orchestration*. Für weitere Information über Fog Computing und die Bedeutung von Artificial Intelligence (AI) bei Fog Computing siehe:

- 6.a i-SCOOP: Edge computing and IoT 2018 – when intelligence moves to the edge
- 6.b i-SCOOP: Fog computing: fog and cloud along the Cloud-to-Thing continuum
- 6.c i-SCOOP: Artificial intelligence (AI) and cognitive computing: what, why and where
- 6.d i-SCOOP: The interaction and convergence of IoT and AI at work
- 6.e Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, Sateesh Addepalli: Fog Computing and Its Role in the Internet of Things; Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC '12), Aug 2012; DOI: 10.1145/2342509.2342513

- 6.f Ivan Stojmenovic, Sheng Wen: The fog computing paradigm: Scenarios and security issues; *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Sep 2014; DOI: 10.15439/2014F503
- 6.g Shanhe Yi, Cheng Li, Qun Li: Survey of Fog Computing: Concepts, Applications and Issues; *Mobidata'15, Proceedings of the 2015 Workshop on Mobile Big Data*, Jun 2015, DOI: 10.1145/2757384.2757397
- 6.h Yifan Wang, Tetsutaro Uehara, Ryoichi Sasaki: Fog computing: Issues and challenges in security and forensics; *IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference*, Vol. 3, Jul 2015; DOI: 10.1109/COMPSAC.2015.173
- 6.i Tom H. Luan, et al.: Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge; Mar 2016; arXiv:1502.01815v3
- 6.j Lav Gupta, Raj Jain, H. Anthony Chan: Mobile Edge Computing – An Important Ingredient of 5G Networks; Mar 2016
- 6.k Firas Al-Doghman, et al.: A review on Fog Computing technology; *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Oct 2016; DOI: 10.1109/SMC.2016.7844455
- 6.l Eva Marín Tordera, et al.: What is a Fog Node? A Tutorial on Current Concepts towards a Common Definition; Nov 2016; arXiv:1611.09193v1
- 6.m Farhoud Hosseinpour, et al.: A Review on Fog Computing Systems; *International Journal of Advancements in Computing Technology(IJACT)*, Vol. 8(5), Dec 2016
- 6.n Mung Chiang, Tao Zhang: Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities; *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3(6), Dec 2016; DOI: 10.1109/JIOT.2016.2584538
- 6.o Arwa Alrawais, Abdulrahman Althothaily, Chunqiang Hu, Xiuzhen Cheng: Fog Computing for the Internet of Things: Security and Privacy Issues; *IEEE Internet Computing*, Vol. 21(2), Mar-Apr 2017; DOI: 10.1109/MIC.2017.37
- 6.p Mithun Mukherjee, et al.: Security and Privacy in Fog Computing: Challenges; *IEEE Access*, Vol. 5, Sep 2017; DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2749422
- 6.q Redowan Mahmud, Ramamohanarao Kotagiri, Rajkumar Buyya: Fog Computing: A Taxonomy, Survey and Future Directions; arXiv:1611.05539v4, Oct 2017; DOI: 10.1007/978-981-10-5861-5_5
- 6.r Saad Khan, Simon Parkinson, Yongrui Qin: Fog computing security: a review of current applications and security solutions; *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, Vol. 6(1), 2017c DOI 10.1186/s13677-017-0090-3
- 6.s Carla Mouradian, et al.: A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-art and Research Challenges; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Oct 2017; DOI: 10.1109/COMST.2017.2771153
- 6.t Pengfei Hu, Sahraoui Dhelim, Huansheng Ning, Tie Qiu: Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues; *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 98, Nov 2017; DOI: 10.1016/j.jnca.2017.09.002

- 6.u David Bermbach, et al.: A Research Perspective on Fog Computing; Workshop on IoT Systems Provisioning and Management for Context-Aware Smart Cities; Nov 2017
- 6.v Shubha Brata Nath, Harshit Gupta, Sandip Chakraborty, Soumya K Ghosh: A Survey of Fog Computing and Communication: Current Researches and Future Directions; Apr 2018; arXiv:1804.04365v1
- 6.w Ranesh Kumar Naha, et al.: Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions, Jul 2018; arXiv:1807.00976v1
- 6.x Marcus Gomes, Miguel L. Pardal: Cloud vs Fog: assessment of alternative deployments for a latency-sensitive IoT application; *Procedia Computer Science*, Vol. 130, 2018; DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.059
- 6.y Jaspreet Kaur, Prabhpreet Kaur: A Review: Artificial Neural Network; *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 8(4), July/Aug 2018; DOI: 10.14741/ijcet/v.8.4.2
- 6.z Anatol Badach: Fog Computing; *Fog Computing*; In book: *Protokolle und Dienste der Informationstechnologie: WEKA*, Ed. Heinz Schulte, Aug 2018
- 6.A Zhuo Zou, Yi Jin, Paavo Nevalainen, Yuxiang Huan, Jukka Heikkonen, Tomi Westerlund: Edge and Fog Computing Enabled AI for IoT-An Overview; *IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*; Mar 2019; DOI: 10.1109/AICAS.2019.8771621
- 6.B Mattia Antonini, Massimo Vecchio, Fabio Antonelli: Fog Computing Architectures: A Reference for Practitioners; *IEEE Internet of Things Magazine*, Vol. 2, Issue 3, Sep 2019; DOI: 10.1109/IOTM.0001.1900029
- 6.C M. Arif Khan: Fog Computing in 5G Enabled Smart Cities: Conceptual Framework, Overview and Challenges; *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*; Oct 2019, DOI: 10.1109/ISC246665.2019.9071695
- 6.D Koen Tange, Michele De Donno, Xenofon Fafoutis, Nicola Dragoni: A Systematic Survey of Industrial Internet of Things Security: Requirements and Fog Computing Opportunities; *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 22, Issue 4, Jul 2020; DOI: 10.1109/COMST.2020.3011208

18.6.1 Time-Sensitive IoT/5G Applications

Es gibt einige intelligente IoT Applications, die in gewisser Weise zeitempfindlich (zeitsensitiv, *time sensitive*) sind. Sie werden häufig *Time-Sensitive Applications* genannt. Zu dieser Gruppe gehören auch einige intelligente Applikationen, die in 5G-Mobilfunknetzen realisiert werden. Dies zu ermöglichen, ist die wesentliche Aufgabe von Edge und Fog Computing. Für weitere Information über zeitempfindliche IoT/5G-Applikationen siehe:

Bedeutung von
Edge und Cloud
Computing

- 6.1.a ETSI GS MEC 002 v1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC): Technical Requirements; Mar 2016
- 6.1.b ETSI GS MEC 003 v1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC): Framework and Reference Architecture; Mar 2016

- 6.1.c Rodrigo Roman, Javier Lopez, Masahiro Mambo: Mobile Edge Computing, Fog et al.: A Survey and Analysis of Security Threats and Challenges; arXiv:1602.00484v2, Nov 2016
- 6.1.d Ashkan Yousefpour, Genya Ishigaki, Jason P. Jue: Fog Computing: Towards Minimizing Delay in the Internet of Things; IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE), Jun 2017; DOI: 10.1109/IEEE.EDGE.2017.12
- 6.1.e Gaolei Li, Jianhua Li, and Jun Wu: Fog-enabled Edge Learning for Cognitive Content-Centric Networking in 5G; arXiv:1808.09141v1, Aug 2018
- 6.1.f Ali Alnoman: Supporting Delay-Sensitive IoT Applications: A Machine Learning Approach; IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE); Sep 2020; DOI: 10.1109/CCECE47787.2020.9255800
- 6.1.g Harindu Korala, Dimitrios Georgakopoulos, Prem Prakash Jayaraman, Ali Yavari: Managing Time-Sensitive IoT Applications via Dynamic Application Task Distribution and Adaptation; Remote Sensing, Vol. 13 Issue 20, Oct 2021; DOI: 10.3390/rs13204148
- 6.1.h Ume Kalsoom Saba, Saif ulIslam, Humaira Ijaz, Joel J. P. C. Rodrigues, Abdullah Gani, Kashif Munir: Planning Fog networks for time-critical IoT requests; Computer Communications, Vol. 172, Apr 2021; DOI:10.1016/j.comcom.2021.03.002

18.6.2 Intelligent IoT, Cognitive IoT

Intelligent IoT

Ein wichtiger Trend bei der Weiterentwicklung von IoT trägt dazu bei, künstliche Intelligenz (*Artificial Intelligence*, AI) und die in IoT-Clouds gesammelten, immensen Datenmengen, sog. *Big Data*, im IoT zu analysieren (*Big Data Analytics*). Die Ergebnisse dieser Analysen sollen nicht nur dazu dienen, verschiedene IoT-Komponenten und -Objekte zum Erfassen von Informationen zu befähigen, damit sie diese Menschen signalisieren/anzeigen und die Informationen von Menschen genutzt werden. Die IoT-Komponenten und -Objekte sollen mittels der erfassten Informationen auch selbst lernen und sich dadurch in die Lage versetzen, intelligent (so wie Menschen, aber ohne menschliche Hilfe) auf verschiedene Situationen und plötzlich auftretende Ereignisse zu reagieren. Besäße das IoT die eben geschilderten Fähigkeiten, würde man von *Intelligent IoT* (IIoT) sprechen.

Cognitive IoT

Die sog. *kognitiven Fähigkeiten* des Menschen ermöglichen es ihm, Signale aus der Umwelt wahrzunehmen und weiterzuverarbeiten. Da die Fähigkeiten von Intelligent IoT im Wesentlichen den kognitiven Fähigkeiten des Menschen entsprechen, wird es auch als *Cognitive IoT* (CIoT) bezeichnet. Es sei hervorgehoben, dass AI, (Big) Data Analytics, Cloud Computing und Fog Computing als die vier wichtigsten treibenden Kräfte, quasi als 'Zugpferde' einer IoT-Quadriga [Abb. 18.11-1], bei der IoT-Weiterentwicklung zum Intelligent IoT angesehen werden können.

Für detailliertere Information über Cognitive IoT und Intelligent IoT siehe:

- 6.2.a Charith Perera, Arkady Zaslavsky, Peter Christen, Dimitrios Georgakopoulos: Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey; IEEE

- Communications Surveys & Tutorials, Vol. 16(1), First Quarter 2014, DOI: 10.1109/SURV.2013.042313.00197
- 6.2.b Qihui Wu, et al.: Cognitive Internet of Things: A New Paradigm beyond Connection; Mar 2014; arXiv:1403.2498v1
- 6.2.c Djallel Eddine Boubiche, et al.: Advanced Industrial Wireless Sensor Networks and Intelligent IoT; IEEE Communications Magazine, Vol. 56(2), Feb 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2018.8291108
- 6.2.d Omer Berat Sezer, Erdogan Dogdu, Ahmet Murat Ozbayoglu: Context-Aware Computing, Learning, and Big Data in Internet of Things: A Survey; IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5(1), Feb 2018; DOI: 10.1109/JIOT.2017.2773600
- 6.2.e Nadeem Javaid, Arshad Sher, Hina Nasir, Nadra Guizani: Intelligence in IoT-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges; IEEE Communications Magazine, Vol. 56(10), Oct 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2018.1800036
- 6.2.f Yin Zhang, Xiao Ma, Jing Zhang, M. Shamim Hossain, Ghulam Muhammad, Syed Umar Amin: Edge Intelligence in the Cognitive Internet of Things: Improving Sensitivity and Interactivity; IEEE Network, Vol. 33, Issue 3, May/June 2019; DOI: 10.1109/MNET.2019.1800344
- 6.2.g Khondokar Fida Hasan, Tarandeep Kaur, Md. Mhedi Hasan, Yanming Feng: Cognitive Internet of Vehicles: Motivation, Layered Architecture and Security Issues; International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI); Dec 2019; DOI: 10.1109/STI47673.2019.9068070
- 6.2.h Hao Song, Jianan Bai, Yang Yi, Jinsong Wu, Lingjia Liu: Artificial Intelligence Enabled Internet of Things: Network Architecture and Spectrum Access; IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 15, Issue 1, Feb 2020; DOI: 10.1109/MCI.2019.2954643
- 6.2.i Rahul Keru Patil, Suhas Shivilal Patil: Cognitive Intelligence of Internet of Things in Smart Agriculture Applications; IEEE Pune Section International Conference (PuneCon); Dec 2020; DOI: 10.1109/Pune-Con50868.2020.9362449
- 6.2.j William Grant Hatcher, Cheng Qian, Weichao Gao, Fan Liang, Kun Hua, Wei Yu: Towards Efficient and Intelligent Internet of Things Search Engine; IEEE Access, Vol. 9, Jan 2021; DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052759
- 6.2.k Chao Zhang: Intelligent Internet of things service based on artificial intelligence technology IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE), Mar 2021; DOI: 10.1109/ICBAIE52039.2021.9390061
- 6.2.l Dinh C. Nguyen, Ming Ding, Pubudu N. Pathirana, Aruna Seneviratne, Jun Li, H. Vincent Poor: Federated Learning for Internet of Things: A Comprehensive Survey; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 23, Issue 3, Apr 2021; DOI: 10.1109/COMST.2021.3075439
- 6.2.m Fayaz Ahmad Fayaz, Arun Malik, Arshad Ahmad Yatoo: Cognitive Internet of things (CIoT) a success for data collection; Sixth International

Conference on Image Information Processing (ICIIP), Nov 2021; DOI: 10.1109/ICIIP53038.2021.9702706

- 6.2.n Yuan Li, Wai Chen, Yu Ding, Yakun Qie, Chuntian Zhang: A Vision of Intelligent IoT — Trends, Characteristics and Functional Architecture; *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Jun 2022; DOI: 10.1109/IWCMC55113.2022.9824304

18.6.3 Ambient Intelligence in IoT

Basis für
'intelligente'
Umgebungen

Ein wichtiges Ziel der IoT-Entwicklung ist die Verbesserung der Lebensqualität von Menschen. Dies bedeutet, dass Intelligent IoT eine Intelligenz, die sich auf das direkte Lebensumfeld von Menschen bezieht, besitzen muss. Diese wird als *Umweltintelligenz* bzw. *Ambient Intelligence* (AmI) bezeichnet. Ein Beispiel für die Verbesserung der Lebensqualität von Menschen dank AmI im IoT ist *Ambient Assisted Living* (AAL). Als AAL wird ein IoT-Service verstanden, mit dem der Alltag älterer oder gesundheitlich benachteiligter Personen situationsabhängig und unaufdringlich unterstützt werden kann.

Für detaillierte Informationen über Bedeutung von Ambient Intelligence in IoT sei verwiesen auf:

- 6.3.a Emile Aarts, Boris de Ruyte: *New research perspectives on Ambient Intelligence*; *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, Vol. 1(1), 2009; DOI: 10.3233/AIS-2009-0001
- 6.3.b A. Dohr, R. Modre-Osprian, M. Drobits, D. Hayn, G. Schreier: *The Internet of Things for Ambient Assisted Living*; *Seventh International Conference on Information Technology: New Generations*, Apr 2010; DOI: 10.1109/IT-NG.2010.104
- 6.3.c Kun Wang, Yun Shao, Lei Shu, Guangjie Han, Chunsheng Zhu: *LDDPA: A Local Data Processing Architecture in Ambient Assisted Living Communications*; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53(1), Jan 2015; DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010516
- 6.3.d Rodrigo Schmitt Meurer, Antônio Augusto Fröhlich, Jomi Fred Hübner: *Ambient Intelligence for the Internet of Things Through Context-Awareness*; *International Symposium on Rapid System Prototyping (RSP)*; Oct 2018; DOI: 10.1109/RSP.2018.8631989
- 6.3.e Carles Gomez, Stefano Chessa, Anthony Fleury, George Roussos, Davy Preuveneers: *Internet of Things for enabling smart environments: A technology-centric perspective*; *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*; Vol. 11, No 1, Jan 2019; DOI 10.3233/AIS-180509
- 6.3.f Hakilo Sabit, Peter Han Joo Chong, Jeff Kilby: *Ambient Intelligence for Smart Home using The Internet of Things*; *29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, Nov 2019; DOI: 10.1109/IT-NAC46935.2019.9078001

18.6.4 IoT Service Orchestration

Müssen im IoT mehrere Fog Nodes beispielsweise von einer Cloud koordiniert werden, so ist die Nutzung von SDN fast unabdingbar. Bei einem Einsatz von SDN zur Unterstützung von Fog Computing spricht man von *SDN-enabled Fog Computing*. Diese besondere Art von Fog Computing besteht in der Konfigurierung und Steuerung der Fog Nodes durch SDN Controller. Wird ein IoT Service von mehreren Fog Nodes erbracht, so müssen diese entsprechend koordiniert werden, zum Beispiel von einem SDN Controller, der in einer Cloud untergebracht werden kann. Dies kann als eine Art 'IoT-Service-Orchestrierung' angesehen werden. Für Näheres darüber siehe:

Voraussetzung
für flexible
IoT-Services

- 6.4.a Harshit Gupta, et al.: SDFog: A Software Defined Computing Architecture for QoS Aware Service Orchestration over Edge Devices; Sep 2016; arXiv:1609.01190v1
- 6.4.b Karima Velasquez, et al.: Fog orchestration for the Internet of Everything: state-of-the-art and research challenges; *Journal of Internet Services and Applications*, Jul 2018; DOI: 10.1186/s13174-018-0086-3
- 6.4.c Ola Salman, Imad Elhadj, Ali Chehab, Ayman Kayssi: IoT Survey: An SDN and Fog Computing Perspective; *Computer Networks*, Vol. 143, Jul 2018; DOI: 10.1016/j.comnet.2018.07.020
- 6.4.d José Santos, Tim Wauters, Bruno Volckaert, Filip De Turck: Fog Computing: Enabling the Management and Orchestration of Smart City Applications in 5G Networks; *Entropy*, Vol. 20(1), Jan 2018; DOI:10.3390/e20010004
- 6.4.e Nam Yong Kim, et al.: CF-CloudOrch: container fog node-based cloud orchestration for IoT networks; *The Journal of Supercomputing*, Jul 2018c DOI: 10.1007/s11227-018-2493-4
- 6.4.f Salman Taherizadeh, Vlado Stankovski, Marko Grobelni: A Capillary Computing Architecture for Dynamic Internet of Things: Orchestration of Microservices from Edge Devices to Fog and Cloud Providers; *Sensors*, Vol. 18(9), Sep 2018.
- 6.4.g Wajid Rafique, Xuan Zhao, Shui Yu, Ibrar Yaqoob, Muhammad Imran, Wanchun Dou: An Application Development Framework for Internet-of-Things Service Orchestration; *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 7, Issue 5, May 2020; DOI: 10.1109/JIOT.2020.2971013
- 6.4.h Daniil Ermolenko, Claudia Kilicheva, Ammar Muthanna, Abdulkodir Khakimov: Internet of Things Services Orchestration Framework Based on Kubernetes and Edge Computing; *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Jan 2021; DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396553
- 6.4.i Nor Syazwani Mohd Pakhrudin, Murizah Kassim, Azlina Idris: A review on orchestration distributed systems for IoT smart services in fog computing; *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 11, No. 2, Apr 2021; DOI: 10.11591/ijece.v11i2.pp1812-1822
- 6.4.j Jen-Sheng Tsai, I-Hsun Chuang, Jie-Jyun Liu, Yau-Hwang Kuo, Wanjiun Liao: QoS-Aware Fog Service Orchestration for Industrial Internet of Things; *IEEE*

Transactions on Services Computing, Vol. 15, Issue 3, May-Jun 2022; DOI: 10.1109/TSC.2020.2978472

18.7 Next 5G und 6G (Generation) Mobile Networks

Was bedeutet 5G?

