



Industrial Internet of Things

Protokolle und Standards



Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
Prozesse und Systeme

Universität Potsdam



Chair of Business Informatics
Processes and Systems

University of Potsdam

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gronau
Lehrstuhlinhaber | Chairholder

August-Bebel-Str. 89 | 14482 Potsdam | Germany

Tel +49 331 977 3322

Fax +49 331 977 3406

E-Mail ngronau@lswi.de

Web lswi.de



Einführung

Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung

Protokolle und Standards

Lernziele

- Gründe für die Entwicklung neuer Standards für das Internet of Things kennen
- Anforderungen an vernetzte Sensoren kennen
- Spezifikation des IEEE 802.15.4 Standards verstehen
- Die Arten von LoWPANs kennenlernen
- Ziel der OPC UA Spezifizierung kennen
- Sicherheit als einen integralen Bestandteil von OPC UA beschreiben



Einführung

Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung

Sinn von neuen Protokollen und Standards für IoT/Industrial Internet

Annahmen für herkömmliches Internet

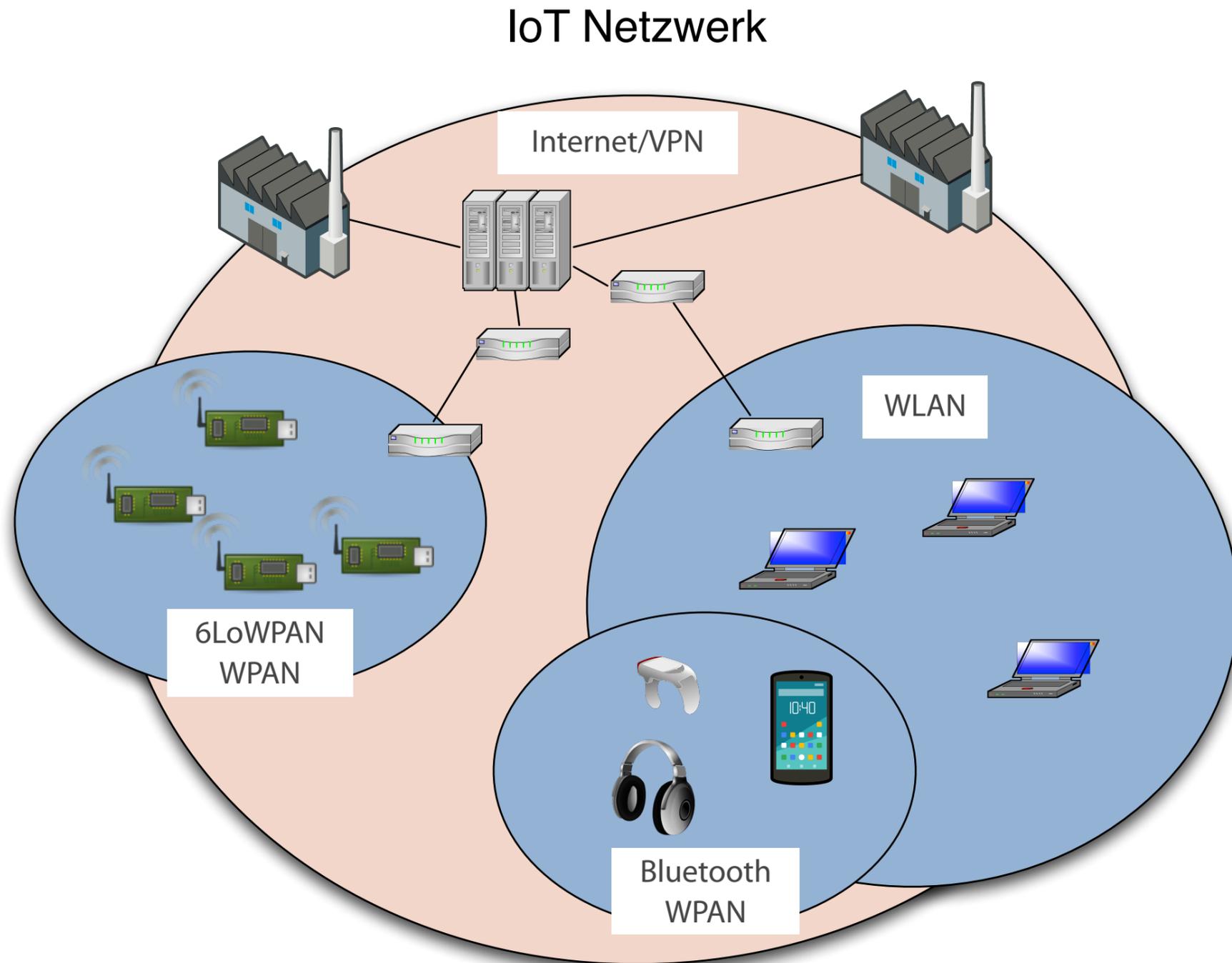
- Ausreichend Ressourcen vorhanden
- Generell stabile Infrastruktur-Anbindung

Annahmen für IoT/Industrial Ethernet

- Viele kleine Geräte
- Verlustbehaftete Anbindung
- Wenig Rechenleistung
- Oft batteriebetrieben

Für das Internet der Dinge müssen Protokolle unter anderen Annahmen erstellt werden, als für herkömmliche Netze. Besonderer Fokus muss auf Energieverbrauch und verlustbehaftete Übertragung gerichtet werden.

Kommunikation im Internet of Things/Industrial Internet

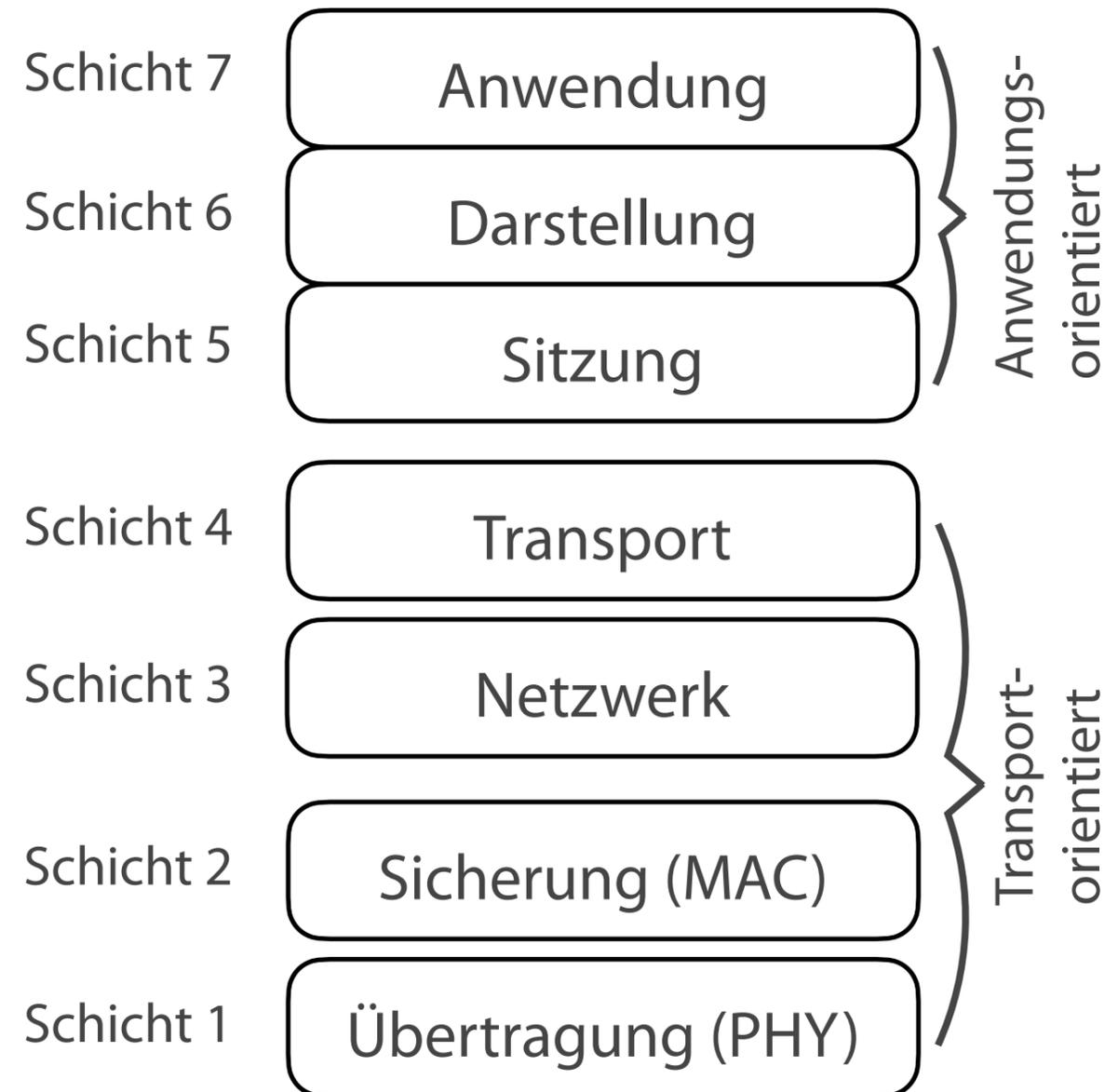


IoT/Industrial Internet besitzt variable Eigenschaften

- Netzwerkgröße
- Topologie von Netzen
- Benötigte/Verfügbare Übertragungsraten
- Konsistenz und Dauer von Netzstrukturen

IoT Netze verbinden Geräte mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Aus diesem Grund existiert eine Vielzahl an Protokollen und Standards die im Bereich IoT/Industrial Internet genutzt werden.