Mit 5G wird die auf die UMTS-Technologie folgende Generation von Mobilfunknetzen bezeichnet. Seit nunmehr 2020 stehen Mobilfunknetze der 5. Generation zur Verfügung.

5G als Ergänzung zu 4G

Die 5G-Mobilfunknetze, als aktuelle Generation zellularer Mobilfunknetze, haben die 4G-Mobilfunknetze nicht ersetzt, sondern ergänzen diese mit erheblich höheren Übertragungskapazitäten und geringeren Latenzzeiten. 5G-Mobilfunknetze können auf Basis kleiner Zellen eingerichtet werden und ermöglichen eine Übertragung von Daten über kurze Entfernungen mit großen, in Bereich von Gbit/s liegenden Bitraten. Mit einer breiten Verfügbarkeit von 5G-Mobilfunknetzen wird eine Netzwerkarchitektur geschaffen, die den vielfältigen Anforderungen des IoT sehr gerecht wird.

Auf dem Gebiet 5G Mobile Networks sind insbesondere die Networking-Trends *5G-enabled Mobile IoT Applications*, *Vehicle-to-Everything (V2X) Services*, *SDN and NFV for 5G Mobile Networks*, *5G Network Slicing* und *5G Security* hervorzuheben. Ergänzend sei bemerkt, dass die Ideen für die Realisierung der nach 5G folgenden, zukünftigen Generation (6G) der Mobilfunknetze bereits entwickelt werden.

- 7.a IEEE SPECTRUM: What Does Every Engineer Need to Know about 5G?
- 7.b SDxCentral: Defining 5G Architecture
- 7.c Chih-Lin I, Corbett Rowell, Shuangfeng Han, Zhikun Xu, Gang Li, Zhengang Pan: Toward green and soft: a 5G perspective; IEEE Communications Magazine, Vol. 52(2), Feb 2014; DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736745
- 7.d Patrick Kwadwo Agyapong, et al.: Design considerations for a 5G network architecture; IEEE Communications Magazine, Vol. 52(11), Nov 2014; DOI: 10.1109/MCOM.2014.6957145
- 7.e NGMN Alliance: 5G White Paper - Executive Version; Dec 2014
- 7.f Akhil Gupta, Rakesh Kumar Jha: A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies; IEEE Access, Vol. 3, Jul 2015; DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2461602
- 7.g Huawei Technologies: 5G Network Architecture: A High-Level Perspective; Technical Report, 2016
- 7.h Mamta Agiwal, Abhishek Roy, Navrati Saxena: Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, Issue 3, Feb 2016; DOI: 10.1109/COMST.2016.2532458
- 7.i 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture, Version 1.0; Technical Report, Version 1.0, Jul 2016

- 7.j Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): 5G-Strategie für Deutschland: Eine Offensive für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für 5G-Netze und -Anwendungen; Juli 2017
- 7.k 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture; Version 2.0; Technical Report, Jul 2017
- 7.l Ian F. Akyildiz, Shuai Nie, Shih-Chun Lin, Manoj Chandrasekaran: 5G roadmap: 10 key enabling technologies; Computer Networks, Vol. 106, 4 Sep 2016; DOI: 10.1016/j.comnet.2016.06.010
- 7.m 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture; Technical Report, Version 2.0, Jun 2017
- 7.n ETSI TR 138 913 V14.3.0: 5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 14.3.0 Release 14); Oct 2017
- 7.o Rojeena Bajracharya, et al.: LWA in 5G: State-of-the-Art Architecture, Opportunities, and Research Challenges; IEEE Communications Magazine, Vol. 56(10), Oct 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2018.1701177

18.7.1 5G-enabled Mobile IoT Applications

In zellularen 5G-Mobilfunknetzen werden Funktechnologien genutzt, in denen Signale im elektromagnetischen Spektrum im Millimeterbereich verwendet werden. 5G-Mobilfunknetze basieren also auf der Ausbreitung von sog. Millimeterwellen. Hierdurch sind in diesen mobilen Netzen kleine Zellen und große Übertragungsgeschwindigkeiten möglich. Und aus diesem Grund werden 5G-Mobilfunknetze bis zu 100 Mal schneller als bestehende 4G-Mobilfunknetze sein. Dies wird von großer Bedeutung bei der Integration von 5G-Mobilnetztechnologien in das IoT sein – insbesondere für Industrial IoT (IIoT) – und bestimmte andere Branchen, z.B. die Landwirtschaft. Die soeben erwähnten, IoT-relevanten Besonderheiten der 5G-Mobilnetztechnologien werden mit den drei Begriffen eMBB, URLLC und mMTC umschrieben. Dabei steht:

- **eMBB** (*enhanced Mobile Broadband*) für ein erweitertes mobiles Breitband (Nutzung von Millimeterwellen),
- **URLLC** (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) für sehr zuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz und
- **mMTC** (*massive Machine Type Communications*) für ein breites Spektrum von IoT-Einsatzmöglichkeiten.

Eine besonders wichtige 5G-Netztechnologie ist eine optische Übertragungstechnik, die als LiFi (*Light Fidelity*) bezeichnet wird. Sie wird zukünftig der lokalen Kommunikation, z.B. Realisierung von IoT-Services in großen Räumen, dienen können. LiFi stellt eine neue drahtlose Datenübertragungstechnik dar, die das Infrarot- und sichtbare Lichtspektrum nutzt und eine schnelle, bidirektionale drahtlose lokale Kommunikation ermöglicht. Mit LiFi ist eine Übertragungsgeschwindigkeit von 8 Gbit/s erreichbar. Für nähere Informationen über LiFi siehe [7.1.i].

eMBB, URLLC und mMTC als Merkmale von 5G-Mobilfunknetzen

Bedeutung von LiFi

Internet of
Everything

Die Integration neuer 5G-Mobilfunknetze in das IoT kann zu einer Erweiterung von IoT führen, bei der von *Internet of Everything* (IoE) gesprochen werden wird. Für weitere Information über verschiedene Arten von 5G-enabled Mobile IoT Applications siehe:

- 7.1.a i-SCOOP: 5G and IoT in 2018 and beyond: the mobile broadband future of IoT
- 7.1.b Doruk Sahinel, et al.: Beyond 5G Vision for IOLITE Community; IEEE Communications Magazine, Vol. 55(1), Jan 2017, DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600372CM
- 7.1.c Sotirios K. Goudos, et al.: A survey of IoT Key Enabling and Future Technologies: 5G, Mobile IoT, Semantic Web and Applications; Wireless Personal Communications, Jul 2017; DOI: 10.1007/s11277-017-4647-8
- 7.1.d Godfrey Akpakwu, et al.: A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges; IEEE Access, Vol. 5(12), Dec 2017; DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2779844
- 7.1.e Yuh-Shyan Chen, Yi-Ting Tsai: A Mobility Management Using Follow-Me Cloud-Cloudlet in Fog-Computing-Based RANs for Smart Cities; Sensors, Vol. 18(2), Feb 2018; DOI: 10.3390/s18020489
- 7.1.f Shancang Li, Li Da Xu, Shanshan Zhao: 5G Internet of Things: A Survey; Journal of Industrial Information Integration, Vol. 10, Jun 2018, DOI: 10.1016/j.jii.2018.01.005
- 7.1.g By Biswa P. S. Sahoo, et al.: Enabling Millimeter-Wave 5G Networks for Massive IoT Applications; Aug 2018, arXiv:1808.04457v1
- 7.1.h Nadeem Javaid, Arshad Sher, Hina Nasir, Nadra Guizani: Intelligence in IoT-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges; IEEE Communications Magazine, Vol. 56(10), Oct 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2018.1800036
- 7.1.i Harald Haas: LiFi is a paradigm-shifting 5G technology; Reviews in Physics, Vol. 3, Nov. 2018, DOI: 10.1016/j.revip.2017.10.001
- 7.1.j Quoc-Viet Pham, Fang Fang, Vu Nguyen Ha, Md. Jalil Piran, et al: A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art; IEEE Access, Vol. 8, Jun 2020; DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001277

18.7.2 Vehicle-to-Everything (V2X) Services

Bedeutung
von V2X

In naher Zukunft wird es verschiedene autonom, d.h. ohne einen menschlichen Fahrer, fahrende Fahrzeuge geben. Um unfallfreies autonomes Fahren zu gewährleisten, sind aber noch diverse technische Probleme zu lösen. Flächendeckend muss eine besondere, als IoV (*Internet of Vehicles*) bezeichnete Variante von IoT eingerichtet werden. Dabei werden die 5G-Mobilfunknetze eine enorm große Rolle spielen. Jedes autonom fahrende Fahrzeug muss in der Lage sein, alles was auf Straßen passieren kann, wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Das lässt sich nur dadurch erreichen, dass jedes autonom fahrende Vehikel nicht nur mit anderen Fahrzeugen, sondern mit allen

Dingen unterwegs auf eine spezielle Art und Weise kommunizieren kann. Diese Art der Kommunikation soll durch sog. *Vehicle-to-Everything* (V2X) Services ermöglicht werden.

Zum sicheren autonomen Fahren müssen Fahrzeuge mit anderen Fahrzeugen (V2V), mit der angrenzenden Infrastruktur (V2I), mit Internet-basierten Netzwerken (V2N) und auch mit Fußgängern (V2P) kommunizieren können. Daher sind die soeben genannten Arten der Kommunikation – V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*), V2N (*Vehicle-to-Network*) und V2P (*Vehicle-to-Pedestrian*) – die funktionellen Bestandteile von V2X. Somit ist V2X als Oberbegriff für V2V, V2I, V2N und V2P anzusehen.

V2X als Oberbegriff für V2V, V2I, V2N und V2P

Für Näheres über V2X siehe:

- 7.2.a Dino Flore: 5G V2X: The automotive use-case for 5G; 2017
- 7.2.b Mate Boban, et al.: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for 5G V2X; Dec 2017, arXiv:1712.01754v1
- 7.2.c Claudia Campolo, et al.: 5G Network Slicing for Vehicle-to-Everything Services; IEEE Wireless Communications, Vol. 24(6), Dec 2017; DOI: 10.1109/MWC.2017.1600408
- 7.2.d 5G Americas White Paper: Cellular V2X Communications Towards 5G; March 2018
- 7.2.e Claudia Campolo, Antonella Molinaro, Antonio Iera, Ramon R. Fontes, Christian E. Rothenberg: Towards 5G Network Slicing for the V2X Ecosystem; IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops, Jun 2018; DOI: 10.1109/NETSOFT.2018.8459911
- 7.2.f Irena Šeremet, Samir Čaušević: Benefits of using 5G Network Slicing to implement Vehicle-to-Everything (V2X) technology; International Symposium INFOTEH-JAHORINA, Mar 2019; DOI: 10.1109/INFOTEH.2019.8717780
- 7.2.g Jie Mei, Xianbin Wang, Kan Zheng: Intelligent Network Slicing for V2X Services Toward 5G; IEEE Network, Vol. 33, Issue 6, Nov -Dec 2019; DOI: 10.1109/MNET.001.1800528
- 7.2.h Md. Noor-A-Rahim, Zilong Liu, Haeyoung Lee, Mohammad Omar Khyam, et al: 6G for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications: Enabling Technologies, Challenges, and Opportunities: Proceedings of the IEEE, Vol. 110, Issue 6, Jun 2022; DOI: 10.1109/JPROC.2022.3173031

18.7.3 SDN and NFV for 5G Mobile Networks

Die beiden Konzepte SDN (*Software-Defined Networking*) und NFV (*Network Functions Virtualization*) gelten als neue, sich gegenseitig ergänzende Entwicklungstrends auf dem Gebiet Networking und haben einen großen Einfluss auf die Entwicklungen von 5G Mobile Communications. Mit SDN ist es auf der Grundlage von 5G-Netzwerktechnologien möglich, private 5G-Netzwerke (*private 5G Networks*) zur Unterstützung von Multimedia- und Gruppenkommunikation, z.B. in einem Unternehmen, einzurichten. Um private 5G-Netzwerke einrichten zu können, werden sehr

SDN-enabled 5G private Netze

häufig verschiedene virtualisierte netzwerkspezifische Funktionen, sog. VNFs (*Virtualized Network Functions*), eingesetzt. Das SDN-Konzept eignet sich ideal zur Einrichtung eines 5G-Netzwerkes auf Basis von VNFs, zu dessen Management und Adaption an aktuellen Anforderungen. In diesem Zusammenhang kann von 'SD-enabled 5G Private Networks' gesprochen werden.

Für weitere Informationen darüber siehe:

- 7.3.a Junyu Lai, et al.: Software-defined cellular networking: A practical path towards 5G, *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*; Vol. 14(1), Jan 2015, DOI 10.1504/IJCND.2015.066019
- 7.3.b Ian F. Akyildiz, Pu Wang, Shih-Chun Lin: SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems; *Computer Networks*, Vol. 85, Jul 2015; DOI: 10.1016/j.comnet.2015.05.007
- 7.3.c Sherif Abdelwahab, Bechir Hamdaoui, Mohsen Guizani, Taieb Znati: Network function virtualization in 5G; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 54, Issue 4, Apr 2016; DOI: 10.1109/MCOM.2016.7452271
- 7.3.d Ricard Vilalta, et al.: SDN/NFV orchestration of multi-technology and multi-domain networks in cloud/fog architectures for 5G services; *21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, Jul 2016
- 7.3.e 5G PPP Software Networks WG: Vision on Software Networks and 5G; *White Paper*, Jan 2017
- 7.3.f Pedro Neves, et al.: Future mode of operations for 5G – The SELFNET approach enabled by SDN/NFV; *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54(4), Nov 2017; DOI: 10.1016/j.csi.2016.12.008
- 7.3.g Luis Tello-Oquendo, Ian Akyildiz, Shih-Chun Lin, Vicent Pla: SDN-Based Architecture for Providing Reliable Internet of Things Connectivity in 5G Systems; Jul 2018, HAL Id: hal-01832537
- 7.3.h Lu Ma, et al.: An SDN/NFV Based Framework for Management and Deployment of Service Based 5G Core Network; *China Communications*, Vol. 15(10), Oct. 2018; DOI: 10.1109/CC.2018.8485472
- 7.3.i Faqir Zarrar Yousaf, Michael Bredel, Sibylle Schaller, Fabian Schneider: NFV and SDN – Key Technology Enablers for 5G Networks; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 35, Issue 11, Nov 2017; DOI: 10.1109/JSAC.2017.2760418
- 7.3.j Srinivasan Sridharan: A Literature Review of Network Function Virtualization (NFV) in 5G Networks; *International Journal of Computer Trends and Technology*, Vol. 68, Issue 10, Oct 2020; DOI: 10.14445/22312803/IJCTT-V68I10P109

18.7.4 5G Network Slicing

(eine Art *Microservices*) isolierte Gruppen untereinander vernetzter VNFs gebildet werden. Eine isolierte Gruppe vernetzter VNFs kann ein privates 5G-Netzwerk bilden. Solch eine Vorgehensweise basiert auf der Realisierung von 5G Network Slicing, und es kommen dabei die Konzepte von SDN und *Network Functions Virtualization* (NFV) zum Einsatz. 5G Network Slicing wird allgemein als Schlüsseltechnologie zur Bildung spontaner, oft privater, an aktuelle Anforderungen anpassungsfähiger (*adaptiver*) 5G-Netzwerke angesehen.

Für weitere Informationen zu diesem Thema siehe:

- 7.4.a SDxCentral: What is Network Slicing?
- 7.4.b SDxCentral: What is Dynamic Network Slicing?
- 7.4.c Jose Ordonez-Lucena, et al.: Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55(5), May 2017; DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600935
- 7.4.d Xenofon Foukas, et al.: Network Slicing in 5G: Survey and Challenges; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55(5), May 2017, DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600951
- 7.4.e Xin Li, et al.: Network Slicing for 5G: Challenges and Opportunities; *IEEE Internet Computing*, Vol. 21(5) Sep 2017; DOI: 10.1109/MIC.2017.3481355
- 7.4.f Tony Saboorian, Amanda Xiang: Network Slicing and 3GPP Service and Systems Aspects (SA) Standard; *IEEE Softwarization*, Dec 2017
- 7.4.g Claudia Campolo, et al.: 5G Network Slicing for Vehicle-to-Everything Services; *IEEE Wireless Communications*, Vol. 24(6), Dec 2017; DOI: 10.1109/MWC.2017.1600408
- 7.4.h Bessem Sayadi, Laurent Roulet: 5G: Platform and Not Protocol, *IEEE Softwarization*, Jan 2018
- 7.4.i Emmanuel Dotaro: 5G Network Slicing and Security; *IEEE Softwarization*, Jan 2018
- 7.4.j Zbigniew Kotulski, Tomasz Wojciech Nowak, Mariusz Sepczuk, Marcin Tunia, et al: Towards constructive approach to end-to-end slice isolation in 5G networks; *EURASIP Journal on Information Security*, Vol. 2018, Mar 2018; DOI: 10.1186/s13635-018-0072-0
- 7.4.k Alexandros Kaloxylos: A Survey and an Analysis of Network Slicing in 5G Networks; *IEEE Communications Standards Magazine*, Vol. 2, Issue 1, Mar 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700072
- 7.4.l Ruihan Wen, Gang Feng, Jianhua Tang, Tony Q. S. Quek, Gang Wang, Wei Tan, Shuang Qin: On Robustness of Network Slicing for Next-Generation Mobile Networks; *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 67, Issue 1, Jan 2019; DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2868652
- 7.4.m Alcardo Alex Barakabitze, Arslan Ahmad, Rashid Mijumbi, Andrew Hines: 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges; *Computer Networks*, Vol. 167, Feb 2020; DOI: 10.1016/j.comnet.2019.106984

- 7.4.n Bin Han, Ji Lianghai, Hans D. Schotten: Slice as an evolutionary service: genetic optimization for inter-Slice resource management in 5G networks; IEEE Access, Vol. 6, Jun 2018; DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2846543
- 7.4.o Shunliang Zhang: An Overview of Network Slicing for 5G; IEEE Wireless Communications, Vol. 26, Issue 3, Jun 2019; DOI: 10.1109/MWC.2019.1800234

18.7.5 5G Network Security

5G Network
Slicing Security

In den zukünftigen 5G-Mobilfunknetzen kommen die Netzwerktechnologien SDN und NFV zum Einsatz, und darüber hinaus werden diese Mobilfunknetze in das IoT integriert. Aus diesem Grund müssen alle Schwachstellen und Bedrohungen, die in IoT, SDN und NFV vorkommen können, auch bei der Analyse der Sicherheit in 5G-Mobilfunknetzen berücksichtigt werden. Die Bildung von virtuellen privaten 5G-Netzwerken mit SDN und NFV, was man als *5G Network Slicing* bezeichnet, schafft dabei auch zusätzlich neue Sicherheitslücken und Bedrohungen. Folglich ist die Sicherheit in zukünftigen 5G-Mobilfunknetzen, kurz als *5G Security* bezeichnet, ein sehr wichtiges, breites und komplexes Forschungs- und Entwicklungsgebiet.

Daher muss die Analyse der Sicherheit in 5G-Mobilfunknetzen global und systematisch durchgeführt werden, um dabei möglichst sämtliche Sicherheitslücken und Bedrohungen zu erfassen und damit die entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen einplanen zu können.

Eine Sammlung von Sicherheitsrichtlinien zur Analyse der Sicherheit in 5G-Mobilfunknetzen ist in [5G PPP Security WG] und [3GPP TS 33.501x] enthalten. Für weitere Information zu '5G Security' ist zu empfehlen:

- 7.5.a 3GPP 5G Security
- 7.5.b Huawei White Paper: 5G Security: Forward Thinking
- 7.5.c SDxCentral: What Are the Top 5G Security Challenges?
- 7.5.d ITU-T: Security in Telecommunications and Information Technology; An overview of issues and the deployment of existing ITU-T Recommendations for secure telecommunications, September 2015
- 7.5.e 5G PPP Security WG: 5G PPP Phase 1 Security Landscape; Jun 2017
- 7.5.f Ijaz Ahmad, et al.: 5G Security: Analysis of Threats and Solutions; 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), Sep 2017; DOI: 10.1109/CSCN.2017.8088621
- 7.5.g Dongfeng Fang, Yi Qian, Rose Qingyang Hu: Security for 5G Mobile Wireless Networks; IEEE Access, Vol. 6, Dec 2017; DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2779146
- 7.5.h Emmanuel Dotaro: 5G Network Slicing and Security; IEEE Softwarization, Jan 2018

- 7.5.i Ijaz Ahmad, et al.: Overview of 5G Security Challenges and Solutions; IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(1), Mar 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700063
- 7.5.j 3GPP TS 33.501: Technical Specification Group Services and System Aspects; Security architecture and procedures for 5G system; Sep 2018
- 7.5.j Jiaying Yao, Zhigeng Han, Muhammad Sohail, Liangmin Wang: A Robust Security Architecture for SDN-Based 5G Networks; Future Internet, Vol. 11 Issue 4, Mar 2019; DOI: 10.3390/fi11040085

18.7.6 6G als zukünftige Vision der Mobilfunknetze

Obwohl die 5G-Mobilfunknetze noch nicht weitgehend im Einsatz sind, arbeiten führende Technologieunternehmen bereits an der Entwicklung des nächsten Meilensteins für die drahtlose universelle Kommunikation – dieser wird als sechste Generation (6G) der Mobilfunknetze bezeichnet. Ein wichtiges Ziel der Entwicklung der 6G-Mobilfunknetze ist es, verschiedene technische Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz (KI) in sich zu integrieren. Die 6G-Mobilfunknetze sollen adaptive Netzwerkarchitekturen mit allgegenwärtigen KI-Fähigkeiten bilden. Die Vision für 6G und seine technischen Grundlagen ist jedoch noch im Entstehen. Für fundierte Informationen über 6G-Mobilfunknetze sei verwiesen auf:

KI-fähige und
adaptive
Mobilfunknetze

- 7.6.a Marco Giordani, Michele Polese, Marco Mezzavilla, Sundeep Rangan, Michele Zorzi: Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies; arXiv:1903.12216v2, Feb 2020; DOI: 10.48550/arXiv.1903.12216
- 7.6.b Yifei Yuan, Yajun Zhao, Baiqing Zong, Sergio Parolari: Potential Key Technologies for 6G Mobile Communications; arXiv:1910.00730; Mar 2020; DOI: 10.48550/arXiv.1910.00730
- 7.6.c Mohammed H. Alsharif, Anabi Hilary Kelechi, Mahmoud A. Albreem, Shehzad Ashraf Chaudhry, M. Sultan Zia, Sunghwan Kim: Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions; Symmetry, Vol. 12, Issue 4, Apr 2020; DOI: 10.3390/sym12040676
- 7.6.d Pawani Porambage, Gürkan Gür, Diana Pamela Moya Osorio, Madhusanka Liyanage, Andrei Gurtov, Mika Ylianttil: The Roadmap to 6G Security and Privacy; IEEE Open Journal of the Communications Society, Vol. 2, May 2021; DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3078081
- 7.6.e Nei Kato, Bomin Mao, Fengxiao Tang, Yuichi Kawamoto, Jijia Liu: Ten Challenges in Advancing Machine Learning Technologies toward 6G; IEEE Wireless Communications, Vol. 27, Issue 3, Jun 2020; DOI: 10.1109/MWC.001.1900476
- 7.6.f Ian F. Akyildiz, Ahan Kak, Shuai Nie: 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems; IEEE Access, Vol. 8, Jul 2020; DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010896

- 7.6.g Guangyi Liu, Yuhong Huang, Na Li, Jing Dong, Jing Jin, Qixing Wang, Nan Li: Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030; *China Communications*, Vol. 17, Issue 9, Sep 2020; DOI: 10.23919/JCC.2020.09.008
- 7.6.h Alcardo Alex Barakabitze, Ray Walshe: SDN and NFV for QoE-driven multi-media services delivery: The road towards 6G and beyond networks; *Computer Networks*, Vol. 214, Sep 2022; DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109133
- 7.6.i Mohammed Banafaa, Ibraheem Shayea, Jafri Din, Marwan Hadri Azmi, Abdulaziz Alashbi, Yousef Ibrahim Daradkeh, Abdurraqeb Alhammadi: 6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities; *Alexandria Engineering Journal*, Sep 2022; DOI: 10.1016/j.aej.2022.08.017

18.8 Information-Centric Networking and Services

Host-Centric
Networking im
Internet

Das Internet dient heutzutage nicht nur der Kommunikation zwischen Rechnern, sondern ist ein universales Informationsnetz, d.h. quasi eine weltweit verteilte Informationsbasis. Da im Internet die Kommunikation zwischen Rechnern, sog. Hosts, heute aber noch im Vordergrund steht, ist es aktuell ein rechnerzentriertes Netz – also ein Host-Centric Network. Die Charakteristik eines rechnerzentrierten Netzes besteht darin, dass jede Internetadresse in der Form von URL (*Uniform Resource Locator*) bzw. von URI (*Uniform Resource Identifier*), in der Regel mithilfe von DNS, auf eine Host-Adresse aufgelöst (quasi abgebildet) werden muss. Das heutige DNS stellt de facto ein weltweit verteiltes Resolving-System von URLs bzw. URIs auf Host-Adressen dar. Man könnte aber ein anderes globales Resolving-System bzw. mehrere lokale, weltweite verteilte, kleinere Resolving-Systeme nutzen. Die Folge wäre u.a. beispielsweise Information-Centric Networking.

Information-
Centric
Networking
(ICN)

Damit das Internet zukünftig den stark wachsenden, mit einem universalen Informationsnetz verbundenen Herausforderungen gerecht werden kann, muss das ihm zugrunde liegende rechnerzentrierte Kommunikationsprinzip um ein neues, zukunftsweisendes Prinzip erweitert werden. Das Kommunikationsprinzip im Internet sollte in Zukunft nicht nur *Rechner-zentriert* (*Host-Centric*), sondern auch *Informations-zentriert* (*Information-Centric*) sein. Der Zugriff auf eine gewünschte Information sollte also nur durch die Angabe von deren Namen – und nicht die ihrer Lokation – erfolgen. In diesem Zusammenhang spricht man heute von *Information-Centric Networking* (ICN). Da Daten bzw. verschiedene Content-Arten (z.B. Audio, Video, Streaming Medien) allgemein betrachtet als Arten von Information anzusehen sind, werden als Synonyme für ICN häufig die Begriffe NDN (*Named Data Networking*) und CCN (*Content-Centric Networking*) verwendet.

Internet-Dual-
Mode:
'Host-Centric'
und 'Information-
Centric'

Es sei angemerkt, dass das Internet (theoretisch betrachtet) nach zwei Prinzipien, also 'Host-Centric' und 'Information-Centric', genutzt werden kann. Somit könnte es in einer Art Dual-Mode betrieben werden. Zu diesem Zweck müssen weitere Resolving-

Systeme – zusätzlich zum DNS – installiert werden. Mit deren Hilfe werden Informationsnamen, z.B. in Form von URNs (*Uniform Resource Names*), auf speziellen Containern, quasi Speicherplätzen, in denen auf die Rechnern mit gewünschten Informationen verwiesen wird, aufgelöst/abgebildet. Nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert das als ENUM bezeichnete Resolving von Telefonnummern auf IP-Adressen zwecks Internettelefonie [Abschnitt 5.7].

ICN ist ein neuer Ansatz, der über das Internet den direkten Zugriff auf mit eindeutigen Namen/Identifikationen versehene Informationen, unabhängig von deren Herkunft und aktueller Lokation im Internet ermöglicht, ohne hierfür vorher Verbindungen zu Rechnern mit diesen Informationen aufbauen zu müssen. Es wird in diesem Zusammenhang von *IC Services* (IC: Information-Centric) gesprochen. Die Erbringung verschiedener Arten von IC Services lässt sich gut mit dem Konzept *Location-to-Service Translation* (LoST) unterstützen. LoST kann dazu verwendet werden, mittels mobiler Endgeräte (Smartphones, Bordcomputern in Autos) unterwegs Informationen darüber zu erhalten, welche IoT-Services es in direkter Nähe gibt, damit diese daraufhin mit den mobilen Endgeräten abgerufen werden können.

LoST als Support
zu IC Services

Auf dem Konzept von ICN basieren u.a. die folgenden Networking-Trends: *Software-Defined ICN* (SD ICN), *IC Internet of Things* (IC IoT). Insbesondere sind *IC Services in Smart Cities* hervorzuheben. Diese eben genannten Trends werden mit dem Trend *Information-Centric Networking Security* (ICN Security) zusammengefasst. Für allgemeine Information darüber siehe:

- 8.a Aytac Azgin, Ravishankar Ravindran, Guoqiang Wang: A Scalable Mobility-Centric Architecture for Named Data Networking; Jun 2014; arXiv:1406.7049v1
- 8.b Marica Amadeo, Claudia Campolo, Antonella Molinaro, Giuseppe Ruggeri: Content-centric wireless networking: A survey; *Computer Networks*, Vol. 72, Oct 2014; DOI: 10.1016/j.comnet.2014.07.003
- 8.c RFC 7476: Information-Centric Networking: Baseline Scenarios, Mar 2015
- 8.d Anatol Badach: LoST - Location-to-Service Translation; In book: *Protokolle und Dienste der Informationstechnologie*; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Aug 2015; DOI: 10.13140/RG.2.1.4314.2887
- 8.e RFC 7927: Information-Centric Networking (ICN) Research Challenges; Jul 2016
- 8.f José Quevedo, et al.: On the application of contextual IoT service discovery in Information Centric Networks; *Computer Communications*, Vol. 89–90, Sep 2016; DOI: 10.1016/j.comcom.2016.03.011
- 8.g Marica Amadeo, et al.: Information-centric networking for M2M communications: Design and deployment; *Computer Communications*, Vol. 89–90, Sep 2016; DOI: 10.1016/j.comcom.2016.03.009
- 8.h Bin Da, Richard Li, Xiaofei Xu: ID Oriented Networking (ION) for IoT Interoperation; 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS), Jun 2017; DOI: 10.1109/GIOTS.2017.8016237
- 8.i Dennis Grewe, et al.: Information-Centric Mobile Edge Computing for Connected Vehicle Environments: Challenges and Research Directions; MECOMM '17

- Proceedings of the Workshop on Mobile Edge Communications, Aug 2017; DOI: 10.1145/3098208.3098210
- 8.j Cenk Gündogan, et al.: Information-Centric Networking for the Industrial IoT; ICN '17 Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking, Sep 2017; DOI 10.1145/3125719.3132099
- 8.k Bin Da, et al.: Identity/Identifier-Enabled Networks (IDEAS) for Internet of Things (IoT); 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Feb 2018; DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355102
- 8.l Chao Fang, Haipeng Yao, Zhuwei Wang, Wenjun Wu, Xiaoning Jin, F. Richard Yu: A Survey of Mobile Information-Centric Networking: Research Issues and Challenges; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 20, Issue 3, Feb 2018; DOI:10.1109/COMST.2018.2809670
- 8.m Rehmat Ullah, Syed Hassan Ahmed, Byung-Seo Kim: Information-Centric Networking With Edge Computing for IoT: Research Challenges and Future Directions; IEEE Access, Vol. 6, Dec 2018; DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2884536
- 8.n Keping Yu, Suyong Eum, Toshihiko Kurita, Qiaozhi Hua, Takuro Sato, Hide-nori Nakazato, Tohru Asami, Ved P. Kafle: Information-Centric Networking: Research and Standardization Status; IEEE Access, Vol. 7, Aug 2019; DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938586
- 8.o RFC 8763; Deployment Considerations for Information-Centric Networking (ICN), Apr 2020
- 8.p Armielle Noulapeu Ngaffo, Walid El Ayeb, Zièd Choukair: Information-Centric Networking Challenges and Opportunities in Service Discovery: A Survey; IEEE Eighth International Conference on Communications and Networking (ComNet), Oct 2020; DOI: 10.1109/ComNet47917.2020.9306088
- 8.q Boubakr Nour, Spyridon Mastorakis, Rehmat Ullah, Nicholas Stergiou: Information-Centric Networking in Wireless Environments: Security Risks and Challenges; IEEE Wireless Communications, Vol. 28, Issue 2, Apr 2021; DOI: 10.1109/MWC.001.2000245
- 8.r RFC 9139: Information-Centric Networking (ICN) Adaptation to Low-Power Wireless Personal Area Networks (LoWPANs); Nov 2021

18.8.1 Software-Defined ICN (SD ICN)

Software definierte, informationszentrische Netzwerke

Moderne Geräte wie Smartphones, Laptops und Tablets, die über drahtlose Netzwerke den Zugang zum Internet haben, werden immer beliebter. Sie ermöglichen den Benutzern Mobilität und Flexibilität beim Zugriff auf das Internet an jedem Ort (z.B. zu Hause, im Büro, in Geschäften, Autos) und zu jeder Zeit. Die Internet-Nutzung mithilfe dieser Geräte sollte in der Zukunft nicht nur wie heute rechnerzentrisch (Host-Centric) sein, sondern auch informationszentrisch (Information-Centric). Es sollte möglich sein, die gewünschte Information durch die Angabe ihrer strukturierten Namen – einer Art URNs (*Uniform Resource Names*) – aus dem Internet zu erhalten, ohne dabei eine Suchmaschine (wie z.B. Google) nutzen zu müssen. Um eine solche Wunschvorstellung zu verwirklichen, also ein ICN einzurichten, können einige Kon-

zepte aus dem Gebiet SDN (*Software-Defined Networking*) übernommen werden. Ist dies der Fall, spricht man von *Software-Defined ICN* (SD ICN). Dabei liefert SDN einige Ideen zur Bereitstellung von ICN-Architekturen und kann die Funktionalität und Verwaltung von ICNs erheblich vereinfachen. Für weitere Information über SD ICN ist zu empfehlen:

- 8.1.a Jinfan Wang, Wei Gao, Yuqing Liang, Rui Qin, Jianping Wang, Shucheng Liu: SD-ICN: An interoperable deployment framework for software-defined information-centric networks; IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs), May 2014; DOI: 10.1109/INFOCOMW.2014.6849199
- 8.1.b Shuai Gao, Yujing Zeng, Hongbin Luo, Hongke Zhang: Scalable Area-based Hierarchical Control Plane for Software Defined Information Centric Networking; 23rd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Aug 2014; DOI: 10.1109/ICCCN.2014.6911839
- 8.1.c Niels L. M. van Adrichem, Fernando A. Kuipers: NDNFlow: Software-defined Named Data Networking, 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), Apr 2015; DOI: 10.1109/NETSOFT.2015.7116131
- 8.1.d Suyong Eum, Masahiro Jibiki, Masayuki Murata, Hitoshi Asaeda, Nozomu Nishinaga: A design of an ICN architecture within the framework of SDN; Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Jul 2015; DOI: 10.1109/ICUFN.2015.7182521
- 8.1.e Alex F R Trajano, Marcial P Fernandez: ContentSDN: A Content-Based Transparent Proxy Architecture in Software-Defined Networking; IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Mar 2016; DOI: 10.1109/AINA.2016.103
- 8.1.f Sergio Charpinel, Celso Alberto Saibel Santos, Alex Borges Vieira, Magnos Martinello, Rodolfo Villaca: SDCCN: A Novel Software Defined Content-Centric Networking Approach; IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Mar 2016; DOI: 10.1109/AINA.2016.86
- 8.1.g Changyou Xing, Ke Ding, Chao Hu, Ming Chen, Bo Xu: SD-ICN: Toward Wide Area Deployable Software Defined Information Centric Networking; KSII Transactions on Internet and Information Systems, Vol. 10(5), May 2016; DOI: 10.3837/tiis.2016.05.017
- 8.1.h Anwar Kalghoum, Mettali Gammar: Towards New Information Centric Networking Strategy Based on Software Defined Networking; IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Mar 2017; DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925536
- 8.1.i Rihab Jmal, Lamia Chaari Fourati: Content-Centric Networking Management Based on Software Defined Networks: Survey; IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 14(4), Dec 2017; DOI: 10.1109/TNSM.2017.2758681

- 8.1.j Qing-Yi Zhang, Xing-Wei Wang, Min Huang, Ke-Qin Li, Sajal K. Das: Software Defined Networking Meets Information Centric Networking: A Survey; IEEE Access, Vol. 6, Jul 2018; DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2855135
- 8.1.k Yousef Fazea, Fathey Mohammed: Software Defined Networking based Information Centric Networking: An Overview of Approaches and Challenges International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN), Jul 2021; DOI: 10.1109/ICOTEN52080.2021.9493541
- 8.1.l P. Benedetti, G. Piro, L. A. Grieco: An Energy Efficient and Software-Defined Information-Centric Networking Approach to Consumer Mobility; 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Jul 2020; DOI: 10.1109/ICTON51198.2020.9203400

18.8.2 Information-Centric IoT (IC IoT)

IC Internet of Things (IC IoT)

Die Ideen von ICN werden auch in das Internet of Things (IoT) integriert. In diesem Zusammenhang wird von *ICN-based IoT* oder von *ICN-enabled IoT* gesprochen, und man bezeichnet diese Art von IoT kurz als *ICN IoT*. Um Information-Centric (IC) Services im IoT zu ermöglichen, können sowohl spezielle Clouds als auch Fog Nodes eingesetzt werden [Abb. 17.1-4], um IoT-relevante Informationen zentral in Clouds oder entlang des Internet Edge lokal in Fog Nodes zu speichern. In diesem Fall können Clouds als 'Central Information Caches' und Fog Nodes als 'Local Information Caches' dienen. Denn in diesen Caches gespeicherte Informationen können so strukturierte Namen wie z.B. URNs zugewiesen werden, damit sie durch die Angabe von URNs von mobilen Endgeräten abgerufen werden können. Für Näheres darüber siehe:

- 8.2.a Marica Amadeo, Claudia Campolo, Antonio Iera, Antonella Molinaro: Named data networking for IoT: An architectural perspective; European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Jun 2014; DOI: 10.1109/EuCNC.2014.6882665
- 8.2.b Emmanuel Baccelli, et al.: Information Centric Networking in the IoT: Experiments with NDN in the Wild; Proceeding ACM-ICN '14, Proceedings of the 1st ACM Conference on Information-Centric Networking, Sep 2014; DOI: 10.1145/2660129.2660144
- 8.2.c José Quevedo, Daniel Corujo, Rui Aguiar: A case for ICN usage in IoT environments; IEEE Global Communications Conference, Dec 2014; DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037227
- 8.2.d Marica Amadeo, Claudia Campolo, Antonella Molinaro: Forwarding strategies in named data wireless ad hoc networks: Design and evaluation; Journal of Network and Computer Applications, Vol. 50, Apr 2015; DOI: 10.1016/j.jnca.2014.06.007
- 8.2.e Riccardo Petrolo, Valeria Loscri, Nathalie Mitton: Towards a smart city based on cloud of things, a survey on the smart city vision and paradigms; Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, Mar 2015; DOI: 10.1002/ett.2931

- 8.2.f Marica Amadeo, Claudia Campolo, Antonio Iera, Antonella Molinaro: Information Centric Networking in IoT scenarios: the Case of a Smart Home; IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun 2015; DOI: 10.1109/ICC.2015.7248395
- 8.2.g Zhou Su, Qichao Xu: Content Distribution over Content-Centric Mobile Social Networks in 5G; IEEE Communications Magazine, Vol. 53(6) , Jun 2015; DOI: 10.1109/MCOM.2015.7120047
- 8.2.h Marica Amadeo, et al.: Information-centric networking for the internet of things: challenges and opportunities; IEEE Network, Vol. 30(2), Mar-Apr 2016; DOI: 10.1109/MNET.2016.7437030
- 8.2.i Yongrui Qin, et al.: When things matter: A survey on data-centric Internet of Things; Journal of Network and Computer Applications, Vol. 64, Apr 2016; DOI: 10.1016/j.jnca.2015.12.016
- 8.2.j Soumya Kanti Datta, et al.: DataTweet: An Architecture Enabling Data-Centric IoT Services; IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), May 2016; DOI: 10.1109/TENCONSpring.2016.7519430
- 8.2.k Marica Amadeo, et al.: Information-centric networking for M2M communications: Design and deployment; Computer Communications, Vol. 89–90, Sep 2016; DOI: 10.1016/j.comcom.2016.03.009
- 8.2.l Xuan Liu, Zhuo Li, Peng Yang, Yongqiang Dong: Information-centric mobile ad hoc networks and content routing: A survey; Ad Hoc Networks, Vol. 58, 2017; DOI: 10.1016/j.adhoc.2016.04.005
- 8.2.m Toshihiko Kurita, Izuru Sato, Kenichi Fukuda, Toshitaka Tsuda: An Extension of Information-Centric Networking for IoT Applications; International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Jan 2017; DOI: 10.1109/ICCNC.2017.7
- 8.2.n draft-zhang-icnrg-icniot-architecture-01: ICN based Architecture for IoT; Jul 2017
- 8.2.o Sripriya Srikant Adhatarao, Mayutan Arumaiturai, Xiaoming Fu: FOGG: A Fog Computing Based Gateway to Integrate Sensor Networks to Internet; 29th International Teletraffic Congress (ITC 29), Sep 2017; DOI: 10.23919/ITC.2017.8065709
- 8.2.p Marica Amadeo, Claudia Campolo, Antonella Molinaro: A novel hybrid forwarding strategy for content delivery in wireless information-centric networks; Computer Communications, Vol. 109, Sep 2017; DOI: 10.1016/j.comcom.2017.05.012
- 8.2.q Maroua Meddeb: Information-Centric Networking, A natural design for IoT applications ?; INSA de Toulouse, 2017; HAL Id: tel-01661302
- 8.2.r Soumya Kanti Datta, Christian Bonnet: Next-Generation, Data Centric and End-to-End IoT Architecture Based on Microservices, 3rd International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Jun 2018
- 8.2.s Sobia Arshad, et al.: Recent Advances in Information-Centric Networking based Internet of Things (ICN-IoT); arXiv:1710.03473v3; Oct 2018

- 8.2.t Marica Amadeo, Giuseppe Ruggeri, Claudia Campolo, Antonella Molinaro, Valeria Loscrí, Carlos T. Calafate: Fog Computing in IoT Smart Environments via Named Data Networking: A Study on Service Orchestration Mechanisms; *Future Internet*, Vol. 11, Issue 11, Oct 2019; DOI:10.3390/fi11110222
- 8.2.u Wajid Rafique, Abdelhakim Senhaji Hafid, Soumaya Cherkaoui: Complementing IoT Services Using Software Defined Information Centric Networks: A Comprehensive Survey; *IEEE Internet of Things Journal*, Sep 2022;

18.8.3 Information-Centric Services für Smart Cities

Location-based
IC Services

Wir nutzen mobile Endgeräte wie Smartphones und Tablets mit Internetzugang. Diese Endgeräte verfügen in der Regel über eine wichtige Komponente – nämlich ein Navigationssystem. Dadurch können sie dem Internet die Angaben über ihre Lokation/Position auf der Erdkugel liefern. Das bereits eben erwähnte Konzept LoST kann dazu verwendet werden, die Lokation mobiler Endgeräte im Internet so zu nutzen, dass verschiedene, von den mobilen Internetnutzern nicht weit entfernte, verfügbare Dienste/Angebote ermittelt werden. Daraufhin können sie den Internetnutzern bekannt gemacht und somit von diesen unterwegs in Anspruch genommen werden. Dies kann zu neuen Formen von Internetdiensten führen. Diese Services kann man als Location-based IC Services bezeichnen [Abschnitt 17.4]

IC Services für
Smart Cities

IC Services und insbesondere Location-based IC Services haben eine wichtige Bedeutung bei der Entwicklung der Konzepte für Smart Cities. Damit man diese Services realisieren kann, ist ein verteiltes (dezentrales) Resolving-System in Form von strukturierten Informationsnamen erforderlich, also von den lokalen/ortsgebundenen Informationen zugewiesenen URNs auf die Adressen von Rechnern mit diesen Informationen. Um Location-based IC Services mit einem mobilen Endgerät in Anspruch zu nehmen, muss die Angabe über die Geo-Lokation dieses Endgeräts auf die IP-Adresse des benötigten lokalen Resolving-Systems von strukturierten Informationsnamen (URNs nämlich) auf die Adressen von Rechnern mit diesen gewünschten Informationen erfolgen. Für weitere Information über IC Services für Smart Cities sei verwiesen auf:

- 8.3.a I. Cianci, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, P. Camarda: Content Centric Services in Smart Cities; *Sixth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*; Sep 2012; DOI 10.1109/NG-MAST.2012.20
- 8.3.b G. Piro, et al.: Information Centric Services in Smart Cities; *Journal of Systems and Software*, Vol. 88(C), Feb 2014; DOI: 10.1016/j.jss.2013.10.029
- 8.3.c Marica Amadeo, et al.: Information-Centric Networking for Connected Vehicles: A survey and Future Perspectives; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 54(2), Feb 2016; DOI: 10.1109/MCOM.2016.7402268
- 8.3.d Ali Shariat, Ali Tizghadam, Alberto Leon-Garcia: An ICN-Based Publish-Subscribe Platform to Deliver UAV Service in Smart Cities; *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Apr 2016, DOI: 10.1109/INFCOMW.2016.7562167

- 8.3.e Rida Khatoun, Sherali Zeadally: Smart cities: concepts, architectures, research opportunities; *Communications of the ACM*, Vol. 59(8), Aug 2016; DOI: 10.1145/2858789
- 8.3.f LAsER: Lightweight Authentication and Secured Routing for NDN IoT in Smart Cities; Mar 2017; arXiv:1703.08453v1
- 8.3.g Meng Wang, et al.: Toward mobility support for information-centric IoV in smart city using fog computing; *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Aug 2017; DOI: 10.1109/SEGE.2017.8052825
- 8.3.h M. Govoni, et al.: An Information-Centric Platform for Social- and Location-Aware IoT Applications in Smart Cities; *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, Vol. 17(9), Aug 2017; DOI: 10.4108/eai.31-8-2017.153049
- 8.3.i Carmen Rotuna, et al.: Smart City Applications Built on Big Data Technologies and Secure IoT;
- 8.3.j Yang Zhang, Zehui Xiong, Dusit Niyato, Ping Wang, Zhu Han: Market-Oriented Information Trading in Internet of Things (IoT) for Smart Cities; Jun 2018, arXiv:1806.05583v1
- 8.3.k Sobia Arshad, et al.: Towards Information-Centric Networking (ICN) Naming for Internet of Things (IoT): The Case of Smart Campus; Jun 2018; arXiv:1711.10304v1
- 8.3.l Hong Xu, Xuexian Geng: People-Centric Service Intelligence for Smart Cities; *Smart Cities*, Vol. 2 Issue 2, Apr 2019; DOI: 10.3390/smartcities2020010
- 8.3.m Atiyeh Javaheri, Seyyed Naser Seyyed Hashemi, Ali Bohlooli: Hybrid Naming Scheme Based PURSUIT Architecture for Smart City; *4th International Conference on Smart City, Internet of Things and Applications (SCIOT)*; Sep 2020; DOI: 10.1109/SCIOT50840.2020.9250207

18.8.4 ICN Security

Das ICN ist ein neues Kommunikationsparadigma, das sich auf das Abrufen von Informationen aus dem Internet bzw. aus einem privaten Netzwerk konzentriert, wobei die abzurufenden Informationen mit ihren Namen angegeben werden und nicht – wie im heutigen Internet – mit den Adressen von Rechnern, auf denen sie zu finden sind. Ein derartiges neues Kommunikationsparadigma bringt auch neue Sicherheitsprobleme mit sich. Beim ICN ist die Sicherung der Information, also der Inhalte selbst, auf den ersten Blick viel wichtiger als die Probleme der klassischen Netzwerksicherheit. Um die Sicherheitsziele in diesem neuen ICN-Paradigma zu erreichen, ist ein umfassendes Verständnis der ICN-spezifischen Angriffe, ihrer Klassifizierung und der Lösungsvorschläge von entscheidender Bedeutung. Es gibt verschiedene Angriffsarten – und zwar solche, die direkt nur ICN betreffen, und solche, die sich indirekt auf ICN auswirken.

Neue Sicherheitsanforderungen beim ICN

Für weitere Information über ICN Security ist zu empfehlen:

- 8.4.a Abdelberi Chaabane, et al.: Privacy in Content-Oriented Networking: Threats and Countermeasures; ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 43(3), Jul 2013; DOI 10.1145/2500098.2500102
- 8.4.b Nikos Fotiou, et al.: A Framework for Privacy Analysis of ICN Architectures; Proc. Second Annual Privacy Forum (APF), Springer, 2014; DOI 10.1007/978-3-319-06749-0_8
- 8.4.c Eslam G. AbdAllah, Hossam S. Hassanein, Mohammad Zulkernine: A Survey of Security Attacks in Information-Centric Networking; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 17(3), Jan 2015; DOI: 10.1109/COMST.2015.2392629
- 8.4.d Muhammad Aamir, Syed Mustafa Ali Zaidi: Denial-of-service in content centric (named data) networking: a tutorial and state-of-the-art survey; Security and Communication Networks, 2015; DOI: 10.1002/sec.1149
- 8.4.e Mahdi Aiash, Jonathan Loo: An integrated authentication and authorization approach for the network of information architecture; Journal of Network and Computer Applications, Vol. 50, Apr 2015; DOI: 10.1016/j.jnca.2014.06.004
- 8.4.f Roman Lutz: Security and Privacy in Future Internet Architectures: Benefits and Challenges of Content Centric Networks; Jan 2016; arXiv:1601.01278v2
- 8.4.g RFC 7945: Information-Centric Networking: Evaluation and Security Considerations; Sep 2016
- 8.4.h Sabrina Sicari, et al.: A Secure ICN-IoT Architecture; IEEE International Conference on Communications; May 2017; DOI: 10.1109/ICCW.2017.7962667
- 8.4.i Reza Tourani, Travis Mick, Satyajayant Misra, Gaurav Panwar: Security, Privacy, and Access Control in Information-Centric Networking: A Survey; Jun 2017, arXiv:1603.03409v
- 8.4.j Kaiping Xue, Xiang Zhang, Qiudong Xia, David S.L. Wei, Hao Yue, Feng Wu: SEAF: A Secure, Efficient and Accountable Access Control Framework for Information Centric Networking; INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications, Apr 2018; DOI: 10.1109/INFOCOM.2018.8486407
- 8.4.k Xiaoming Fu, Dirk Kutscher, Satyajayant Misra, Ruidong Li: Information-Centric Networking Security; IEEE Communications Magazine, Vol. 56, Issue 11, Nov 2018; DOI: 10.1109/MCOM.2018.8539022

18.9 Time-Sensitive and Deterministic Networking

IT/OT-
Konvergenz

Die Migration zum IoT (insbesondere zum IoT im industriellen Bereich, also zum Industrial IoT (IIoT)) führt dazu, dass zwei Bereiche in industriellen Unternehmen konvergieren: nämlich der Bereich IT (*Information Technology*, Informationstechnologie) und der Bereich OT (*Operational Technology*, Betriebstechnologie/Betriebstechnik). In diesem Zusammenhang und in Verbindung zur Industrie 4.0 spricht man von der

IT/OT-Konvergenz. Diese neue Konvergenz stellt besondere Anforderungen an Netzwerke und Kommunikationsprotokolle in industriellen Bereichen.