Wiederholung: Architektur von Netzwerkanwendungen

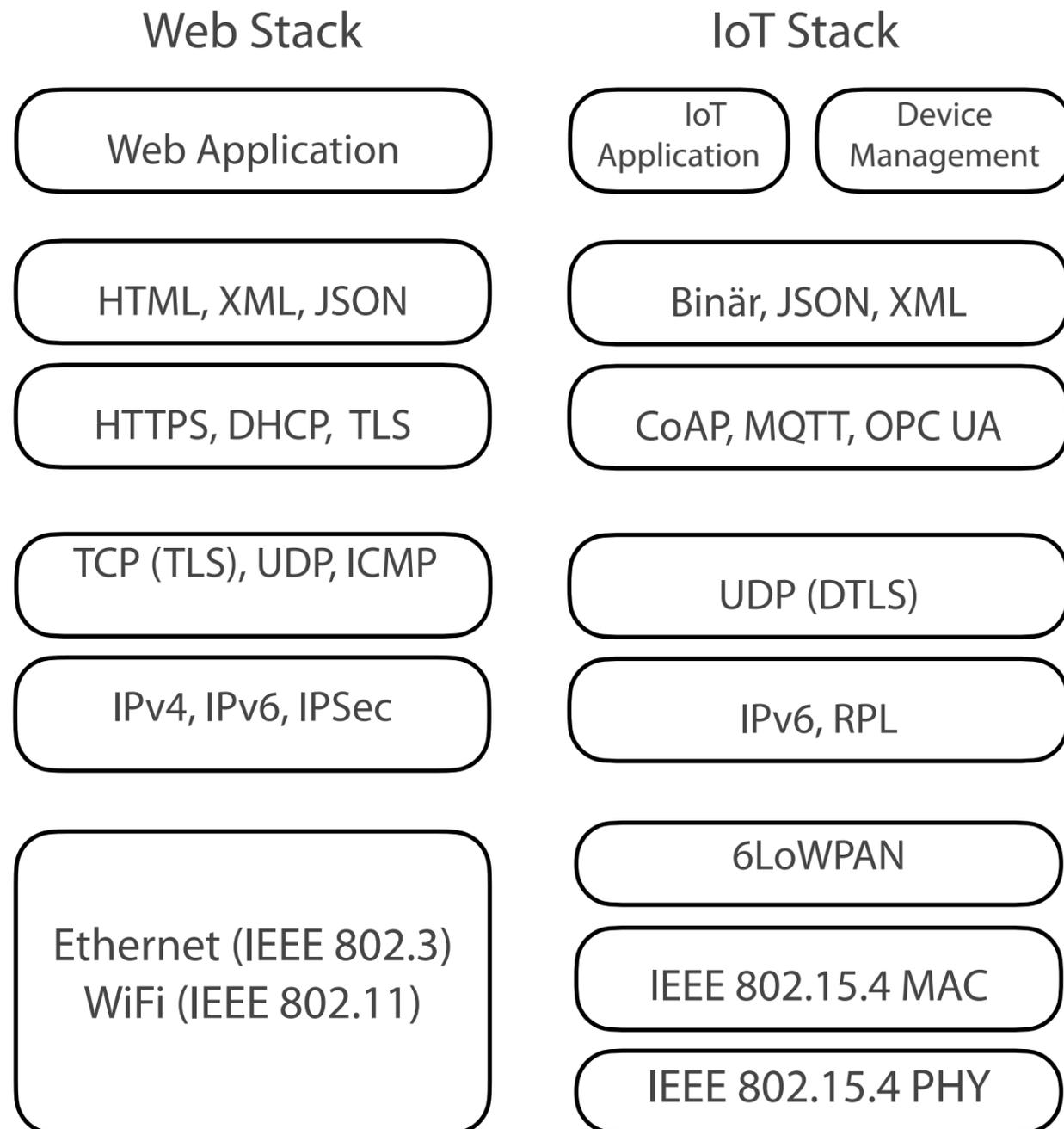


ISO/OSI Schichtenmodell

- Open Systems Interconnection Modell, Schichtenmodell für Netzwerkprotokolle
- Schicht 1–4 : Transportorientiert
- Schicht 5–7 : Anwendungsorientiert
- Garantiert Interoperabilität durch Unabhängigkeit einzelner Schichten

Das OSI Schichtenmodell ist ein Referenzmodell für Netzwerkprotokolle. Ziel des OSI Modells ist die Abstraktion der Netzwerkkommunikation, um diese auch zwischen unterschiedlichsten Geräten zu ermöglichen.

Beispiel: IoT Stack im Vergleich mit traditionellem Web Stack



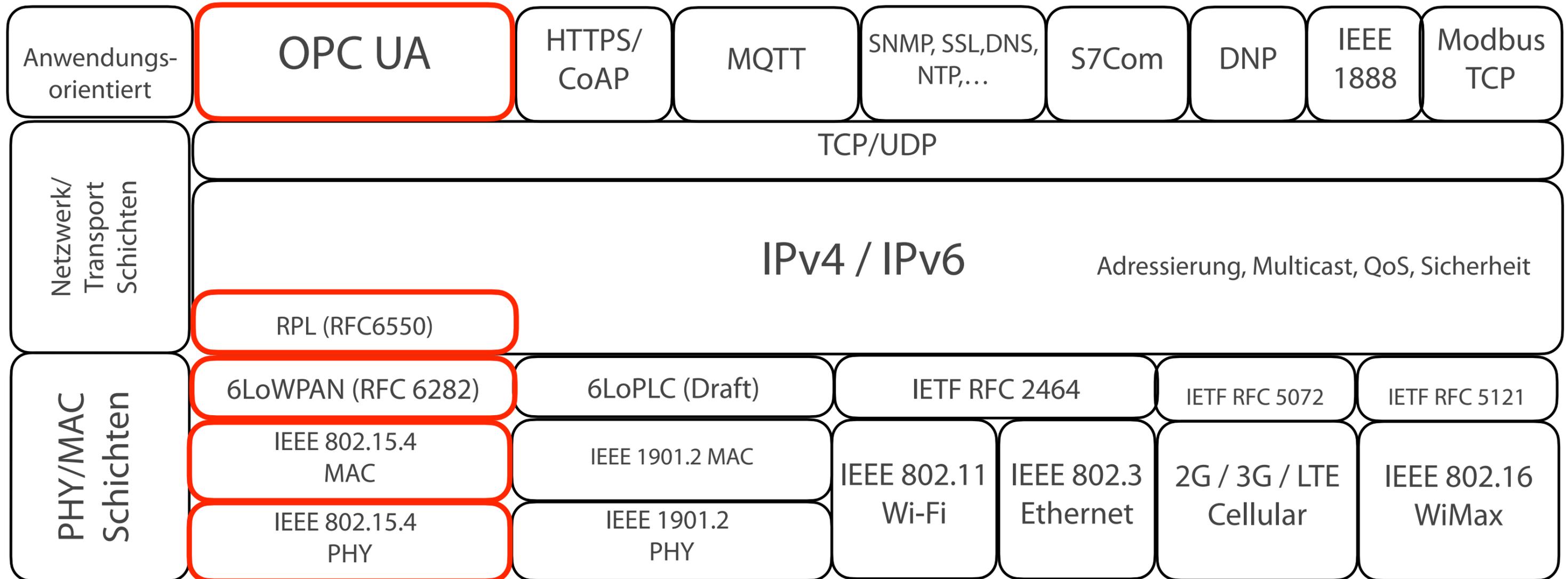
Fokus auf ressourcensparende Protokolle

- Schicht 1 (PHY) und 2 (MAC): IEEE 802.15.4
- 6LoWPAN Adaptionsschicht
- Schicht 3 (Netzwerk): RPL für IPv6 in WSN Routing
- Schicht 5-7 (Anwendung): Spezialisierte Anwendungsprotokolle, Binärformate

Die genutzten Protokolle eines traditionellen Web-Stacks unterscheiden sich von denen eines IoT-Stacks.

IoT/Industrial Internet Protokolle

Eine (unvollständige) Übersicht industrieller Standards



Es gibt eine große Anzahl an Protokollen und Standards für IoT und Industrial Internet. In dieser Vorlesung werden beispielhaft einige vorgestellt.



Einführung

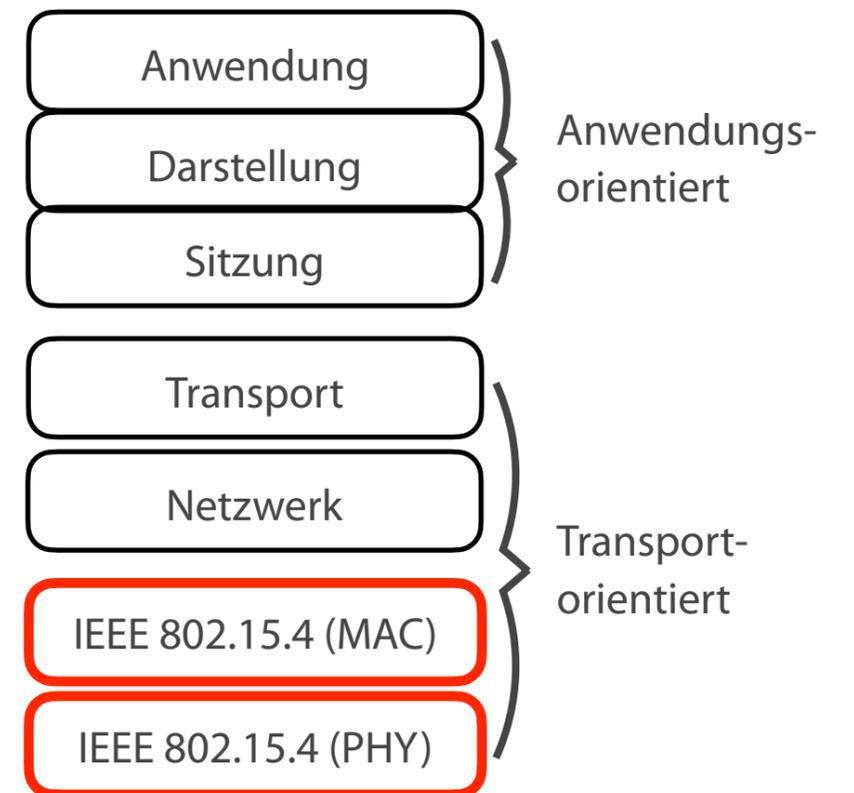
Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung



Anwendungsbeispiele für Wireless Sensor Networks (WSN) im Industriebereich



Ölindustrie: Pipeline Überwachung

- Überwachung von Druck, Vibrationen
- Frühzeitige Alarmierung bei Beschädigungen



Agrarindustrie: Bewässerungsoptimierung

- Überwachung von Luftfeuchtigkeit, Temperatur
- Anpassung von Bewässerung



Prozessautomatisierung: Maschinenüberwachung

- Überwachung von Prozess und Maschinen
- Verringerung von Kosten für Prozessüberwachung und Maschinenwartung

In der Industrie finden sich Anwendungsgebiete für WSNs vor allem in der Überwachung von Maschinen und Umweltparametern.

Herausforderungen für Netzwerke im Internet der Dinge

Anforderungen an Sensoren ohne externe Stromzufuhr

- Trotz Batteriebetrieb lange Betriebsdauer (Monate - Jahre)
- Robuste Netze trotz schlechter Übertragungsraten/ verlustbehafteter Übertragung
- Eigenständige Netzverwaltung

Für das Internet der Dinge werden robuste und energiesparende Kommunikationsmöglichkeiten benötigt.

IEEE 802.15.4 Standard

802.15.4 — IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks

- Übertragungsstandard für kabellose Kommunikation mit geringer Datenrate (≤ 1 MB/s)
- Definiert PHY- und MAC-Schicht des OSI Modells
- PHY : Spezifikation der Radiokommunikation
- MAC: Algorithmen für Zugriff auf Übertragungsmedium
- Spezifikation v. Aufbau und Management von Wireless Personal Area Networks (WPANs)

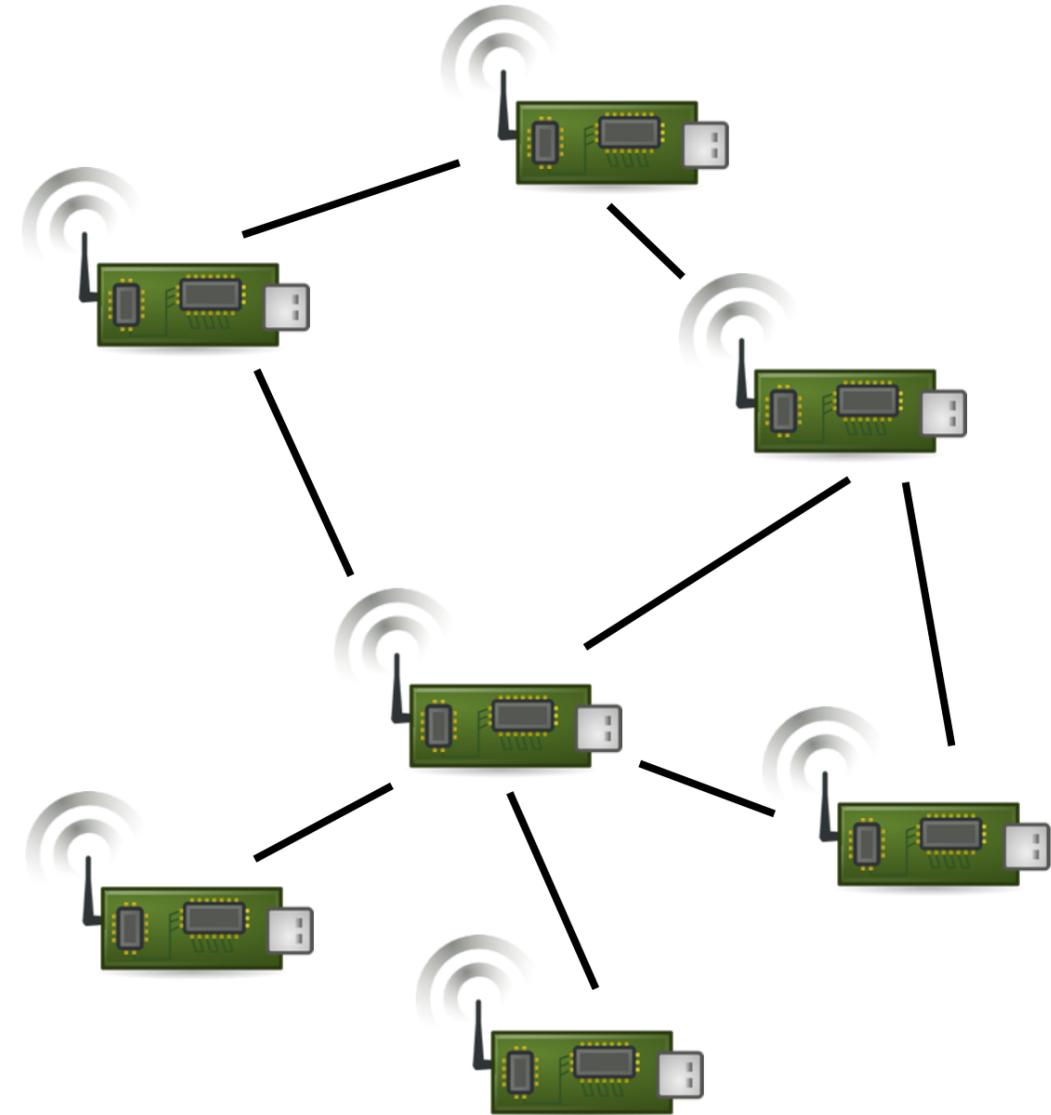
Frequenzband	Modulation	Datenrate	Region
868-868,6 MHz	BPSK	20 KBit/s	Europa
902-928 MHz	BPSK	40 KBit/s	USA
2400-2483,5 MHz	O-QSPK	250 KBit/s	Global

Beispielspezifizierungen des PHY-Layers für den 802.15.4 Standard

Low Power and Lossy Networks

Low Power and Lossy Networks (LLNs):

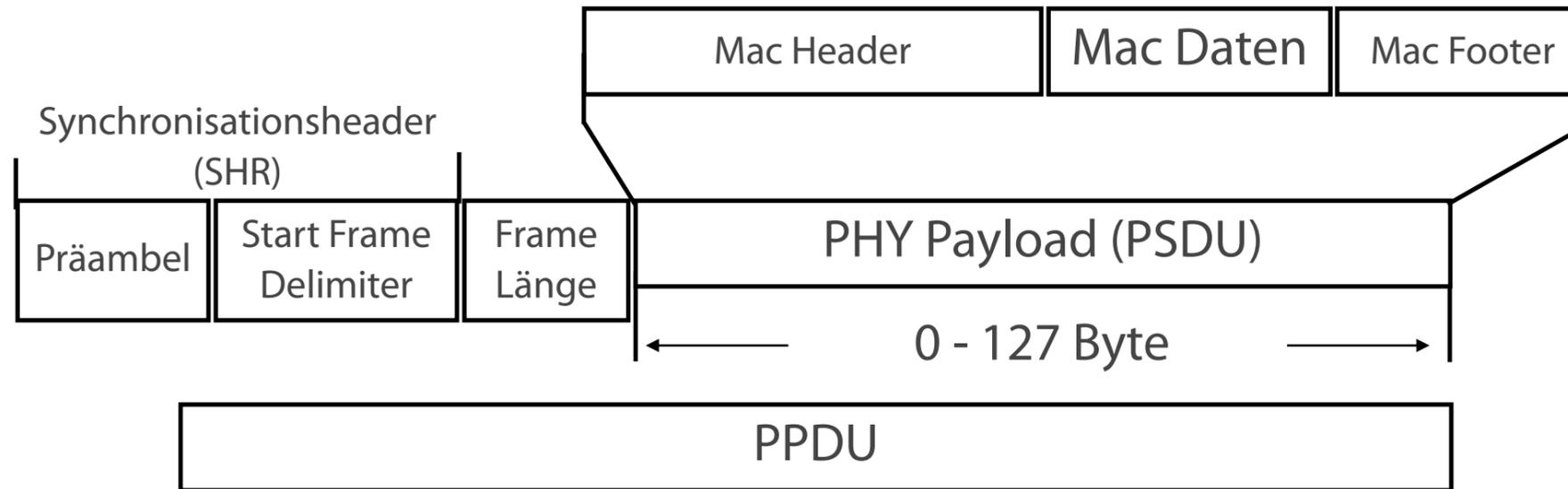
- Netzwerke, deren Knoten wenig Ressourcen besitzen
- Ziel: Lange Verfügbarkeit trotz begrenzter Batterie- und Sendeleistung
- Ziel: Resistenz gegen Knotenausfälle
- Anderes Anforderungsprofil als herkömmliche Netze (Energieverbrauch, Datenrate)
- Internetanbindung über Borderrouter



IEEE 802.15.4 bietet sich zur Umsetzung von Funkübertragungen in LLNs an.

802.15.4

Frame-Struktur auf PHY und MAC Schicht

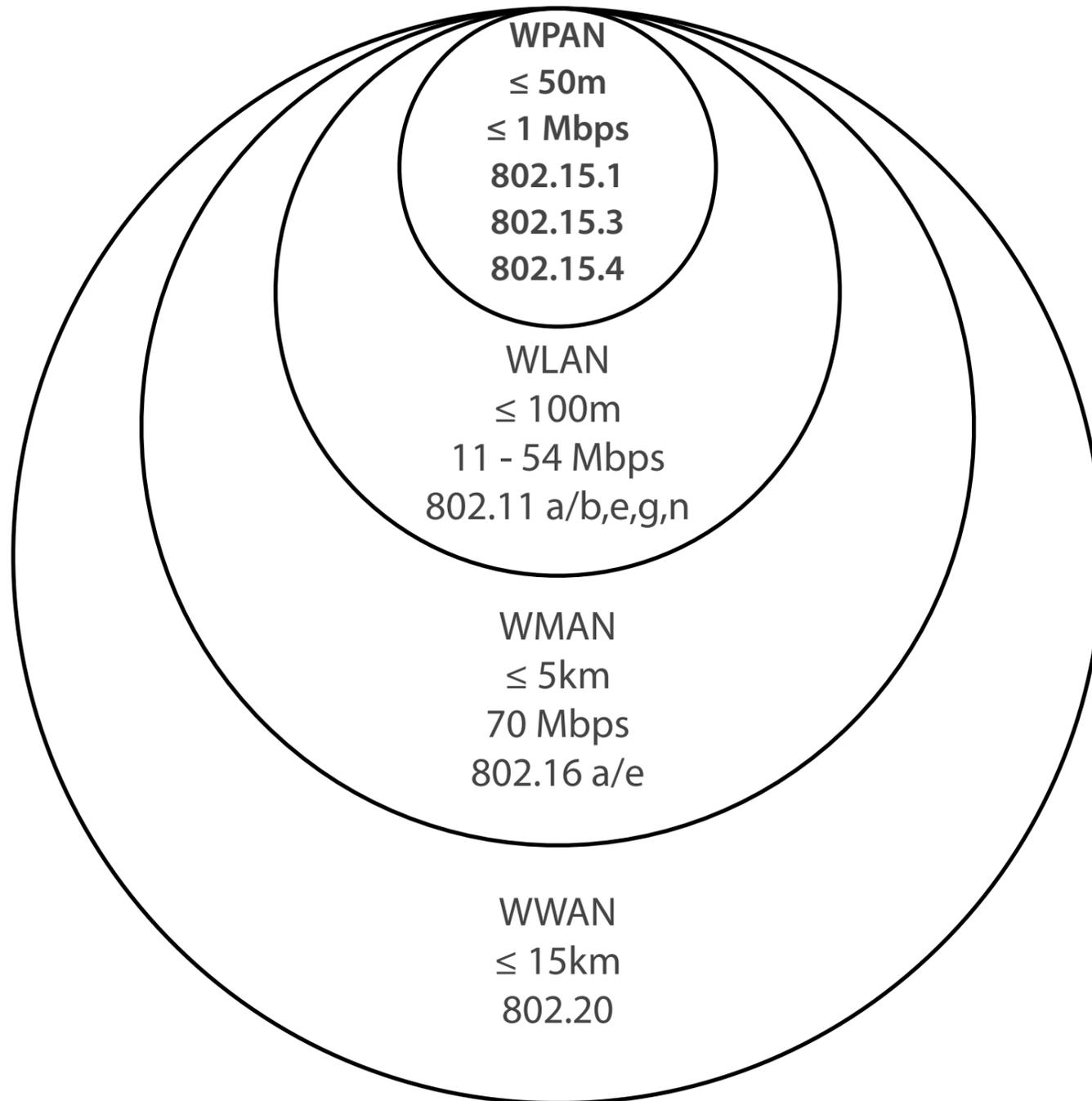


Paket-Struktur von 802.15.4 Datenpaketen

- Sehr kleine Paketgrößen (Nutzlast unter 127 Byte)
- MAC Header Größe variabel
- Optionale Sicherheitsfeatures in MAC Header

Das Format von 802.15.4 Paketen entspricht nicht dem Standard-Ethernet Format. Auf der Sicherungsschicht dürfen Pakete maximal 127 Byte groß sein.