In der Vergangenheit war die Trennung der Bereiche IT und OT vor allem sachlich begründet, denn die Bereiche IT und OT hatten vorher getrennte Aufgabenprofile, und aus diesem Grund waren in diesen beiden Bereichen verschiedene Netzwerkkonzepte und Kommunikationsprotokolle im Einsatz. In OT-Bereichen wurden lange Zeit in sich geschlossene, proprietäre Systeme eingesetzt, und diese verfügten oft über keine Verbindungen zur Außenwelt. Die IT/OT-Konvergenz, insbesondere die Verwirklichung von IIoT, verlangt aber, dass neue Anforderungen an industrielle Netzwerke gestellt werden müssen. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Arten von Anforderungen, und um diese zu erfüllen, wurden diese beiden Arten von Networking konzipiert, und sie werden noch weiter intensiv entwickelt. Es handelt sich um: *Time-Sensitive Networking* (TSN) und *Deterministic Networking* (DetNet).

Anforderungen
der IT/OT-
Konvergenz

Für weitere und allgemeine Information über diese beiden Arten von Networking im industriellen Bereich sei verwiesen auf:

- 9.a Martin Wollschlaeger, Thilo Sauter, Juergen Jasperneite: The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0; IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 11(1), Mar 2017; DOI: 10.1109/MIE.2017.2649104
- 9.b Norman Finn: Time-sensitive and Deterministic Networking; Whitepaper; Huawei Technologies Co. Ltd; Jul 2017
- 9.c Ahmed Nasrallah, et al.: Ultra-Low Latency (ULL) Networks: The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research; Sep 2018; arXiv:1803.07673v3
- 9.d Xiaotian Yang, Dominik Scholz, Max Helm; Deterministic Networking (DetNet) vs Time Sensitive Networking (TSN); In "Proceedings of the Seminar Innovative Internet Technologies and Mobile Communications (IITM), Network Architectures and Services; Eds.: Georg Carle, Stephan Gunther, Benedikt Jaeger", Oct 2019; DOI: 10.2313/NET-2019-10-1_13
- 9.e Yudong Huan, Shuo Wang, Tao Huang, Yunjie Liu: Cycle-Based Time-Sensitive and Deterministic Networks: Architecture, Challenges, and Open Issues; IEEE Communications Magazine, Vol. 60, Issue 6, Jun 2022; DOI: 10.1109/MCOM.001.2100865

18.9.1 Time-Sensitive Networking

Eine Art von Anforderungen an industrielle Netzwerke verlangt von Netzwerken die Unterstützung von zeitsensitiven/zeitsensiblen Prozessen. Um solche Anforderungen zu erfüllen, muss die zeitsensitive Kommunikation, quasi Echtzeitkommunikation, in industriellen Netzwerken möglich sein. In diesem Zusammenhang spricht man von *Time-Sensitive Networking* (TSN) bzw. von zeitsensitiven Netzwerken. Von einem *zeitsensitiven Netzwerk* werden u.a. die folgenden Eigenschaften verlangt: minimale Übertragungszeiten auf Links, abschätzbare und garantierte Ende-zu-Ende-

Time-Sensitive
Networking
(TSN)

Latenzzeiten, minimale Paketverlustraten und hohe Verfügbarkeiten der Verbindungen.

Real-Time
Ethernet und
IEEE 802.1

Um Ethernet als Netzwerktechnologie für TSN einsetzen zu können, muss die Ethernet-Technologie hierfür entsprechend funktionell so erweitert werden, dass sie einige Echtzeitfähigkeiten besitzt. Daher wird die speziell zur Unterstützung von TNS erweiterte Ethernet-Technologie als *Real-Time Ethernet (Echtzeit-Ethernet)* bezeichnet. Ethernet ist somit aus dem industriellen Bereich nicht mehr wegzudenken. Um für industrielle Anwendungen zukünftig eine standardisierte Lösung für Echtzeit-Ethernet bereitzustellen, wurde die Arbeitsgruppe Time-Sensitive Networking (TSN) bei der IEEE 802.1 mit dem Ziel gegründet, Standards für Echtzeit-Ethernet so zu entwickeln, dass industrielle Netzwerke auf der Grundlage von Echtzeit-Ethernet den Anforderungen industrieller Anwendungen gerecht werden.

Für Näheres über Time-sensitive Networking, Real-Time Ethernet und die Standards von der IEEE 802.1 siehe:

- 9.1.a IEEE 802: Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group
- 9.1.b Andre Hennecke, Stephan Weyer: Time-Sensitive Networking in modularen Industrie 4.0 Anlagen; Conference: Automation 2017
- 9.1.c Levi Pearson: TSN IN LINUX; Nov 2017
- 9.1.d Norman Finn: Introduction to Time-Sensitive Networking; IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), Jun 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700076
- 9.1.e Wilfried Steiner, Silviu S. Craciunas, Ramon Serna Oliver: Traffic Planning for Time-Sensitive Communication; IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), Jun 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700055
- 9.1.f Bharat Bansal: Divide-and-Conquer Scheduling for Time-sensitive Networks; Master Thesis; University of Stuttgart, Institute of Parallel and Distributed Systems, Mar 2018
- 9.1.g John L. Messenger: Time-Sensitive Networking: An Introduction; IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), Jun 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700047
- 9.1.h Paul Pop, Michael Lander Raagaard, Marina Gutiérrez, Wilfried Steiner: Enabling Fog Computing for Industrial Automation Through Time-Sensitive Networking (TSN); IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), Jun 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700057
- 9.1.i Soheil Samii, Helge Zinner: Level 5 by Layer 2: Time-Sensitive Networking for Autonomous Vehicles, IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), Jun 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700079
- 9.1.j Csaba Simon, Markosz Maliosz, Miklós Máté: Design Aspects of Low-Latency Services with Time-Sensitive Networking; IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), Jul 2018; DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700081

- 9.1.k Carlos San Vicente Gutiérrez, Lander Usategui San Juan, Irati Zamalloa Ugarte, Víctor Mayoral Vilches: Time-Sensitive Networking for robotics; Sep 2018, arXiv:1804.07643v2
- 9.1.l Maryam Pahlevan: Time Sensitive Networking for Virtualized Integrated Real-Time Systems; Faculty of Elektrotechnik und Informatik, University of Siegen; 2019
- 9.1.m Lucia Lo Bello, Wilfried Steiner: A Perspective on IEEE Time-Sensitive Networking for Industrial Communication and Automation Systems; Proceedings of the IEEE, Vol. 107, Issue 6, Jun 2019; DOI: 10.1109/JPROC.2019.2905334
- 9.1.n RFC 9023: Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: IP over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN); Jun 2021
- 9.1.o RFC 9024: Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking over MPLS; Jun 2021
- 9.1.p Siemens Industry Online Support; Questions and Answers about TSN; Entry ID: 109757263, V 2.0, 07/2021
- 9.1.q Youhwan Seol, Doyeon Hyeon, Junhong Min, Moonbeom Kim, Jeongyeup Paek; Timely Survey of Time-Sensitive Networking: Past and Future Directions; IEEE Access, Oct 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3120769
- 9.1.r Martin Böhm, Diederich Wermser: Multi-Domain Time-Sensitive Networks — Control Plane Mechanisms for Dynamic Inter-Domain Stream Configuration; Electronics, Vol. 10, Oct 2021, Issue 20; DOI: 10.3390/electronics10202477
- 9.1.s Tommaso Fedullo, Alberto Morato, Federico Tramarin, Luigi Rovati, Stefano Vitturi: A Comprehensive Review on Time Sensitive Networks with a Special Focus on Its Applicability to Industrial Smart and Distributed Measurement Systems; Sensors (Basel), Feb 2022, PMC8879530; DOI: 10.3390/s22041638

18.9.2 Deterministic Networking

Infolge der Konvergenz IT und OT hat sich eine besondere Klasse von Anforderungen an heutige industrielle Netzwerke herauskristallisiert. Die Anforderungen dieser Klasse verlangen von industriellen Netzwerken ähnliche Eigenschaften, die man beispielsweise im S/U-Bahnnetz oder im Busnetz einer Stadt erkennen kann. Weil Züge oder Busse nach einem festgelegten Plan fahren, in der Tat nach einem deterministischen Plan also, ist eine derartige Eigenschaft der industriellen Netzwerke zur Unterstützung einiger Produktionsprozesse von fundamentaler Bedeutung. Es handelt sich hier z.B. um Prozesse, die oft auf der Basis einer Vernetzung von Robotern realisiert werden und ständig nach einem von vornherein festgelegten deterministischen Plan verlaufen müssen. Die Netzwerke, mit denen eine deterministische, nach einem Plan verlaufende Kommunikation realisiert werden kann, werden daher als *deterministische Netzwerke* bezeichnet. Im Hinblick darauf wird von *Deterministic Networking* (DetNet) gesprochen. Die Entwicklung der Konzepte für DetNet wird von der gleichnamigen Working Group bei der IETF (*Internet Engineering Task Force*) koordiniert

Deterministic
Networking
(DetNet)

und standardisiert [<https://datatracker.ietf.org/wg/detnet/about/>]. Für Näheres ist zu empfehlen:

- 9.2.a Henrik Austad: Deterministic Networking for Real-Time Systems, (Using TSN and DetNet); Cisco Systems, Oct 2017
- 9.2.b RFC 8557: Deterministic Networking Problem Statement; May 2019
- 9.2.c RFC 8655: Deterministic Networking Architecture; Oct 2019
- 9.2.d RFC 8578: Deterministic Networking Use Cases; Oct 2018
- 9.2.e RFC 9023: Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: IP over IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN); Jun 2021
- 9.2.f RFC 9024: Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking over MPLS; Jun 2021
- 9.2.g RFC 9037: Deterministic Networking (DetNet) Data Plane: MPLS over IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN); Jun 2021
- 9.2.h RFC 9055: Deterministic Networking (DetNet) Security Considerations; Jun 2021

18.9.3 6TiSCH Wireless Industrial Networks

Verfahren TSCH

Um hohe QoS-Anforderungen erfüllen zu können, müssen zum Aufbau von IIoT spezielle Netzwerke zur Unterstützung der industriellen Kommunikation eingesetzt werden. Um Netzwerke mit solchen Eigenschaften aufbauen zu können, wurde das Verfahren TSCH (*Time-Slotted Channel Hopping*) konzipiert, sodass man auch von TSCH-Netzwerken spricht. Dieses Verfahren stellt eine spezielle, zeitsynchrone Realisierung des MAC-Protokolls (*Media Access Control*) zum Aufbau drahtloser, industrieller Netzwerke dar. Im Allgemeinen kann man das Verfahren TSCH als eine Kombination von zwei, seit Langem bei der digitalen Datenübertragung gut bekannten Multiplexverfahren ansehen. Es handelt sich hierbei um eine Kombination des *Frequenzmultiplex* und des synchronen *Zeitmultiplex*, also um eine Variante von Frequenz- und Zeitmultiplexverfahren FTDM (*Frequency-Time Division Multiplexing*) – siehe hierfür z.B. [9.3.h], [9.3.i].

6TiSCH Wireless
Industrial
Networks

Die Konzepte und Protokolle für den Einsatz von IPv6 in TiSCH-Netzwerken werden von der Working Group 6tisch (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e) bei der IETF koordiniert. Dementsprechend spricht man im Zusammenhang mit IPv6 over TSCH von (6)TiSCH. Die Idee von TiSCH ermöglicht das Deterministic Networking. Das heißt, sie ermöglicht die Einrichtung einer neuen Generation drahtloser Netzwerke, in denen die Verzögerungs- bzw. Reaktionszeit, allgemein als Latenz(zeit) bezeichnet, mit einer bestimmten Genauigkeit berechenbar ist. Die Kommunikation zwischen Knoten in jedem TSCH-Netzwerk, das ein deterministisches Netzwerk darstellt, verläuft nach dem in Form einer TSCH-Schedule-Matrix festgelegten Kommunikationsplan. Die Festlegung eines solchen Plans bezeichnet man als Scheduling in TSCH-Netzwerken. Jede TSCH-Schedule-Matrix kann dynamisch aufgebaut und modifiziert werden. Für Näheres über 6TiSCH Wireless Industrial Networks ist zu verweisen auf:

- 9.3.a i-SCOOP: IT and OT convergence – two worlds converging in Industrial IoT
- 9.3.b RFC 7554: Using IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) in the Internet of Things (IoT): Problem Statement; May 2015
- 9.3.c Pascal Thubert, Maria Rita Palattella, Thomas Engel: 6TiSCH Centralized Scheduling: when SDN Meet IoT; IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), Oct 2015; DOI: 10.1109/CSCN.2015.7390418
- 9.3.d Domenico De Guglielmo, Simone Brienza, Giuseppe Anastasi: IEEE 802.15.4e: A survey; Computer Communications, Vol. 88, Aug 2016; DOI: 10.1016/j.comcom.2016.05.004
- 9.3.e Gopi Garge: Industrial Internet and the need for guarantees (6TiSCH); 2017
- 9.3.f ETSI GR IP6 009 V1.1.1: IPv6-based Industrial Internet leveraging 6TiSCH technology; Mar 2017
- 9.3.g RFC 8180: Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) Configuration; May 2017
- 9.3.h Rodrigo Teles Hermeto, Antoine Gallais, Fabrice Theoleyre: Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and slow channel hopping MAC in low power industrial wireless networks: A survey; Computer Communications, Vol. 114, Dec 2017; DOI: 10.1016/j.comcom.2017.10.004
- 9.3.i Anatol Badach: TSCH – Time-Slotted Channel Hopping; In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Jan 2018
- 9.3.j Anatol Badach: 6P - 6top Protocol; In book: Protokolle und Dienste der Informationstechnologie; WEKA, Ed.: Heinz Schulte; Aug 2018
- 9.3.k RFC 8480: 6TiSCH Operation Sublayer (6top) Protocol (6P); Nov. 2018
- 9.3.l Xavier Vilajosana, Thomas Watteyne, Tengfei Chang, Mališa Vučinić, Simon Duquenooy, Pascal Thubert: IETF 6TiSCH: A Tutorial; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 22, Issue 1, Sep 2019; DOI: 10.1109/COMST.2019.2939407
- 9.3.m Mina Rady, Quentin Lampin, Dominique Barthel, Thomas Watteyne; g6TiSCH: Generalized 6TiSCH for Agile Multi-PHY Wireless Networking; IEEE Access, Jun 2021; DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3085967
- 9.3.n Andreas Ramstad Urke, Øivind Kure, Knut Øvsthus: A Survey of 802.15.4 TSCH Schedulers for a Standardized Industrial Internet of Things; Sensors (Basel), Vol. 22(1), Jan 2022; DOI: 10.3390/s22010015

18.9.4 Time-Sensitive SDN

In Time-Sensitive Networks (TS-Networks) muss überwiegend die verbindungsorientierte IP-Kommunikation, ähnlich dem Prinzip MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) [Abschnitt 12.2] realisiert werden. Dabei werden virtuelle Ende-zu-Ende-Verbindungen mit bestimmten QoS-Parametern in TS-Networks dynamisch auf- und abgebaut. Für diesen Zweck eignet sich das SDN-Konzept ideal. Beim Einsatz von

MPLS-Idee als Grundlage für TS SDN

SDN in TS-Networks spricht man von *Time-Sensitive SDN* (TS SDN). Um virtuelle Ende-zu-Ende-Verbindungen in TS-Networks – nach einem dem Prinzip MPLS ähnelnden Konzept – dynamisch auf- und abzubauen, ist eine spezielle Control Plane nötig. Beim Einsatz von TS SDN würde man SDN Controller innerhalb dieser Control Plane installieren. Für weitere Information über Time-Sensitive SDN ist zu empfehlen:

- 9.4.a Jiafu Wan, et al.: Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0; IEEE Sensors Journal, Vol. 16(20), Oct 2016; DOI: 10.1109/JSEN.2016.2565621
- 9.4.b Daniel Thiele, Rolf Ernst: Formal analysis based evaluation of software defined networking for time-sensitive Ethernet; Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Mar 2016
- 9.4.c Dominik Henneke, Lukasz Wisniewski, Jürgen Jasperneite: Analysis of Realizing a Future Industrial Network by Means of Software-Defined Networking (SDN); IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS), May 2016; DOI: 10.1109/WFCS.2016.7496525
- 9.4.d Naresh Ganesh Nayak, Frank Dürr, Kurt Rothermel: Time-sensitive Software-defined Network (TSSDN) for Real-time Applications: Proceeding RTNS '16 Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems, Oct 2016; DOI: 10.1145/2997465.2997487
- 9.4.e Rakesh Kumar, et al.: End-to-End Network Delay Guarantees for Real-Time Systems using SDN; May 2017, arXiv:1703.01641v2
- 9.4.f Ben Schneider, Alois Zoitl, Monika Wenger, Jan Olaf Blech: Evaluating Software-defined Networking for Deterministic Communication in Distributed Industrial Automation Systems; 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sep 2017; DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247594
- 9.4.g Khandakar Ahmed, et al.: Software Defined Industry Automation Networks; 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), Nov. 2017; DOI: 10.1109/ATNAC.2017.8215391
- 9.4.h Sebastian Schriegel, Thomas Kobzan, Jürgen Jasperneite: Investigation on a distributed SDN control plane architecture for heterogeneous time sensitive networks; 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS); Jun 2018; DOI: 10.1109/WFCS.2018.8402356
- 9.4.i Khandakar Ahmed, Jan O. Blech, Mark A. Gregory, Heinz W. Schmidt: Software Defined Networks in Industrial Automation; Journal of Actuator Networks, Vol. 7(3), Aug 2018; DOI: 10.3390/jsan7030033
- 9.4.j Dave Cronberger: The software defined industrial network; Industrial Ethernet Book, Issue 84/5; Nov 2018
- 9.4.k Siwar Ben Hadj Said, Quang Huy Truong, Michael Boc: SDN-based configuration solution for IEEE 802.1 time sensitive networking (TSN); ACM SIGBED Review, Vol. 16, Issue 1, Feb 2019; DOI: 10.1145/3314206.3314210
- 9.4.l Martin Böhm, Jannis Ohms, Manish Kumar, Olaf Gebauer, Diederich Wermser: Time-Sensitive Software-Defined Networking: A Unified Control-Plane

for TSN and SDN; Mobile Communication - Technologies and Applications; 24. ITG Fachtagung Mobilkommunikation, May 2019

- 9.4.m Timo Häckel, Philipp Meyer, Franz Korf, Thomas C. Schmidt: Secure Time-Sensitive Software-Defined Networking in Vehicles; arXiv:2201.00589; Aug 2022; DOI:10.1109/TVT.2022.3202368

18.10 AI-based Networking

Da die heutigen Rechnernetze, also IP-Netze, immer flexibler, heterogener und komplexer werden, bietet es sich an, die Künstliche Intelligenz (KI, AI: *Artificial Intelligence*) in Verbindung mit *Maschinellem Lernen* (ML, *Machine Learning*) in technischen Konzepten zur Optimierung und Management von Rechnernetzen einzusetzen. Folglich führt ein aktueller und breiter Trend auf dem Gebiet Networking zur Entwicklung von Ideen und technischen Konzepten, um zukünftig intelligente Vernetzungen von verschiedenen Rechnern bauen zu können. Im Hinblick darauf ist AI in Verbindung mit ML von zukunftsweisender Bedeutung. Beim Einsatz von AI und ML auf dem Gebiet Networking spricht man von *AI-enabled Networking*. Demzufolge werden zukünftige IP-Netze mit Sicherheit die mithilfe von ML gewonnene AI so nutzen, um sich immer an jede neue Situation optimal adaptieren/anpassen und dadurch auch intelligente Services erbringen zu können. Das volle/optimale Nutzungspotenzial zukünftiger IP-Netze lässt sich nur mit der Unterstützung von AI erreichen.

Bedeutung von
AI-enabled
Networking

Um AI-enabled Networking zu realisieren und dabei insbesondere AI aus den gesammelten Daten gewinnen zu können, ist der Einsatz verschiedener ML-Techniken möglich. Dabei handelt es sich insbesondere um *Deep Learning* (DL) [10.c] und *Reinforcement Learning* (RL) [10.f]. Beide ML-Methoden haben in sog. Neuronalen Netzen (*Neural Networks*) fundamentale Bedeutung [10.n].

ML-Techniken
zur
AI-Gewinnung

Als wichtige Trends auf dem Gebiet AI-enabled Networking gelten die folgenden Trends: *AI-enabled SDN*, *Data-driven Networking*, *Cognitive Networks*, *Intent-based Networking*, *Autonomic Networking* und *AI, IoT and 5G Convergence*. Für weitere, aber immer noch allgemeine Informationen über AI-enabled Networking und die Nutzung von AI und ML sei verwiesen auf:

- 10.a i-SCOOP: Artificial intelligence (AI) and cognitive computing: what, why and where
- 10.b i-SCOOP: Big data in action: definition, value, evolutions, benefits and context
- 10.c Jeffrey O. Kephart, David M. Chess: The vision of autonomic computing; Computer, Vol. 36(1), Jan 2003; DOI:10.1109/MC.2003.1160055
- 10.d Xiaofei Wang, Xiuhua Li, Victor C. M. Leung: Artificial Intelligence-Based Techniques for Emerging Heterogeneous Network: State of the Arts, Opportunities, and Challenges; IEEE Access, Vol. 3, 2015; DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2467174
- 10.e Zubair Md. Fadlullah, et al.: State-of-the-Art Deep Learning: Evolving Machine Intelligence Toward Tomorrow's Intelligent Network Traffic Control

- Systems; *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, Vol. 19(4), 2017; DOI: 10.1109/COMST.2017.2707140
- 10.f Hongzi Mao, Mohammad Alizadeh, Ishai Menachey, Srikanth Kandulay: Resource Management with Deep Reinforcement Learning; *Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '16)*, Nov 2016; DOI: 10.1145/3005745.3005750
- 10.g Nei Kato, Zubair Md. Fadlullah, et al.: The Deep Learning Vision for Heterogeneous Network Traffic Control: Proposal, Challenges, and Future Perspective, *IEEE Wireless Communications*, Jun 2017; DOI: 10.1109/MWC.2016.1600317WC
- 10.h Roberto Gonzalez, et al.: Net2Vec: Deep Learning for the Network; *Big-DAMA '17 Proceedings of the Workshop on Big Data Analytics and Machine Learning for Data Communication Networks*, Aug 2017; DOI: 10.1145/3098593.3098596
- 10.i Albert Mestres: Knowledge-Defined Networking: A Machine Learning based approach for network and traffic modeling; *Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya*, Sep 2017
- 10.j Omer Berat Sezer, Erdogan Dogdu, Ahmet Murat Ozbayoglu: Context-Aware Computing, Learning, and Big Data in Internet of Things: A Survey; *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5(1), Feb 2018; DOI: 10.1109/JIOT.2017.2773600
- 10.k Mowei Wang, et al.: Machine Learning for Networking: Workflow, Advances and Opportunities; *IEEE Network*, Vol. 32(2), Mar – Apr 2018; DOI: 10.1109/MNET.2017.1700200
- 10.l ITU: Artificial Intelligence (AI) for Development Series - Report on AI and IoT in Security Aspects; Jul 2018
- 10.m ATIS: Evolution to an Artificial Intelligence-Enabled Network; Sep 2018
- 10.n Wang Tong, Azhar Hussain, Wang Xi Bo, Sabita Maharjan: Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey; *IEEE Access*, Vol. 7, Jan 2019; DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891073
- 10.o Mohammad Azmi Ridwan, Nurul Asyikin Binti Mohamed Radzi, Fairuz Abdullah, Yanti Erana Jalil: Applications of Machine Learning in Networking: A Survey of Current Issues and Future Challenges; *IEEE Access*, Mar 2021; DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069210
- 10.p Arnau Rovira-Sugranes, Abolfazl Razi, Fatemeh Afghah, Jacob Chakareski: A Review of AI-enabled Routing Protocols for UAV Networks: Trends, Challenges, and Future Outlook; *arXiv:2104.01283v2*; Nov 2021; DOI: 10.48550/arXiv.2104.01283
- 10.q Tianzhu Zhang, Han Qiu, Marco Mellia, Yuanjie Li, Hewu Li, Ke Xu: Interpreting AI for Networking: Where We Are and Where We Are Going; *IEEE Communications Magazine*, Vol. 60, Issue 2, Feb 2022; DOI: 10.1109/MCOM.001.2100736
- 10.r Arnau Rovira-Sugranes, Abolfazl Razi, Fatemeh Afghah, Jacob Chakareski: A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, chal-

lenges, and future outlook; *Ad Hoc Networks*, Vol. 130, 1 May 2022; DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.102790

18.10.1 AI-enabled SDN

Die eben genannten ML-Methoden können bei SDN eingesetzt werden. Die mittels dieser ML-Methoden gewonnene AI kann bei SDN dazu genutzt werden, um die zur Konfiguration und zum Management von Netzwerkkomponenten dienenden SDN Controller zu befähigen, die zu steuernden Netzwerkkomponenten in die Lage versetzen, sich an neue Situationen im Netzwerk optimal anzupassen. Werden SDN Controller befähigt, die AI so zu nutzen, um verschiedene Netzwerkkomponenten der aktuellen Situation im Netzwerk entsprechend optimal zu steuern und zu managen, kann von AI-enabled SDN gesprochen werden. Für Näheres darüber siehe:

AI-fähige SDN
Controller

- 10.1.a Majd Latah, Levent Toker: Artificial Intelligence Enabled Software Defined Networking: A Comprehensive Overview; arXiv:1803.06818
- 10.1.b Majd Latah, Levent Toker: Application of Artificial Intelligence to Software Defined Networking: A Survey; *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 9(44), Nov 2016; DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i44/89812
- 10.1.c Albert Mestres, Alberto Rodriguez-Natal, Josep Carner, et al: Knowledge-Defined Networking; *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 47(3), Jul 2017
- 10.1.d Elisa Rojas: From Software-Defined to Human-Defined Networking: Challenges and Opportunities; *IEEE Network*, Vol. 32 (1), Jan - Feb 2018
- 10.1.e Weidong Fang, Chunsheng Zhu, F. Richard Yu, Kun Wang, Wuxiong Zhang: Towards Energy-Efficient and Secure Data Transmission in AI-Enabled Software Defined Industrial Networks; *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 18, Issue 6, Jun 2022; DOI: 10.1109/TII.2021.3122370
- 10.1.f Jinfang Jiang, Chuan Lin, Guangjie Han, Adnan M. Abu-Mahfouz, Syed Bilal Hussain Shah, Miguel Martínez-García; How AI-enabled SDN technologies improve the security and functionality of industrial IoT network: Architectures, enabling technologies, and opportunities; *Digital Communications and Networks*, Jul 2022; DOI: 10.1016/j.dcan.2022.07.001

18.10.2 Data-Driven Networking

Menschen erwerben ihr Wissen durch die Beobachtung von Umwelt und Natur, durch Gedanken, Erfahrungen und Lernen. Diese Art und Weise der Erwerbung des menschlichen Wissens muss auch in bestimmtem Grade in komplexen technischen Systemen – insbesondere in großen Netzwerken – nachgebildet werden. Dadurch soll ihnen eine bestimmte künstliche Intelligenz beigebracht werden, um sie auf diese Art zu befähigen, wichtige Prozesse im Laufe des Netzwerkbetriebs selbst- und eigenständig optimieren zu können. Damit man eine derartige Wunschvorstellung verwirklichen

Notwendigkeit
der Erfassung
von Messdaten

kann, müssen alle relevanten Messwerte im Laufe der Zeit zuerst erfasst, dann auf eine spezielle Art dokumentiert und archiviert werden.

Big Data
Analytics

Demzufolge müssen die Daten über den Betrieb des Netzwerkes kontinuierlich erfasst werden. Hierdurch wird die Menge von Messdaten im Laufe der Zeit immer größer. Im Hinblick darauf spricht man von *Big Data*, also einer überproportional großen Datenmenge. Diese Daten müssen zuerst analysiert werden, um sie im nächsten Schritt zum maschinellen Lernen in Netzwerken benutzen zu können. Eine derartige Analyse von Big Data als eine Art Vorbereitung von großen Daten zu deren Einsatz bei der Unterstützung von Lernprozessen wird als *Big Data Analytics* bezeichnet. Für Näheres darüber siehe [10.2.b], [10.2.c].

(Big-)Data-
Driven
Networking

Im Zusammenhang mit Big Data Analytics in Netzwerken spricht man von *Data-Driven Networking* (DDN) bzw. von *Big-Data-Driven Networking* (kurz BDDN oder bDDN). (B)DDN ist als ein sehr allgemeines Konzept, als eine Art 'zukünftiges Network-Framework' zu verstehen, in dem die Antworten auf die folgenden vier Fragestellungen spezifiziert werden:

1. **Erfassung von Big Data:** Welche Messdaten sollen über den Netzbetrieb gesammelt, dokumentiert und archiviert werden?
2. **Big Data Analytics:** Wozu und wie sollen diese Messdaten verarbeitet werden?
3. **Maschinelles Lernen:** Wie sollen die Ergebnisse der Datenanalyse (Big Data Analytics) zur Befähigung des Netzwerks verwendet werden?
4. **Optimierung/Verbesserung des Systemverhaltens:** Wie soll die durch maschinelle Lernen erworbene Intelligenz zur Optimierung bzw. Verbesserung des Systemverhaltens im laufenden Netzbetrieb eingesetzt werden?

(B)DDN an
andere Arten von
Networking

Im Trend zu (B)DDN wird hauptsächlich das Ziel verfolgt, intelligentes, autonomes und optimiertes Netzwerkmanagement sowie selbst adaptierte Sicherheit zu ermöglichen. (B)DDN kann dazu führen, dass man zwischen Netzwerken mit unterschiedlichen Intelligenzarten unterscheiden kann – und zwar zwischen Cognitive Networks, Intent-based Networking und Autonomic Networking. Für weitere allgemeine Information über (B)DDN und über verschiedene intelligente Arten von Networking ist zu empfehlen:

10.2.a Haipeng Yao, Chao Qiu, Chao Fang, Xu Chen, F. Richard Yu: A Novel Framework of Data-Driven Networking; IEEE Access, Vol. 4, Nov 2016; DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2624781

10.2.b Junchen Jiang, Vyas Sekar, Ion Stoica, Hui Zhang: Unleashing the potential of data-driven networking; Proceedings of 9th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNET), 2017.

10.2.c Junchen Jiang, Vyas Sekar, Ion Stoica, Hui Zhang: Data-Driven Networking: Harnessing the "Unreasonable Effectiveness of Data" in Network Design; Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Feb 2016

10.2.d ITU-T: Y.3650 - Framework of big-data-driven networking, Jan 2018

10.2.e Wolfgang Kellerer, Patrick Kalmbach, Andreas Blenk, Arsany Basta, Martin Reisslein, Stefan Schmid: Adaptable and Data-Driven Softwarized Networks:

Review, Opportunities, and Challenges; Proceedings of the IEEE, Vol. 107, Issue 4, April 2019; DOI: 10.1109/JPROC.2019.2895553

- 10.2.f Alessio Sacco, Flavio Esposito, Guido Marchetto: On Control and Data Plane Programmability for Data-Driven Networking; IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), Jun 2021; DOI: 10.1109/HPSR52026.2021.9481859
- 10.2.g ITU-T: Recommendation Y.3654: Big data driven networking – Machine learning mechanism; 2022-02-13; <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14862>

18.10.3 Cognitive Networks

Falls die Messdaten in einem Netzwerk zuerst über gewisse Zeit erfasst, gespeichert, analysiert (Big Data Analytics) und danach beim Maschinellen Lernen so verwendet werden, um sog. *kognitive Fähigkeiten* des Menschen, d.h. Signale aus der Umwelt wahrzunehmen und weiterzuverarbeiten, dann besitzt das Netzwerk auch bestimmte kognitive Fähigkeiten und kann folglich als *kognitives Netzwerk (Cognitive Network)* bezeichnet werden.

Somit ist ein kognitives Netzwerk ein Netzwerk mit bestimmten kognitiven Fähigkeiten, das durch maschinelles Lernen befähigt wurde, die aktuelle Netzwerksituation wahrzunehmen, diese zu erfassen und zu analysieren, um sich immer an jede neue Netzwerksituation optimal anzupassen, will heißen, einige der wichtigen Konfigurationsparameter des Netzwerks optimal einzustellen. Ein kognitives Verhalten kann in Netzwerken vor allem dazu dienen, die QoS (Quality of Service) und Netzwerksicherheit zu verbessern. Insbesondere die Fähigkeit von Cognitive Networks, verschiedene Anomalien zu erkennen und darauf optimal zu reagieren, kann zur Erhöhung der Netzwerksicherheit beitragen. Für Näheres über Cognitive Networks siehe:

Kognitive
Fähigkeiten

- 10.3.a Valter Popeskic, Božidar Kovačić: COGNITIVE NETWORKS THE NETWORKS OF THE FUTURE; Conference Paper, June 2012
- 10.3.b Michele Zorzi, et al.: COBANETS: A new paradigm for cognitive communications systems; International Conference on Computing, Networking and Communications, Feb 2016; DOI: 10.1109/ICCNC.2016.7440625
- 10.3.c Michele Zorzi, Andrea Zanella, Alberto Testolin, Michele De Filippo De Grazia, Marco Zorzi: Cognition-Based Networks: A New Perspective on Network Optimization Using Learning and Distributed Intelligence; IEEE Access, Vol. 3, Aug 2015; DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2471178
- 10.3.d Mario Bkassiny, Yang Li, Sudharman K. Jayaweera: A Survey on Machine-Learning Techniques in Cognitive Radios; IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15(3), 2013; DOI: 10.1109/SURV.2012.100412.00017
- 10.3.e Marco Levorato: Cognitive Networking with Dynamic Traffic Classification and QoS Constraints; IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC); Mar 2017; DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925717

- 10.3.f Ijaz Ahmad: Improving Software Defined Cognitive and Secure Networking; University of Oulu, 2018; ISBN: 978-952-62-1951-6
- 10.3.g Cynthia S. Q. Siew; U. Wulff; Nicole M. Beckage; Yoed N. Kenett: Cognitive Network Science: A Review of Research on Cognition through the Lens of Network Representations, Processes, and Dynamics; *Complexity*, Vol. 2019, Article ID 2108423, 2019; DOI: 10.1155/2019/2108423
- 10.3.h Ijaz Ahmad: Improving Software Defined Cognitive and Secure Networking; arXiv:2007.05296; Jul 2020; DOI: 10.48550/arXiv.2007.05296
- 10.3.i Martins O. Osifeko, Gerhard P. Hancke, Adnan M. Abu-Mahfouz: Artificial Intelligence Techniques for Cognitive Sensing in Future IoT: State-of-the-Art, Potentials, and Challenges; *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 9 Issue 2, Apr 2020; DOI: 10.3390/jsan9020021

18.10.4 Intent-based Networking

Ziel von
Intent-based
Networking

Eine besondere Art von Data-Driven Networking wird als *Intent-based (absichtsbasiertes) Networking* bezeichnet. Man betrachtet absichtsbasiertes Networking als Grundstein für eine neue Ära von Networking. Dem Intent-based Networking liegt das folgende Ziel zugrunde: Ein Netzwerk soll in der Lage sein, sich – der Absicht seines Administrators entsprechend – selbst so zu konfigurieren, um die in Form von sog. Konfigurationsrichtlinien allgemein formulierten Absichten des Administrators in die entsprechenden Konfigurationsparameter umzusetzen.