Wireless Personal Area Networks (WPANs)



LLN Netzwerke werden häufig als WPANs realisiert

- Netzwerke über sehr kurze bis kurze Distanzen (≤ 50 Meter)
- Meist geringe Datenraten, Fokus auf Minimierung des Energieverbrauch
- Bekannter WPAN-Standard: Bluetooth (IEEE 802.15.1)

WPANs vereinen geringen Energiebedarf und kleine Netzwerke mit einer fehlerresistenten Topologie. Damit eignen sie sich gut für IoT Anwendungsbereiche wie z.B. Home Automation.

IEEE 802.15.4

Netzwerkmanagement

Jedes IEEE 802.15.4 WPAN benötigt einen PAN Koordinator

- Gerät, welches als Manager für das PAN fungiert
- Behandelt Ein- und Austritt von Geräten in PAN
- Weist PAN eindeutige PAN ID zu
- Optional: Weist Geräten Short Address zu

Jeder WPAN-Teilnehmer kann zwei Adressen haben

- Long Address: **64-bit global gültige**, eindeutige ID (extended universal identifier: EUI-64)
- Short Address (optional) : **16-bit PAN-gültige** Adresse

802.15.4 PANs besitzen mindestens einen Teilnehmer, der als PAN Koordinator für das Management des Netzwerkes zuständig ist.

IEEE 802.15.4

Unterscheidung zwischen Gerätetypen



Full Function Device (FFD)

- Komplette Protokollimplementierung
- Kann als PAN Koordinator agieren
- Mindestens 1 FFD pro 802.15.4 WPAN
- Beispiel: Smart Home Controller

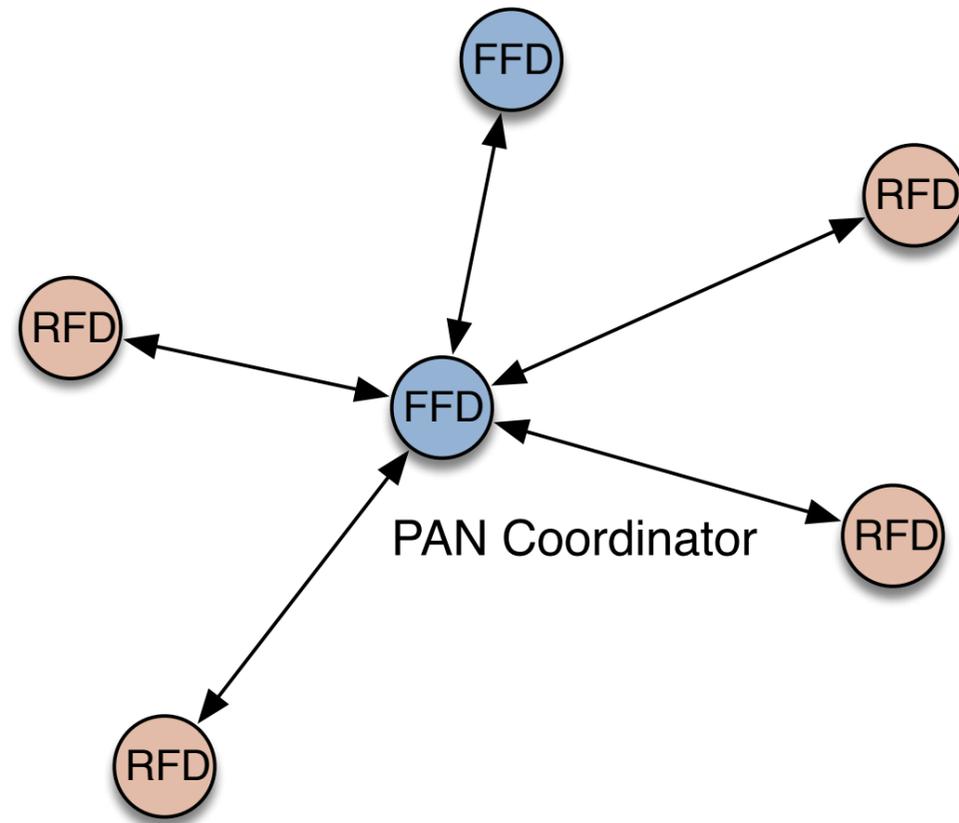
Reduced Function Device (RFD)

- Reduzierter Funktionsumfang
- Einfachere Implementierung
- Anbindung an FFD-Knoten erforderlich
- Beispiel: Temperatursensor, Schalter

Teilnehmer eines 802.15.4 WPANs können sich in den abgebildeten Funktionen unterscheiden.

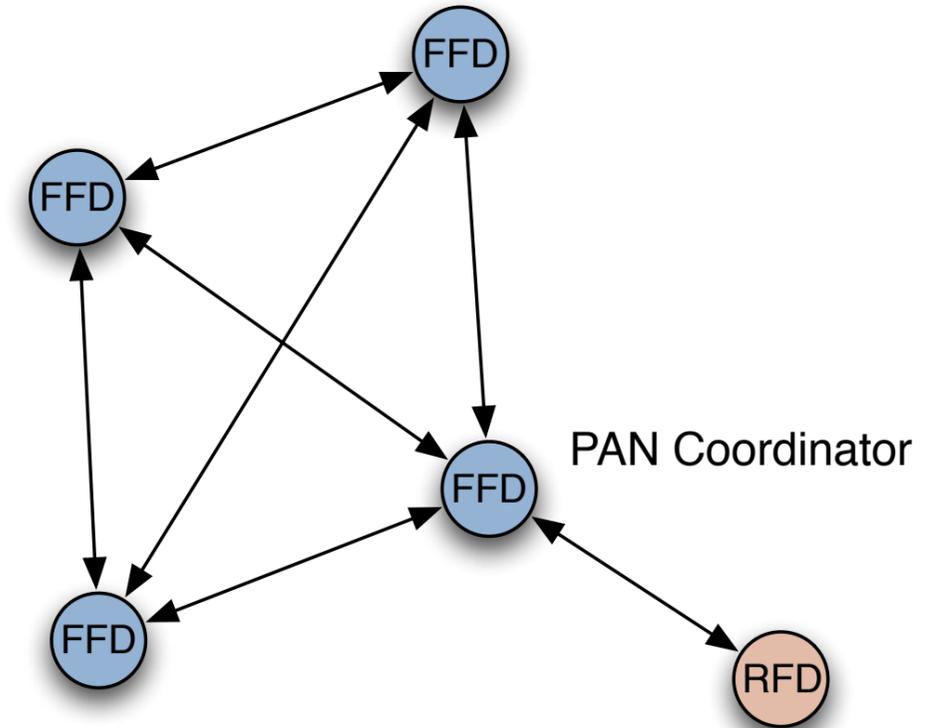
IEEE 802.15.4: Topologien

Stern und Peer-to-Peer



Stern Topologie

- Geräte kommunizieren nur über PAN Koordinator
- PAN Koordinator oft an Stromquelle
- Restliche Geräte oft batteriebetrieben
- Beispielsdomäne: Home Automation

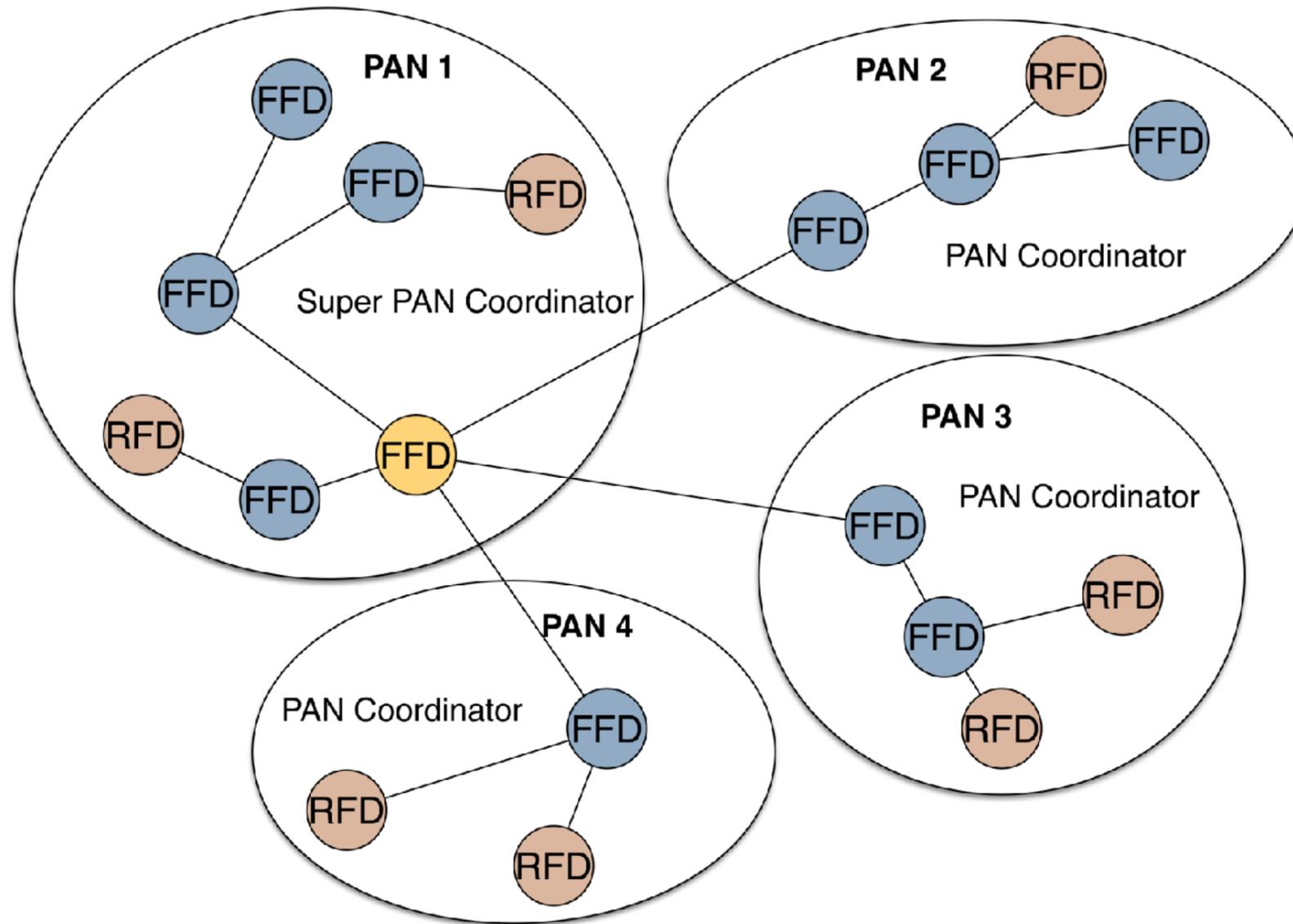


Peer-to-Peer Topologie

- Geräte kommunizieren untereinander (in Reichweite)
- Erlaubt komplexere Strukturen wie Clusterbaum
- Beispielsdomäne: Industrial Control, Intelligent Agriculture

IEEE 802.15.4: Topologien

Clusterbaum Topologie



Clusterbaum Topologie für den Zusammenschluss von PANs

- Spezielle Peer-to-Peer Topologie
- Schließt mehrere PANs zusammen
- Super PAN Koordinator kontrolliert PAN-Verbund
- PAN Koordinatoren kontrollieren jeweils eigenes PAN

Der Clusterbaum ist eine spezielle Art der Peer-to-Peer Topologie, mit der mehrere PANs verbunden werden können.

IEEE 802.15.4

Sicherheit

Es werden verschiedene Sicherheitsmodi unterstützt

- Implementierung ist optional
- Falls implementiert —> AES-128 auf Sicherungsschicht
- Authentizität, Vertraulichkeit und Verhinderung von Replay-Angriffen werden garantiert

Die Sicherheitsimplementierung gilt nur für die Sicherungsschicht. Höhere Schichten müssen eigene Sicherheitsmaßnahmen vornehmen!



Einführung

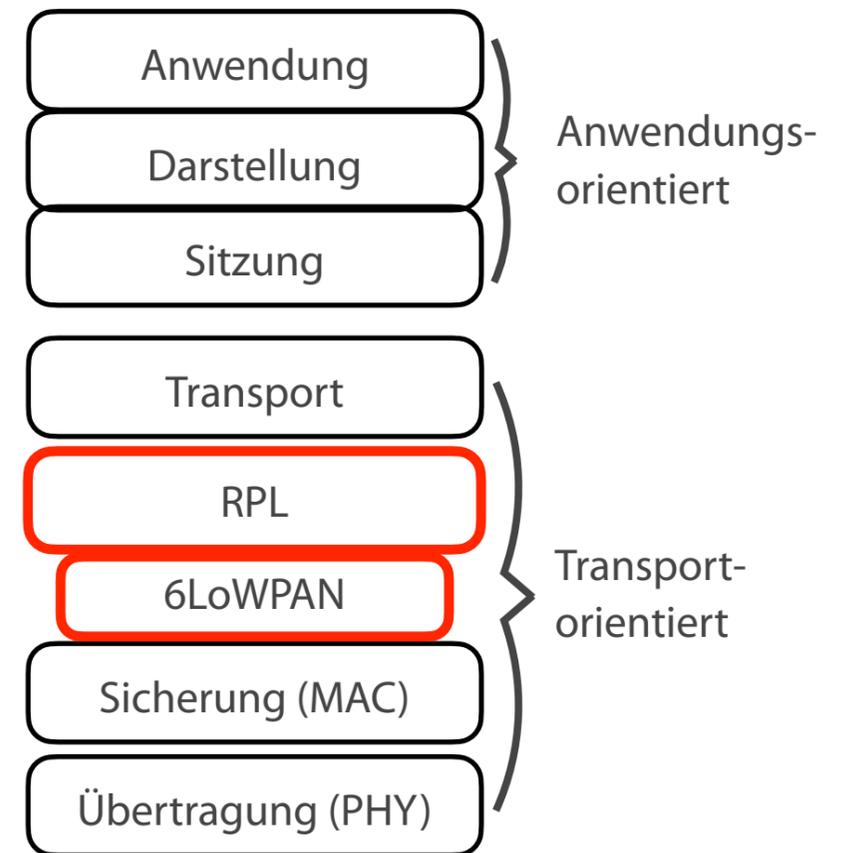
Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

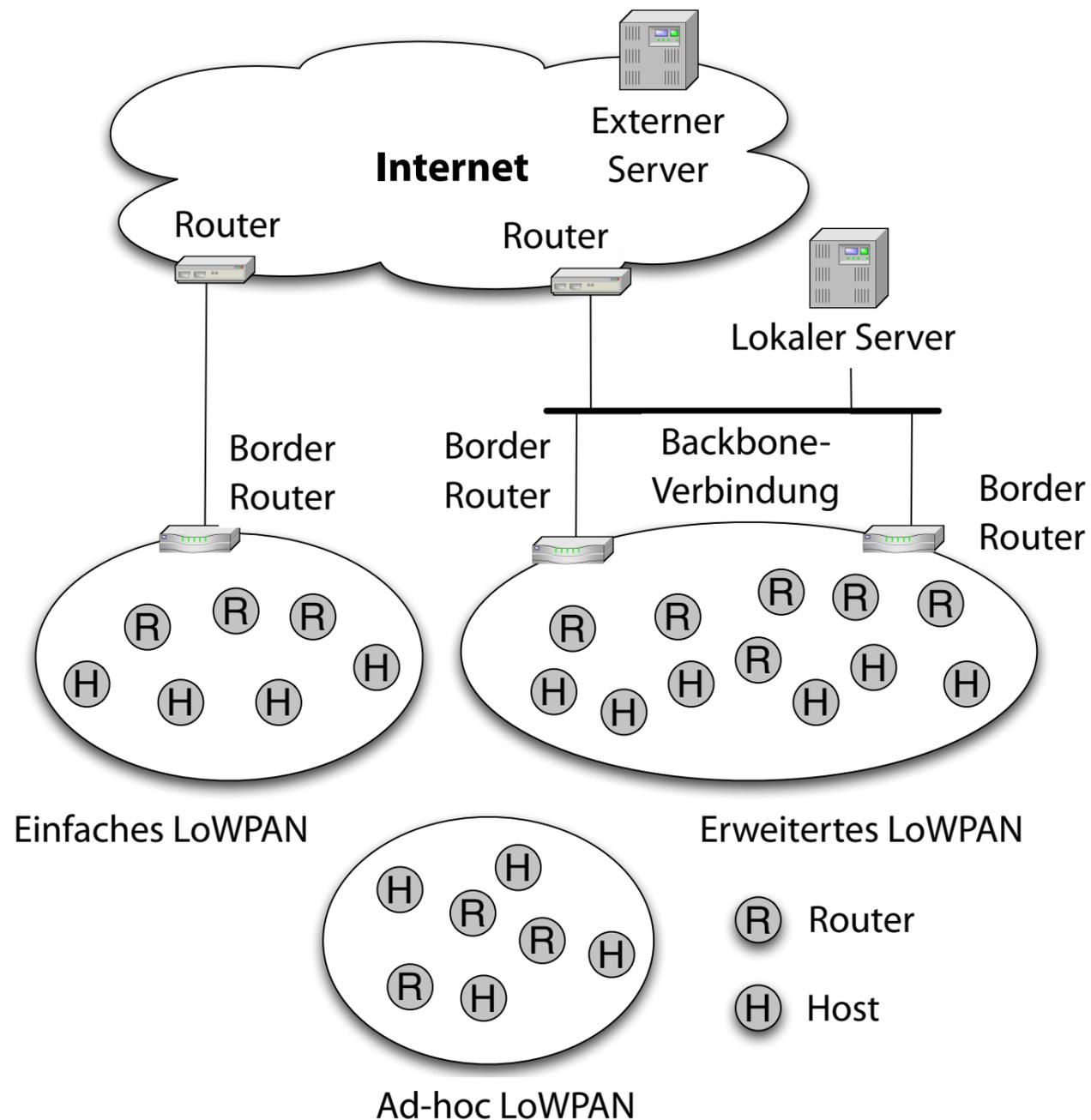
Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung



6LoWPAN

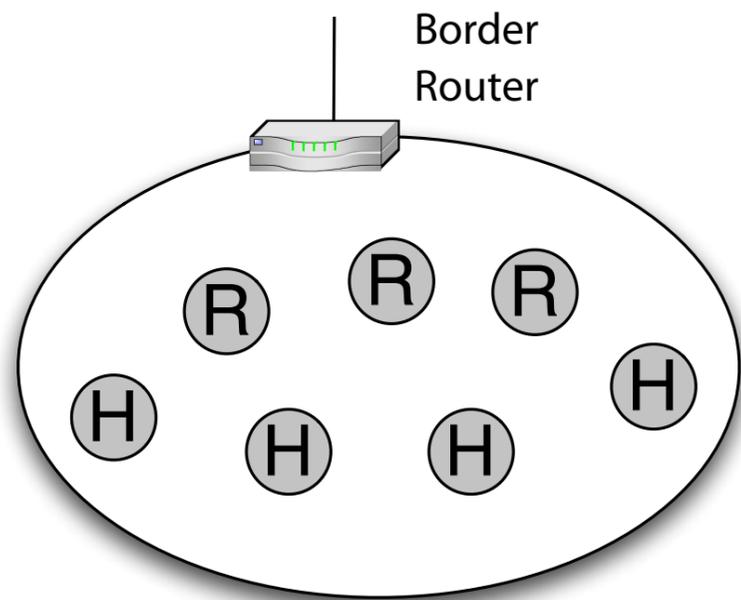


IPv6 in Low Power WPANs mithilfe des 6LoWPAN Standards

- 6LoWPAN = IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
- Adaptionsschicht, um IPv6 Pakete in 802.15.4 Netzen routen zu können
- Nicht für IPv4 spezifiziert
- Mit herkömmlichen IPv6 Netzen über Border-Router verbunden

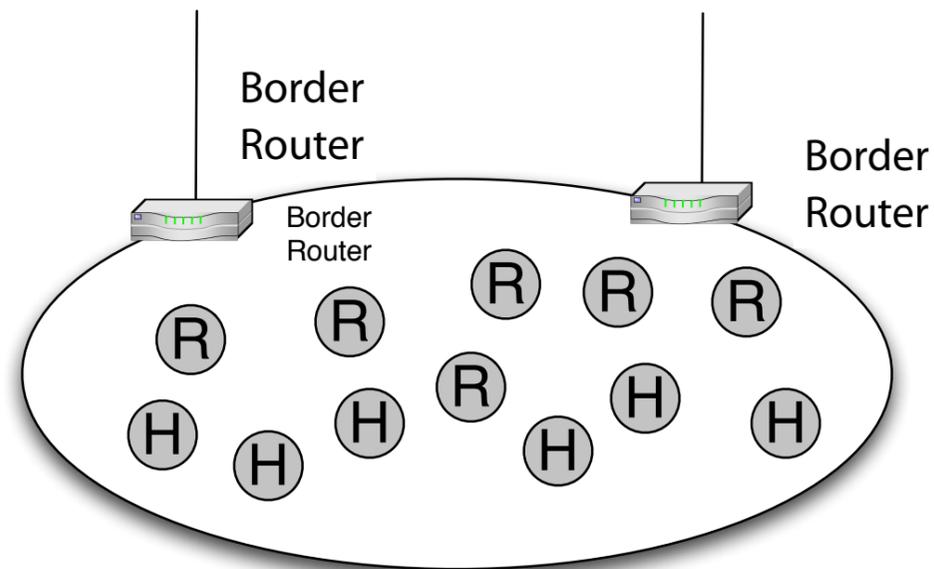
6LoWPAN ist als Kommunikationsstandard für das Internet der Dinge entwickelt worden. Es definiert einen Adaptionsschicht um IEEE 802.15.4 Netze mit herkömmlichen IPv6 Netzen zu verbinden.