Idee von
Intent-based
Networking

Die grundlegende Idee von Intent-based Networking ist, dass das Netzwerk eigenständig die geschäftlichen Absichten/Ziele berücksichtigen muss und diese selbst/automatisch in Konfigurationsparametern seiner Funktionskomponenten (Router, Switches, Firewalls) abbilden kann. Als Folge dessen sollen manuelle Konfigurationseingriffe in Intent-based Networks auf ein Minimum reduziert werden. Darüber hinaus soll jedes Intent-based Network von vornherein ausgewählte Parameter, insbesondere dabei die sog. QoS-Metriken, kontinuierlich überwachen und im Bedarfsfall entsprechende Anpassungen der Konfigurationsparameter vornehmen, um sicherzustellen, dass alle ausgewählten Parameter im 'grünen Bereich' sind. Für weitere Informationen über Intent-based Networking ist zu empfehlen:

- 10.4.a David Lenrow: Intent-Based Networking Seeks Network Effect; Sep 2015
- 10.4.b Susan Hares: 2015 ONF/SDN Market Opportunities, Tutorial Intent Networking, Open Networking Foundation
- 10.4.c ONF TR-523: Intent NBI – Definition and Principles; Oct 2016
- 10.4.d Franco Callegati, Walter Cerroni, Chiara Contoli, Francesco Foresta: Performance of Intent-based Virtualized Network Infrastructure Management; IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2017; DOI: 10.1109/ICC.2017.7997431
- 10.4.e Alexander Thiele: Future Ready Networking Solutions for the Datacenter; Dell EMC Forum, Frankfurt 24.10.2017

- 10.4.f Carlos Infante: Cisco SD-WAN: Intent-based networking for the branch and WAN; Mar 2018
- 10.4.g Walter Cerroni: Intent-based Network Programmability; IRTF NMRG 56 – Interim Meeting, Oct 2019
- 10.4.h Engin Zeydan, Yekta Turk: Recent Advances in Intent-Based Networking: A Survey; IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), May 2020; DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128422
- 10.4.i Yiming Wei, Mugen Peng, Yaqiong Liu: Intent-based networks for 6G: Insights and challenges; Digital Communications and Networks, Vol. 6, Issue 3, Aug 2020; DOI: 10.1016/j.dcan.2020.07.001
- 10.4.j Adeel Rafiq, Asif Mehmood, Talha Ahmed Khan, Khizar Abbas, Muhammad Afaq, Wang-Cheol Song: Intent-Based End-to-End Network Service Orchestration System for Multi-Platforms; Sustainability, Vol. 12, Issue 7, Apr 2020; DOI:10.3390/su12072782

18.10.5 Autonomic Networking

Seit Beginn der 2000er-Jahre wird der Begriff 'Autonomic Systems' (*Autonome Systeme*) geprägt [Abschnitt 10.5]. Diese Idee von *Autonomic Systems* wird in den letzten zehn Jahren auch auf dem Networking-Gebiet übernommen, sodass man von *Autonomic Networking* bzw. *Autonomic Networks* spricht. In RFC 7575 wird 'Autonomic Networking' definiert und dessen Ziele werden hier näher dargestellt. Das wesentliche Ziel eines autonomen Netzwerks ist dessen *Selbstmanagement*, einschließlich *Selbstkonfiguration*, *Selbstoptimierung*, *Selbstheilung* und *Selbstschutz*. Autonomic Networking kann auch als eine besondere Variante von *Data-Driven Networking* (DDN) betrachtet werden. Daher spielen (Big) Data Analytics und Maschinelles Lernen auch bei Autonomic Networking eine fundamentale Rolle. Um Autonomic Networking zu verwirklichen, werden hierfür verschiedene Architekturmodelle und Protokolle entwickelt. Diese Aktivitäten werden von der Working Group *anima* (*Autonomic Networking Integrated Model and Approach*) bei der IETF koordiniert. Für weitere Informationen über *Autonomic Networking* siehe:

5-S-
Besonderheiten
beim Autonomic
Networking

- 10.5.a Jeffrey O. Kephart, David M. Chess: The Vision of Autonomic Computing; IEEE Computer, Vol. 36(1), Jan 2003; DOI: 10.1109/MC.2003.1160055
- 10.5.b EU FP6 IST Project 27489: ANA Project; Autonomic Network Architecture; Feb 2007
- 10.5.c Zeinab Movahedi, Mouna Ayari, Rami Langar, Guy Pujolle: A Survey of Autonomic Network Architectures and Evaluation Criteria, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14(2), May 2012; DOI 10.1109/SURV.2011.042711.00078
- 10.5.d ETSI GS AFI 002 V1.1.1: Autonomic network engineering for the self-managing Future Internet (AFI); Generic Autonomic Network Architecture (An Architectural Reference Model for Autonomic Networking, Cognitive Networking and Self-Management) Disclaimer; Apr 2013

- 10.5.e CISCO: Autonomic Networking Configuration and Deployment Guide; Dec 2016
- 10.5.f Zhongliang Zhao, Eryk Schiller, Eirini Kalogeiton, Torsten Braun, Burkhard Stiller, Mevlut Turker Garip, Joshua Joy, Mario Gerla, Nabeel Akhtar, Ibrahim Matta: Autonomic Communications in Software-Driven Networks; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 35(11), Nov 2017; DOI: 10.1109/JSAC.2017.2760354
- 10.5.g RFC 7575: Autonomic Networking: Definitions and Design Goals; Jun 2015
- 10.5.h RFC 8368: Using an Autonomic Control Plane for Stable Connectivity of Network Operations, Administration, and Maintenance (OAM); May 2018
- 10.5.i ETSI TS 103 195-2 V1.1.1: Autonomic network engineering for the self-managing Future Internet (AFI); Generic Autonomic Network Architecture; Part 2: An Architectural Reference Model for Autonomic Networking, Cognitive Networking and Self-Management; Mai 2018
- 10.5.j draft-ietf-anima-autonomic-control-plane-18: An Autonomic Control Plane (ACP); Jul 2018
- 10.5.k ETSI TR 103 626 V1.1.1: Autonomic network engineering for the self-managing Future Internet (AFI); An Instantiation and Implementation of the Generic Autonomic Network Architecture (GANA) Model onto Heterogeneous Wireless Access Technologies using Cognitive Algorithms; Feb 2020
- 10.5.l RFC 8993: A Reference Model for Autonomic Networking; May 2021
- 10.5.m RFC 8990: A Generic Autonomic Signaling Protocol; May 2021
- 10.5.n RFC 8994: Autonomic Control Plane; May 2021

18.10.6 AI, IoT and 5G Convergence

Zukünftige Netz-
werkvisionen

Die 5. Generation (5G) der Mobilfunknetze wird eine fundamentale Bedeutung bei der Weiterentwicklung des IoT haben. In Bezug darauf kann man bereits heute von einer Konvergenz der 5G-Mobilfunknetze mit dem IoT sprechen. Die Ideen für die Unterstützung dieser Konvergenz werden intensiv entwickelt. Bei diesen Entwicklungen spielen die Konzepte für (Big) Data Analytics und Maschinelles Lernen eine sehr wichtige Rolle. Für weitere Informationen darüber siehe:

- 10.6.a Ying Wang, et al.: A Data-Driven Architecture for Personalized QoE Management in 5G Wireless Networks; IEEE Wireless Communications, Vol. 24(1), Feb 2017; DOI: 10.1109/MWC.2016.1500184WC
- 10.6.b Chunxiao Jiang, et al.: Machine Learning Paradigms for Next-Generation Wireless Networks; IEEE Wireless Communications, Vol. 24(2), Apr 2017; DOI: 10.1109/MWC.2016.1500356WC
- 10.6.c Zhiyuan Xu, Yanzhi Wang, Jian Tang, Jing Wang, Mustafa Cenk Gursoy: A deep reinforcement learning based framework for power-efficient resource allocation in cloud RANs; IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2017; DOI: 10.1109/ICC.2017.7997286

- 10.6.d Paulo Valente Klaine, et al. A Survey of Machine Learning Techniques Applied to Self-Organizing Cellular Networks; *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 19(4), Jul 2017; DOI: 10.1109/COMST.2017.2727878
- 10.6.e Rongpeng Li, et al.: Intelligent 5G: When Cellular Networks Meet Artificial Intelligence; *IEEE Wireless Communications*, Vol. 24(5), Oct 2017; DOI: 10.1109/MWC.2017.1600304WC
- 10.6.f Magnus Malmström: 5G Positioning using Machine Learning; Master of Science Thesis in Applied Mathematics, Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2018
- 10.6.g Yang Yang, et al.: DECCO: Deep-Learning Enabled Coverage and Capacity Optimization for Massive MIMO Systems; *IEEE Access*, Apr 2018; DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2828859
- 10.6.h Mowei Wang, et al.: Machine learning for networking: Workflow, advances and opportunities; *IEEE Network*; Vol: 32(2), Mar - Apr 2018; DOI: 10.1109/MNET.2017.1700200
- 10.6.i Zhifeng Zhao, et al.: Deep Reinforcement Learning for Network Slicing; arXiv:1805.06591v2, May 2018
- 10.6.j Chaoyun Zhang, Paul Patras, Hamed Haddadi: Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey; arXiv:1803.04311v2, Sep 2018
- 10.6.k Na Chen, Minoru Okada: Toward 6G Internet of Things and the Convergence With RoF System; *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, Issue 11, Jun 2021; DOI: 10.1109/JIOT.2020.3047613
- 10.6.l Yushan Siriwardhana, Pawani Porambage, Madhusanka Liyanage, Mika Ylianttila: AI and 6G Security: Opportunities and Challenges; Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Jun 2021; DOI: 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482503
- 10.6.m Ebenezer Esenogho, Karim Djouani, Anish M. Kurien: Integrating Artificial Intelligence Internet of Things and 5G for Next-Generation Smartgrid: A Survey of Trends Challenges and Prospect; *IEEE Access*, Vol. 10, Jan 2022; DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3140595
- 10.6.n Leila Ismail, Rajkumar Buyya: Artificial Intelligence Applications and Self-Learning 6G Networks for Smart Cities Digital Ecosystems: Taxonomy, Challenges, and Future Directions; *Sensors*, Vol. 22, Issue 15, Aug 2022; DOI:10.3390/s22155750

18.11 Abschließende Bemerkungen

Wissen wird von Menschen durch die Beobachtung von Umwelt und Natur, Gedanken, Erinnerungen, Erfahrungen und Lernen erworben. Die zu diesen Fähigkeiten führenden informationsverarbeitenden Prozesse im menschlichen Gehirn werden als *menschliche Kognition* (Human Cognition) bezeichnet. Um technische Systeme zu befähigen, ebenso intelligent wie Menschen zu sein und sich folglich an neue Situationen möglich optimal anzupassen, muss in diesen die menschliche Kognition im

bestimmten Grade nachgebildet werden. Demzufolge gilt als wichtiger Trend bei technischer Entwicklung die Erarbeitung von Ideen zur Einrichtung von auf den Prinzipien menschlicher Kognition basierenden intelligenten Systemen. Es wird also versucht, die menschliche Kognition, d.h. kontextbewusstes Denken, in technischen Systemen nachzubilden. Man spricht in diesem Zusammenhang von intelligenten bzw. kognitiven Systemen, die als *kontextbewusste Systeme* (Context-Aware Systems) angesehen werden können.

18.11.1 Vom IoT zum Intelligent IoT

Intelligent IoT

Von enorm großer Bedeutung ist die Nachbildung der menschlichen Kognition im heutigen Internet of Things (IoT). Bestrebungen in diese Richtung führen zur Entstehung von Intelligent IoT (IIoT). Dies bedeutet, dass Komponenten/Systeme im zukünftigen IIoT eine *künstliche Intelligenz* (KI, *Artificial Intelligence*, AI) besitzen werden. Infolge werden sie in der Lage sein, situationsbewusst zu handeln und somit, wichtige Prozesse im Laufe der Zeit eigenständig zu optimieren und sich an eine neue Situation möglichst optimal anzupassen. Bevor diese Idee im heutigen IoT verwirklicht werden kann, müssen relevante Messwerte und Ereignisse kontinuierlich erfasst und dann auf eine spezielle Art für weitere Analysen bzw. zu Lernzwecken dokumentiert und archiviert werden.

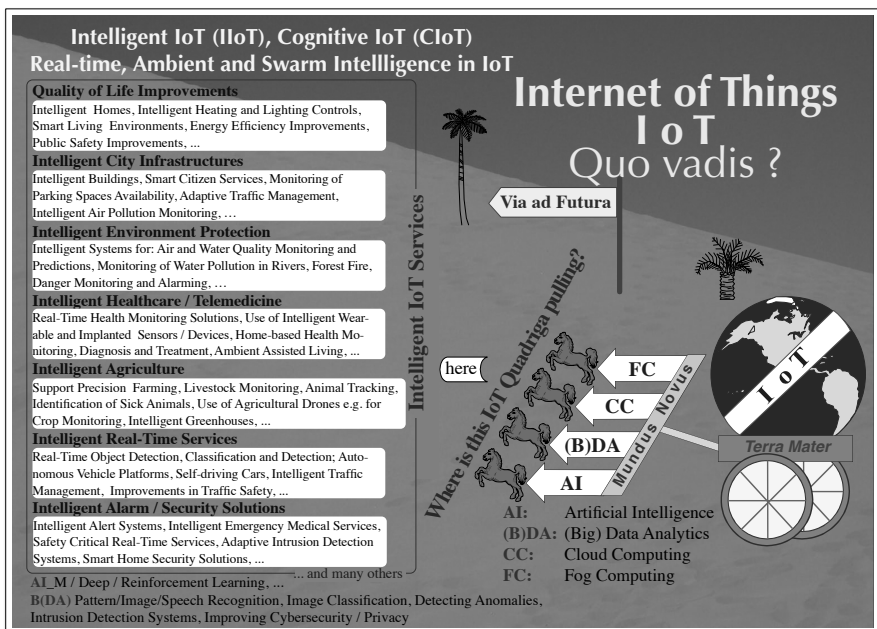


Abb. 18.11-1: Internet: Quo vadis?

Big IoT Data

Durch das kontinuierliche Erfassen verschiedener Arten von Daten im IoT wird ihre Menge jedoch immer größer. Man spricht von *Big Data* bzw. *Big IoT Data*. Bevor sie beim maschinellen Lernen zum Einsatz kommen, müssen diese Daten entspre-

chend analysiert werden. Die Analyse von Big Data als eine Art 'Vorbereitung auf ihren Einsatz', u.a. zur Unterstützung von Lernprozessen im IoT, wird als *Big Data Analytics* bezeichnet. Das wesentliche Ziel der Analysen von Big Data ist die Entdeckung von versteckten Mustern, unbekanntem Korrelationen und anderen nützlichen Informationen in den gesammelten 'riesigen Datenmengen'. Die Ergebnisse dieser Analysen im IoT werden einerseits Menschen angezeigt, damit sie die gewonnenen Informationen nutzen können. Andererseits sollen verschiedene IoT-Komponenten auf der Basis dieser Informationen selbständig lernen und sich dadurch in die Lage versetzen, auf verschiedene Situationen und plötzlich auftretende Ereignisse im IoT fast so intelligent wie Menschen zu reagieren. Sobald das IoT die eben geschilderten Fähigkeiten besitzt, immer kontextbewusst (situationsbewusst) agieren zu können, wird man von IIoT sprechen.

Die Evolution des IoT zum IIoT schreitet unaufhörlich voran und führt zu solchen Erweiterungen des IoT, um den Verlauf der menschlichen Kognition im IoT nachbilden zu können. Die kognitiven Fähigkeiten des Menschen ermöglichen ihm, verschiedene Arten von Informationen aus der Umwelt wahrzunehmen und weiterzuverarbeiten. Da die Fähigkeiten von IIoT im gewissen Grade den kognitiven Fähigkeiten des Menschen entsprechen werden, wird es als Cognitive IoT (CIoT) bezeichnet. Es sei hervorgehoben, dass AI, (Big) Data Analytics, Cloud Computing und Fog Computing als die vier wichtigsten treibenden Kräfte, quasi als 'Zugpferde' einer IoT Quadriga, bei der Weiterentwicklung des IoT zum IIoT angesehen werden können. Abb. ?? bringt dies illustrativ zum Ausdruck.

Cognitive IoT

Die Garantie der Sicherheit im IoT ist heutzutage ein enorm breites und wichtiges Thema. Man kann sich heute noch kaum vorstellen, mit welchen bösartigen Angriffen und anderen Unsicherheiten im zukünftigen IIoT gerechnet werden muss. Es bleibt nur zu hoffen, dass es statt 'Intelligent Internet of Things (IIoT)' nicht gesagt werden muss: 'Intelligent Internet of Threats (IIoT)'.