Arten von 6LoWPANs



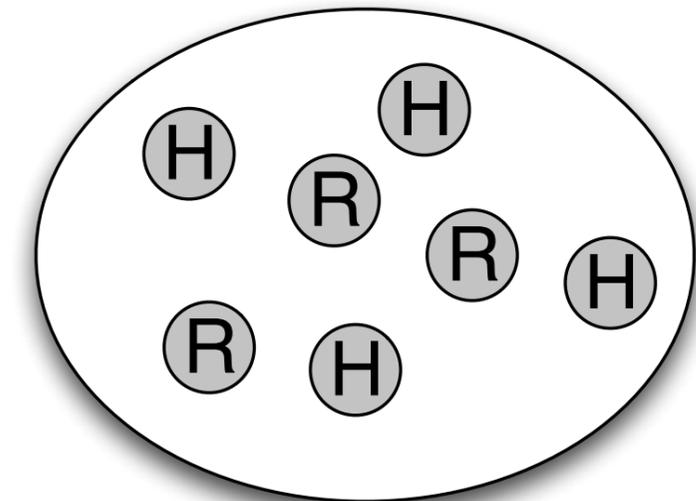
Einfaches LoWPAN

- Besteht aus Routern (R) und Hosts (H)
- Über Borderrouter mit Internet verbunden



Erweitertes LoWPAN

- Besitzt mehrere Borderrouter
- Einsatz in großflächig angelegten Sensornetzwerken



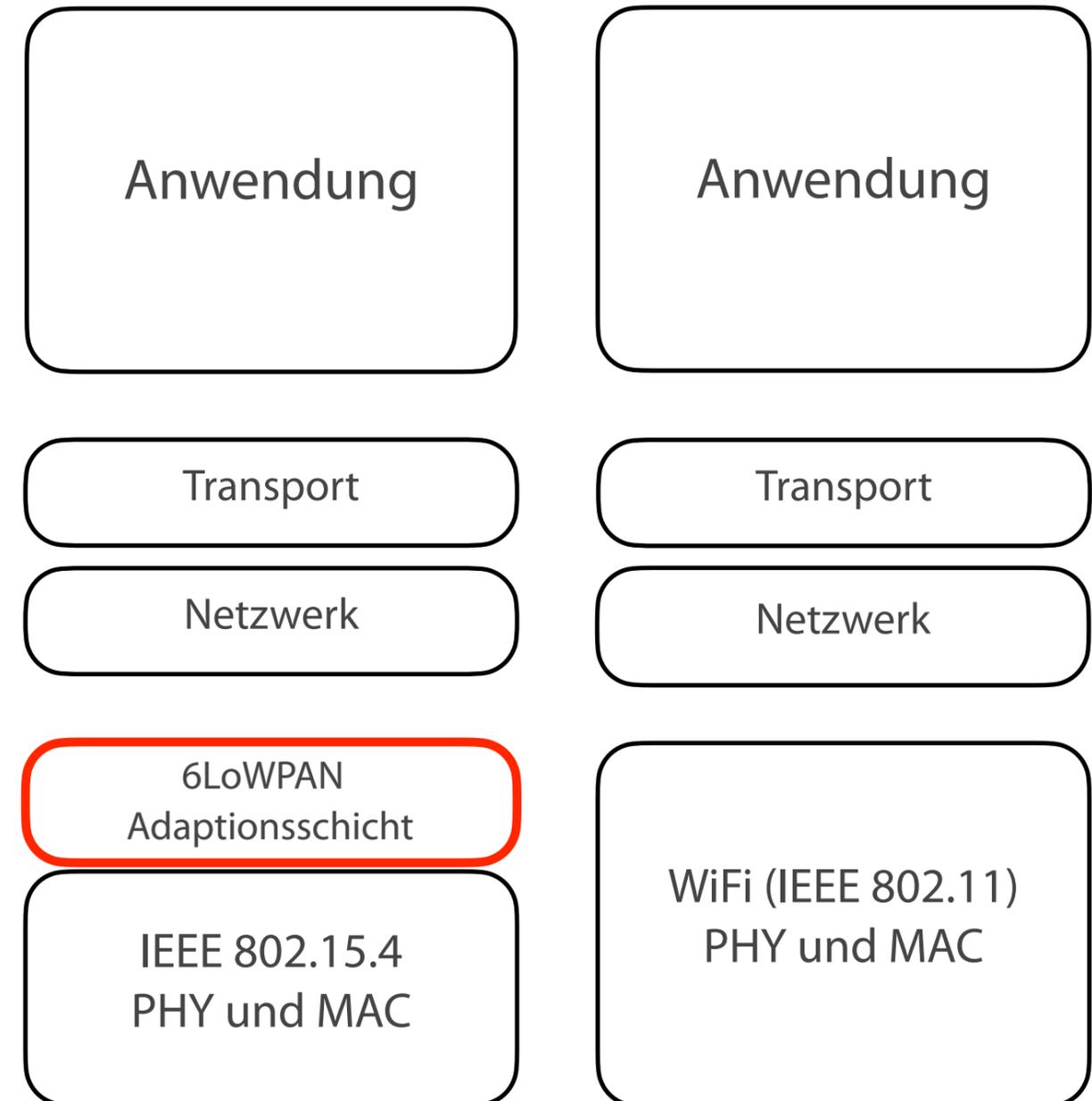
Ad-Hoc LoWPAN

- Keine Verbindung zum Internet
- Kein Borderrouter vorhanden
- Einsatz in Sensornetzwerken die Daten nur lokal verarbeiten

Aufgaben der 6LoWPAN Adaptionsschicht

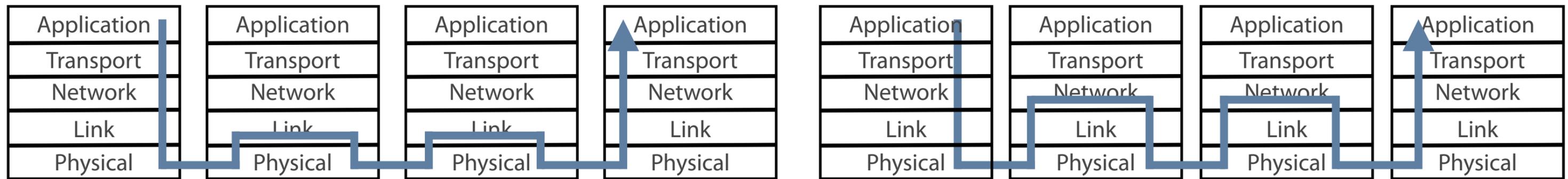
Funktionen von 6LoWPAN

- De-/Fragmentierung: IPv6 Pakete sind zu groß für 802.15.4 Netze:
 MTU \geq 1280 Byte in IPv6
 vs
 max 127 Byte Paketgröße in 802.15.4
- Komprimierung: IPv6 Header Komprimierung
- Optional: Mesh-Under Routing



Position von 6LoWPAN im Vergleich zu herkömmlichem Stack

IEEE 802.15.4: Routing in WPANs



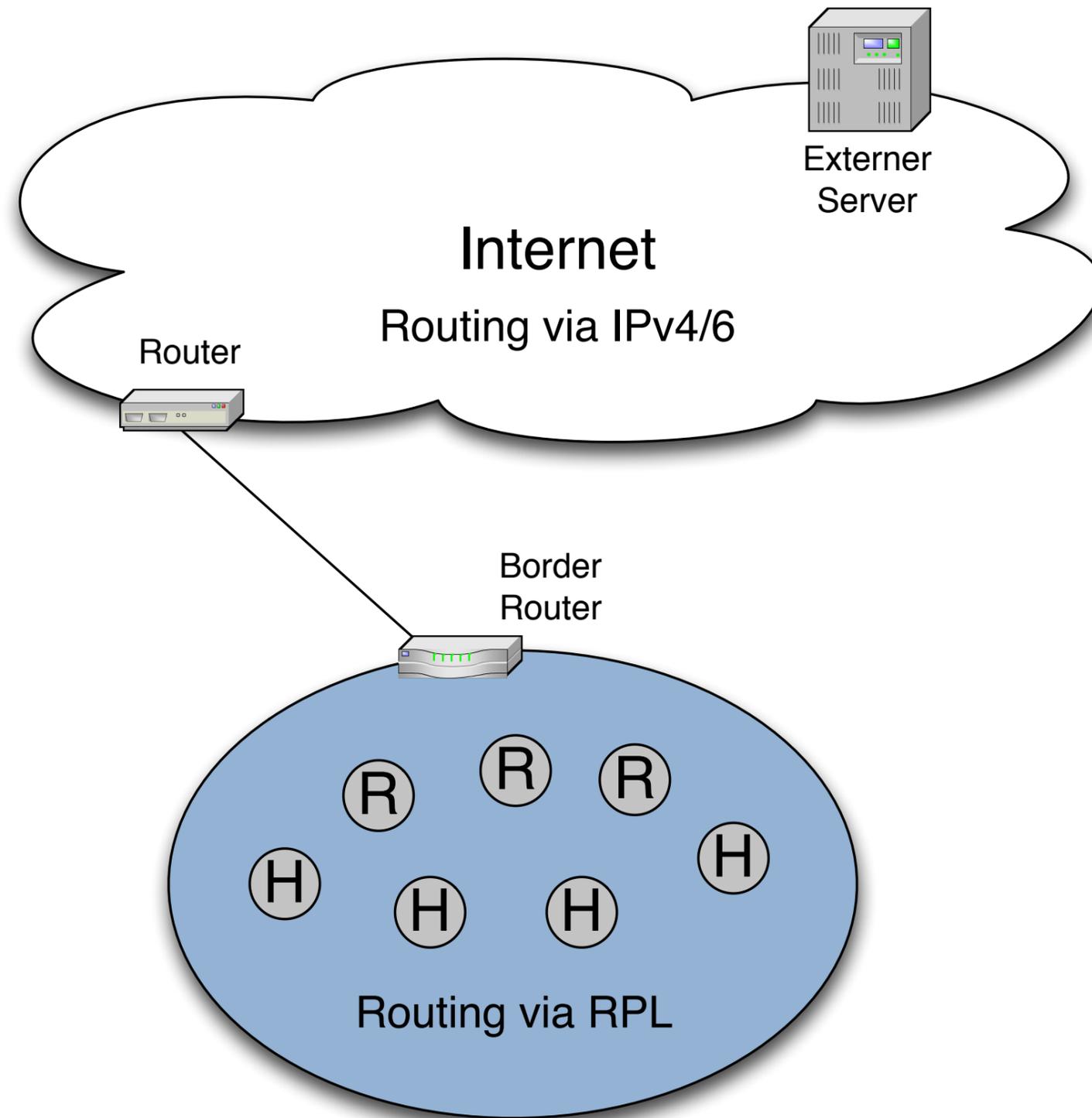
Mesh-Under Routing

- Routing auf Sicherungsschicht (MAC)
- Adressierung: 64-bit Long Address oder 16-bit Short Address
- Problem: Konsistenz von Schicht 2 u. Schicht 3

Route-Over Routing

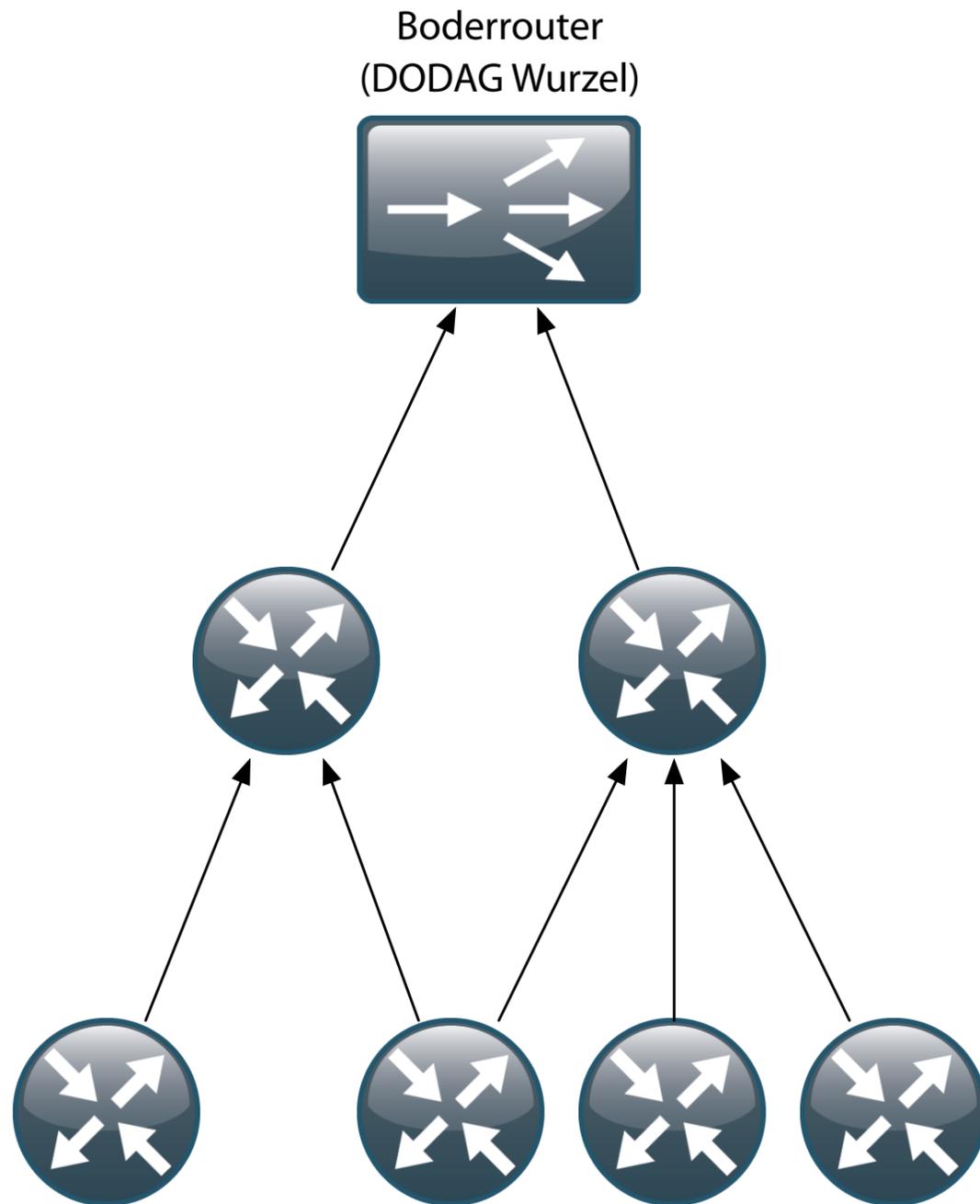
- Routing auf Netzwerkschicht
- Adressierung: IP-Adresse
- Besser für verlustreichere Umgebungen (Chowdhury et al. 2009)
- Langsamere Paket-Weiterleitung als Mesh-Under Routing

Standards für IEEE 802.15.4: 6LoWPAN und RPL



RPL: Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks

- Route-Over Protokoll für 6LoWPAN Netze
- Entwickelt von der IETF ROLL (Routing over Low-power and Lossy Networks) Arbeitsgruppe
- Fokus auf Mehrpunkt-zu-Punkt und Punkt-zu-Mehrpunkt Datenflüssen
- Baumbasiertes Protokoll



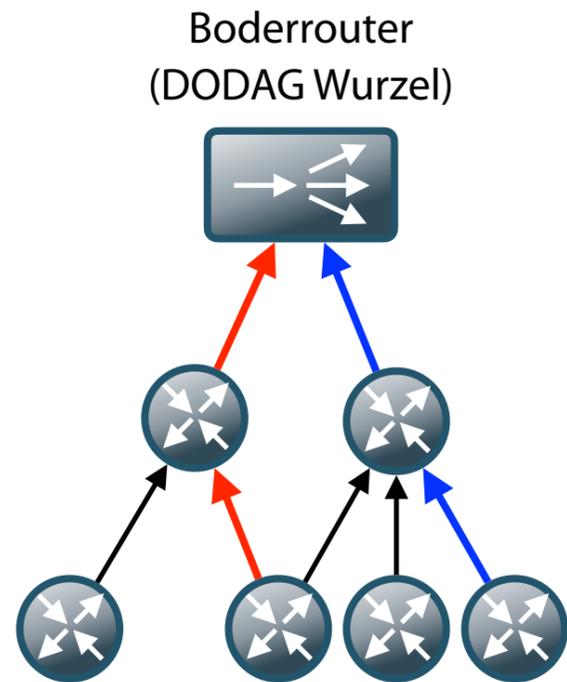
RPL verwendet DODAGs als Grundstruktur

- DODAG: Destination Oriented Directed Acyclic Graph
- Gerichtete Baumstruktur mit nur einem Wurzelknoten —> frei von Schleifen
- Wurzelknoten zumeist Borderrouter oder Datensenke
- Teilbäume haben einen oder mehrere Elternknoten
- Routing ist für Datenflüsse zur Wurzel optimiert

RPL nutzt eine Baumstruktur mit einer Wurzel als Grundlage für das Routing.

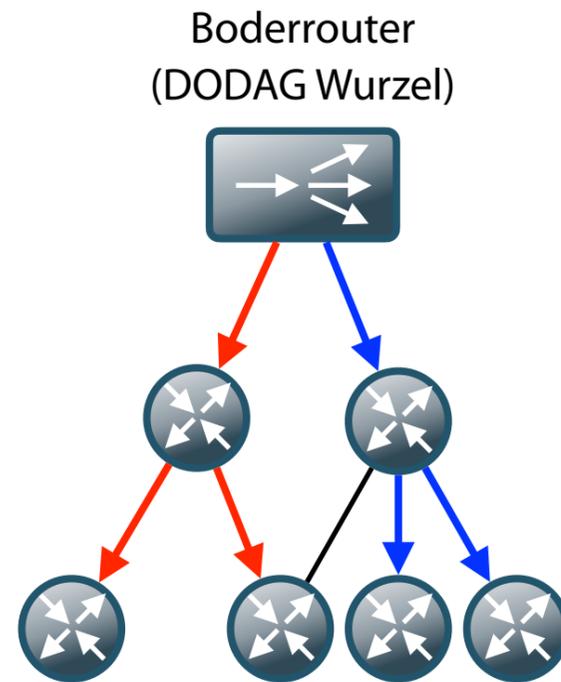
RPL

Datenflüsse



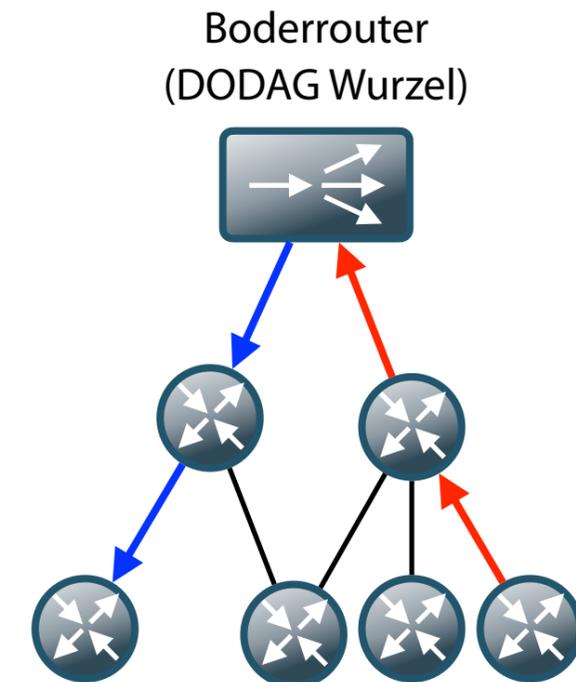
Mehrpunkt-zu-Punkt (MP2P)

- Routing optimiert für Pfade zur Wurzel
- Knoten schicken Nachrichten an Elternknoten
- Einsatz bei Aggregation von Daten



Punkt-zu-Mehrpunkt (P2MP)

- Nachrichten von Wurzel an Knoten
- Knoten müssen „Downward Routes“ unterstützen
- Zielknoten müssen vorher eigene Route bekanntmachen



Punkt-zu-Punkt

- Routing über gemeinsamen Elternknoten
- Elternknoten routet Daten zum Zielknoten —> **größerer Overhead**

RPL ist auf die Optimierung von Mehrpunkt-zu-Punkt (MP2P) und Punkt-zu-Mehrpunkt (P2MP) Verbindungen ausgelegt. Punkt-zu-Punkt (P2P) Verbindungen sind weniger effizient umgesetzt.