Intelligent Internet of Threats

18.11.2 Rückblick auf 50 Jahre Rechnerkommunikation

Nachdem die Networking Trends, die facto Internet Trends, und dabei auch die Migration von IoT zum IIoT, also zukünftige Internet-Aspekte, kurz erläutert wurden, stellt es sich die Frage: Welche relevante, technische sowie organisatorische Entscheidungen und Entwicklungen gab es auf dem Weg zum heutigen Internet? Eine Antwort darauf soll nun ein kurzer Rückblick auf 50 Jahre der Rechnerkommunikation geben.

Zur Entstehung des Internet in der 'heutigen Form' haben zahlreiche, aus letzten fünf Jahrzehnten stammenden Entwicklungen auf dem Gebiet der Rechnerkommunikation geführt. Heutzutage stellt das Internet – organisatorisch und technisch gesehen – ein immens komplexes, über die ganze Welt verteiltes technisches Gebilde dar. Wegen seiner Komplexität folgt es dem Hummel-Phänomen und funktioniert. Daher soll die in Abb. 18.11-2 gezeigte Internet-Hummel die fünf Jahrzehnte der Rechnerkommunikation auf dem Weg zum heutigen Internet anschaulich zum Ausdruck bringen.

Rückblick auf 50 Jahre der Rechnerkommunikation

Um die bedeutenden, zur Entstehung des Internet führenden Ereignisse zu nennen, müssen wir nicht nur die letzten fünf Jahrzehnte nach dem historischen Datum 29. Oktober 1969 betrachten, sondern auch die 60er Jahre. In diesem Zeitraum – besonders

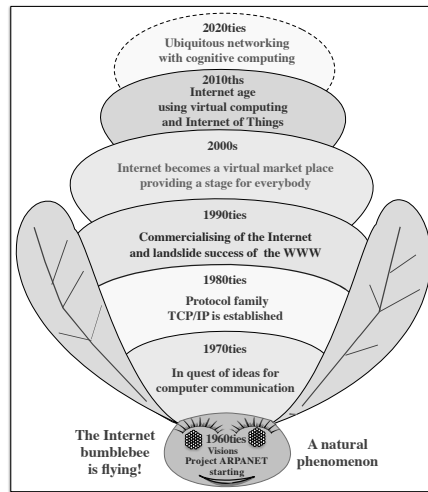


Abb. 18.11-2: Die Internet-Hummel fliegt – ein Naturphänomen

in den 1960er, 1970er, 1980er und 1990er Jahren – gab es eine Vielzahl technischer Ereignisse und Entwicklungen, die als Meilensteine auf dem Weg zum heutigen Internet angesehen werden sollen [Abb. 18.11-3]. Im Hinblick hierauf lassen sich die einzelnen Jahrzehnte kurz wie folgt charakterisieren:

- | | |
|------------------|---|
| Die 1960er Jahre | Das erste experimentelle Rechnernetz namens ARPA(NET) entsteht und die Ära der Rechnerkommunikation beginnt. |
| 1964 | <ul style="list-style-type: none"> ■ Das Konzept für <i>Packet Switching Networks</i> wird von Paul Baran veröffentlicht. |
| 1965 | <ul style="list-style-type: none"> ■ Ted Nelson prägt die Begriffe <i>Hypertext</i> und <i>Hypermedia</i> – also jene, die man heute mit dem Begriff WWW verbindet. |
| 1966 | <ul style="list-style-type: none"> ■ Die Entwicklung des Rechnernetzes namens ARPANET beginnt. |
| 1969 | <ul style="list-style-type: none"> ■ Im März 1969 ist die Idee entstanden, die ARPANET-betreffenden Entwicklungen als sog. <i>Request for Comments</i> (RFC) zu dokumentieren. |
| Ur-Internet | <ul style="list-style-type: none"> ■ Am 29. Oktober 1969 wird das ARPANET mit vier IMPs (<i>Interface Message Processor</i>) als Knoten in Betrieb genommen. Somit war das erste Rechnernetz mit Paketvermittlung geboren.
Die Daten zwischen Hosts werden nach den in RFC 11 (August 1969) spezifizierten <i>Host-Host Software Procedures</i> ausgetauscht. Die IMPs, als Vorfahren von heutigen Routern im Internet, wurden damals untereinander über Telefonleitungen verbunden und dienten als Netzknoten mit Paketvermittlung. |
| Die 1970er Jahre | Die Suche nach Ideen/Konzepten für die Rechnerkommunikation. |
| 1970 | <ul style="list-style-type: none"> ■ ALOHAnet – das erste Funkrechnernetz – wird in Betrieb genommen. ■ Das <i>Host-to-Host-Protocol</i> für das ARPANET wird als RFC 33 spezifiziert und im ARPANET vom Januar 1972 bis zur Umstellung auf TCP/IP (1. Januar 1983) verwendet. |

- Entwicklung des ersten E-Mail-Programms und Erfindung des @-Zeichens durch R. Tomlinson. 1972
- Die Gründung von NIC (*Network Information Center*) u.a. zur Dokumentation und Registrierung von Netzparametern, der Vorläufer von IANA (*Internet Assigned Numbers Authority*).
- ITCP und NCP werden im RFC 675 spezifiziert [Abb. 18.11-3]. 1974
- In diesem RFC wird das Wort *Internet* zum ersten Mal offiziell verwendet. Internet
- CCITT-Standard X.25 für *Packet Switching*: Verbindungsorientierte Übermittlung der Datenpakete – die Grundlage für das spätere MPLS. 1976
- Veröffentlichung des Konzepts von *Ethernet*, Robert M. Metcalfe und David R. Boggs.
- Whitfield Diffie und Martin Hellman publizieren die Idee zur Realisierung eines *Schlüsseltauschs mittels kryptographischer Funktionen* und somit der Verständigung auf einen gemeinsamem geheimen Schlüssel. DHE
- Das *OSI-Referenzmodell* entsteht und wird später in der CCITT X.200 Empfehlung spezifiziert. 1977
- Das *RSA-Verfahren* (Rivest, Shamir und Adelman) als Grundlage für den Aufbau asymmetrischer Kryptosysteme mit öffentlichen Schlüsseln (*public keys*), wird zum Patent angemeldet.
- Das *Network Control Protocol* (NCP) und das *Internet Transmission Control Program* (ITCP) werden durch IP und TCP (*Transmission Control Protocol*) funktionell ersetzt [Abb. 18.11-3]. Dies ist die Geburtsstunde der Protokolle IP und TCP; eine verbindungslose 'Alternative' zum TCP ist ebenso vorgesehen. 1978
- Das Gremium *Internet Configuration Control Board* (ICCB) wird gegründet, um die Entwicklung des Internets zu koordinieren. 1979

Die Etablierung des Internets mit der TCP/IP-Protokollfamilie.

Die 1980er Jahre

- Der Aufbau von CSNET (*Computer Science Network*) wird initiiert und dieses dient u.a. als Vorläufer von NSFNET (*National Science Foundation Network*). 1981
- Der Plan für die ARPANET-Umstellung von ITCP/NCP auf TCP/IP wird entwickelt.
- Am 1. Januar 1983 (sog. *Flag Day*) wird das ARPANET auf TCP/IP umgestellt und damit hat die Ära von TCP/IP begonnen. 1983
- Aus dem ARPANET entsteht das MILNET (*Military Network*) und der restliche Teil bildet das wissenschaftliche, zivile ARPANET.
- Der Aufbau von DFN (*Deutsches Forschungsnetz*) beginnt und damit auch die Einführung des Internets in Deutschland.
- Die Kopplung des DFN mit dem CSNET führt dazu, dass die erste, über das Internet transportierte E-Mail in Deutschland an der Universität Karlsruhe am 3. August 1984 empfangen werden kann [Zor14]. 1984
- Das NSFNET in einer modernen hierarchischen Struktur (*Backbone-Konzept*) wird etabliert (eine Art Internet-Backbone und die große Akzeptanz von NSFNET führt zur Stilllegung des ARPANET). 1986

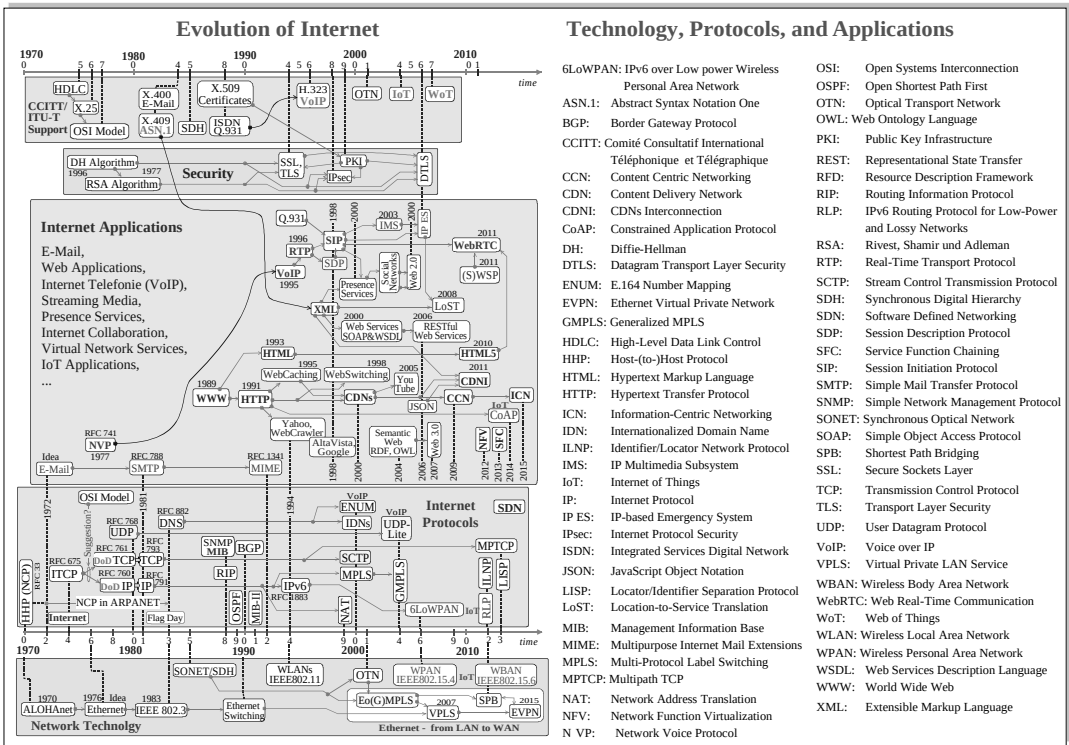


Abb. 18.11-3: Evolution der Internet-Technologien; das 1977 in RFC 741 beschriebene 'Network Voice Protocol' von *Danny Cohen* kann als früher erster Versuch gewertet werden, über das damalige ARPANet voll-duplex Sprachkommunikation in Echtzeit zu führen.

TLD .de

- Am 5. November 1986 wird die Top-Level-Domain .de für Deutschland im DNS eingetragen.

Die 1990er Jahre

Die Kommerzialisierung des Internet und der Siegeszug des WWW.

1990

- Am 28. Februar 1990 wird das alte, ausgediente ARPANET offiziell stillgelegt. Seine Rolle übernimmt das moderne, in den 80er Jahren eingerichtete, Backbone-basierte NSFNET.

1991

- Das NSFNET wird für kommerzielle Nutzung als eine Art Internet-Backbone freigegeben. Die Folge ist die Kommerzialisierung des Internet und der Internet-basierten Technologien.

1995

- Der Backbone-Teil im NSFNET wird auf neue Struktur mit NAPs (*Network Access Point*) umgestellt. Diese waren Vorläufer moderner IXPs (*Internet eXchange Point*) und führen zur Entstehung von ISPs (*Internet Service Provider*).

Die 2000er Jahre

Das Internet als Information Delivery Network, als virtueller Marktplatz und der Beginn von Internet of Things.

Das Internet im Zeitalter von Virtual Computing und von Internet of Things.

Die 2010er Jahre

Für eine Vertiefung der chronologischen Entwicklung des Internet sei verwiesen auf:

- Meilensteine in der Entwicklung des Internets
- Evolution of the Internet – Significant Technical Events

Das Internet im Zeichen der *Künstlichen Intelligenz* ist im Entstehen. Die Künstliche Intelligenz stellt die Grundlage dafür dar, dass eine *Federation* verschiedener digitaler Zwillinge als eine Art globaler Digitaler Zwilling der Erde (*Digital Twin of the Earth*) mit dem Ziel einrichtet werden kann, das Leben auf der Erdkugel auf Dauer bewahren zu können. Eine entsprechende Initiative hierfür wurde unter dem Titel *Destination Earth*¹ (DestinE) von der Europäischen Union bereits gestartet.

Die 2020er Jahre

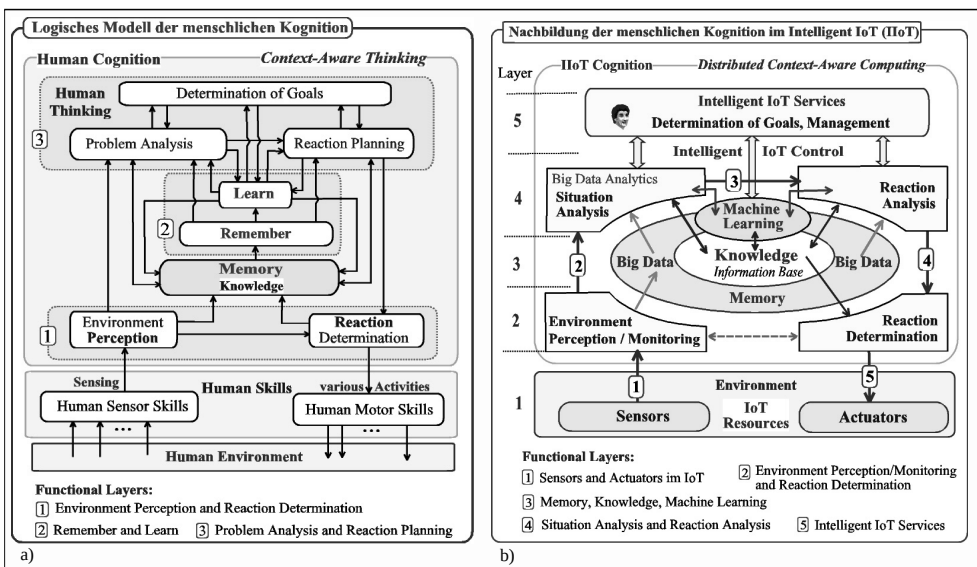


Abb. 18.11-4: Kognition der realen Welt a) Modell der menschlichen Kognition, b) Abbildung durch Intelligent IoT (IIoT) in der virtuellen Welt

Abb. 18.11-4a) vergleicht das Modell für kontextbewusstes Denken (*Context-Aware Thinking*) des Menschen mit dem in Abb. 18.11-4b) gezeigten Verlauf der kontextbewussten Informationsverarbeitung (*Context-Aware Computing*) im IIoT, d.h. mit dem Verlauf von *Distributed CAC*. Hierbei können die einzelnen Layer im Modell der IIoT-Kognition wie folgt beschrieben werden:

Distributed CAC

- **Layer 1:** *Sensors and Actuators im IoT*. Die Funktionalität dieses Layers entspricht weitgehend der menschlichen Sensorik (*Human Sensor Skills*) und Motorik (*Human Motor Skills*).
- **Layer 2:** *Environment Perception/Monitoring and Reaction Determination*. Dieses Layer im IIoT ist der Funktion nach mit dem in Abb.18.11-4a) gezeigten Layer 'Environment Perception and Reaction Determination' im Modell für das kontextbewusste Denken von Menschen vergleichbar.


¹siehe: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination>

- **Layer 3: Memory, Knowledge, Machine Learning.** Dieser Layer entspricht dem in Abb. 18.11-4a) dargestellten Layer 'Remember and Learn' des menschlichen Gedächtnis (*Memory*), dem dort gespeicherten Wissen (*Knowledge*) und den menschlichen Fähigkeiten Erinnern (*Remember*) und Lernen (*Learn*).
- **Layer 4: Situation Analysis and Reaction Analysis.** Dieses Layer entspricht weitgehend dem in Abb. 18.11-4a) dargestellten menschlichen Denken (*Human Thinking*) bei der Analyse wahrgenommener Informationen (*Problem Analysis*) und der Vorbereitung einer Reaktion auf diese (*Reaction Analysis*).
- **Layer 5: Intelligent IoT-Services.** Die intelligenten IoT-Services und ihre Ziele (*Goals*) basieren auf dem beim maschinellen Lernen erworbenem Wissen. Folglich entsprechen diese weitgehend den hier erwähnten *Goals* der menschlichen Strategie (*Human Strategy*) in Abb. 18.11-4a).

Dank an Alle!

Das Internet ist eine der größten technischen Schöpfungen des 20ten Jahrhunderts mit der Beteiligung einer enormen Vielzahl der Menschen auf der ganzen Welt. Dafür geht unseren Dank an Alle, die sich mit ihrem organisatorischen und technischen Engagement, Wissen und Können zur Entstehung des Internet beigetragen haben.

Die zur Entstehung des intelligenten "Internet von morgen" führenden technischen Ideen und Systemlösungen möchten wir im nächsten Jahr in einem zusätzlichen, dieses Buch ergänzendes Werk ausführlich präsentieren.

Diese Leseprobe haben Sie beim
 edv-buchversand.de heruntergeladen.
Das Buch können Sie online in unserem
Shop bestellen.

[Hier zum Shop](#)