Einführung

Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung



Industrieallianzen im IoT/Industrial Internet Bereich

Entwicklung von Industrie-Standards

- Industrieteilnehmer schließen sich zusammen, um Standard gemeinsam zu entwickeln
- Aufbau auf offenen Standards möglich
- Produktorientierter Standard: Definieren meist mehrere Schichten des OSI-Modells
- Nutzung meist lizenzpflichtig
- Meist kaum Interoperabilität mit anderen Standards

Industrieallianzen

Beispieldomäne: Home Automation



ZigBee

- Industrie-Konsortium von über 300 Firmen (u.a. Apple, Amazon, Google)
- Baut auf IEEE 802.15.4 auf
- Überträgt auf 2.4 GHz Frequenz

ZWave

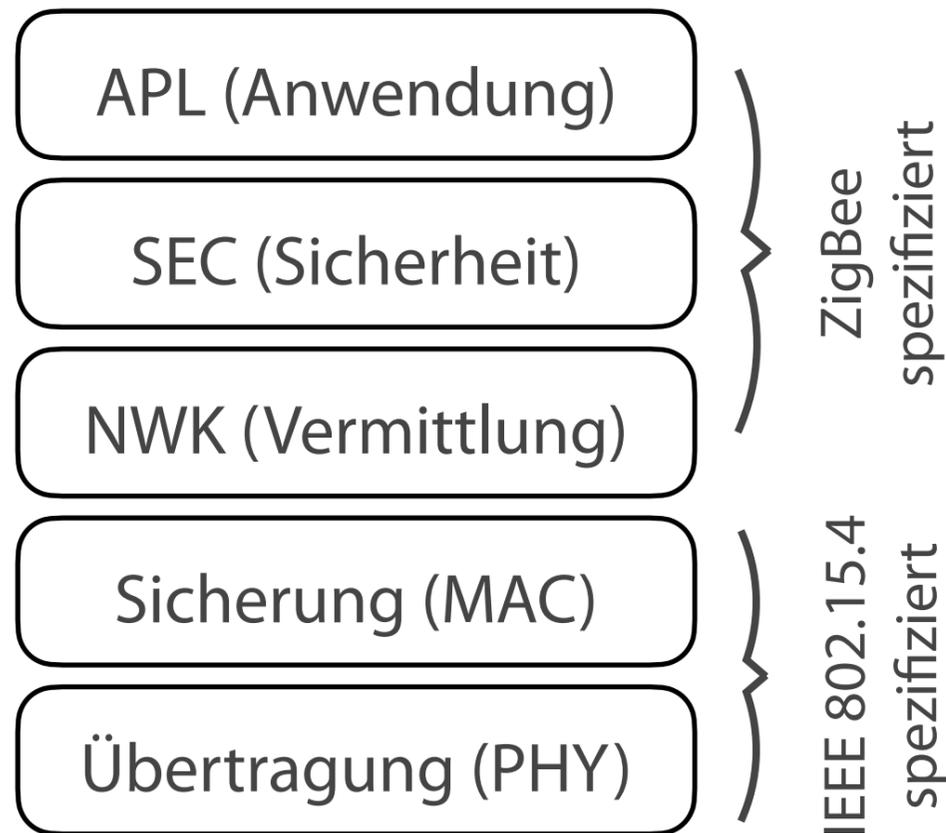
- Allianz von über 700 Firmen (u. a. Eaton, Schneider Electric, Sharp)
- Definiert kompletten OSI-Stack
- PHY und MAC als ITU-T G.9959 standardisiert
- Überträgt auf 868 MHz Frequenz

EnOcean

- Vereinigung von über 400 Firmen (u. a. Beckhoff, Eltako, Honeywell PEHA)
- Fokussiert auf batterieless Schalter und Sensoren
- Spezifiziert Schicht 1-3 des OSI-Modells als ISO 14543-3-10

Es existiert eine Vielzahl an konkurrierenden Standards, die durch verschiedene Industriekonsortien vorangetrieben werden.

Beispiel: ZigBee Architektur



ZigBee baut auf IEEE 802.15.4 auf

- Grundlage: 802.15.4
- ZigBee Protokoll definiert Netzwerk (NWK), Sicherheit (SEC) und Anwendungsschicht (APL)
- ZigBee IP nutzt RPL für Routing
- ZigBee Spezifikation frei verfügbar, **kommerzielle Nutzung jedoch kostenpflichtig**

Protokolle von Industrieanstalten setzen zum Teil freie Standards ein, spezifizieren aber oft einen großen Teil des Stacks selber.



Einführung

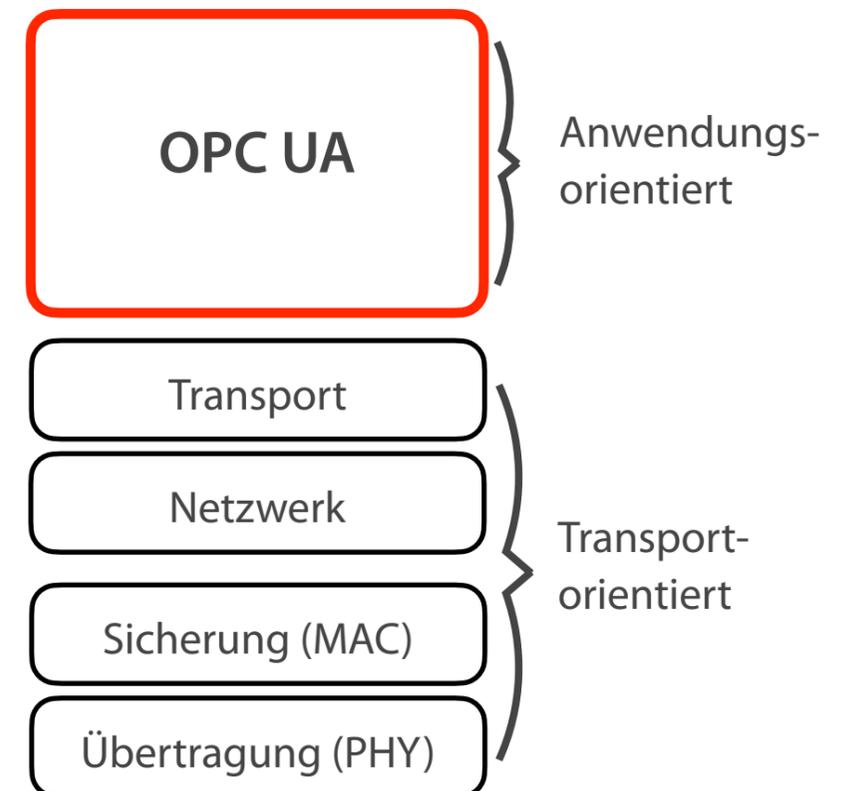
Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung



Open Platform Communication - United Architecture (OPC-UA)

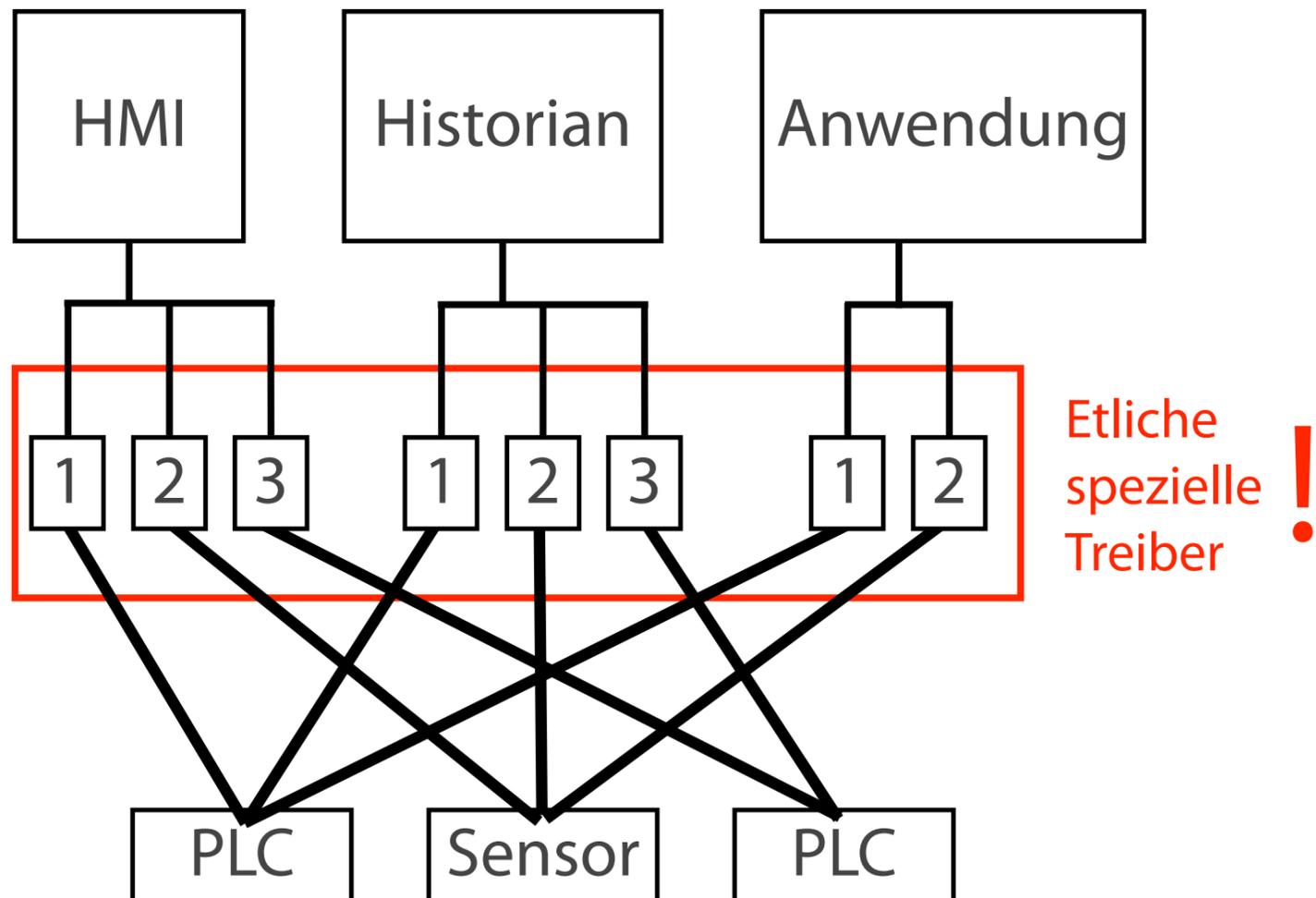


OPC Unified Architecture

- OPC Foundation: Industriekonsortium aus über 450 Firmen
- Ziel: Industrieller Standard für M2M Kommunikation
- Standardisierung als IEC 62541
- Mitglieder: ABB, Beckhoff, Bosch, Continental AG (<https://opcfoundation.org/members>)

OPC UA ist ein M2M Kommunikationsstandard, der in Deutschland als zentraler Standard für Umsetzung von Industrie 4.0 vorgesehen ist.

Das Problem

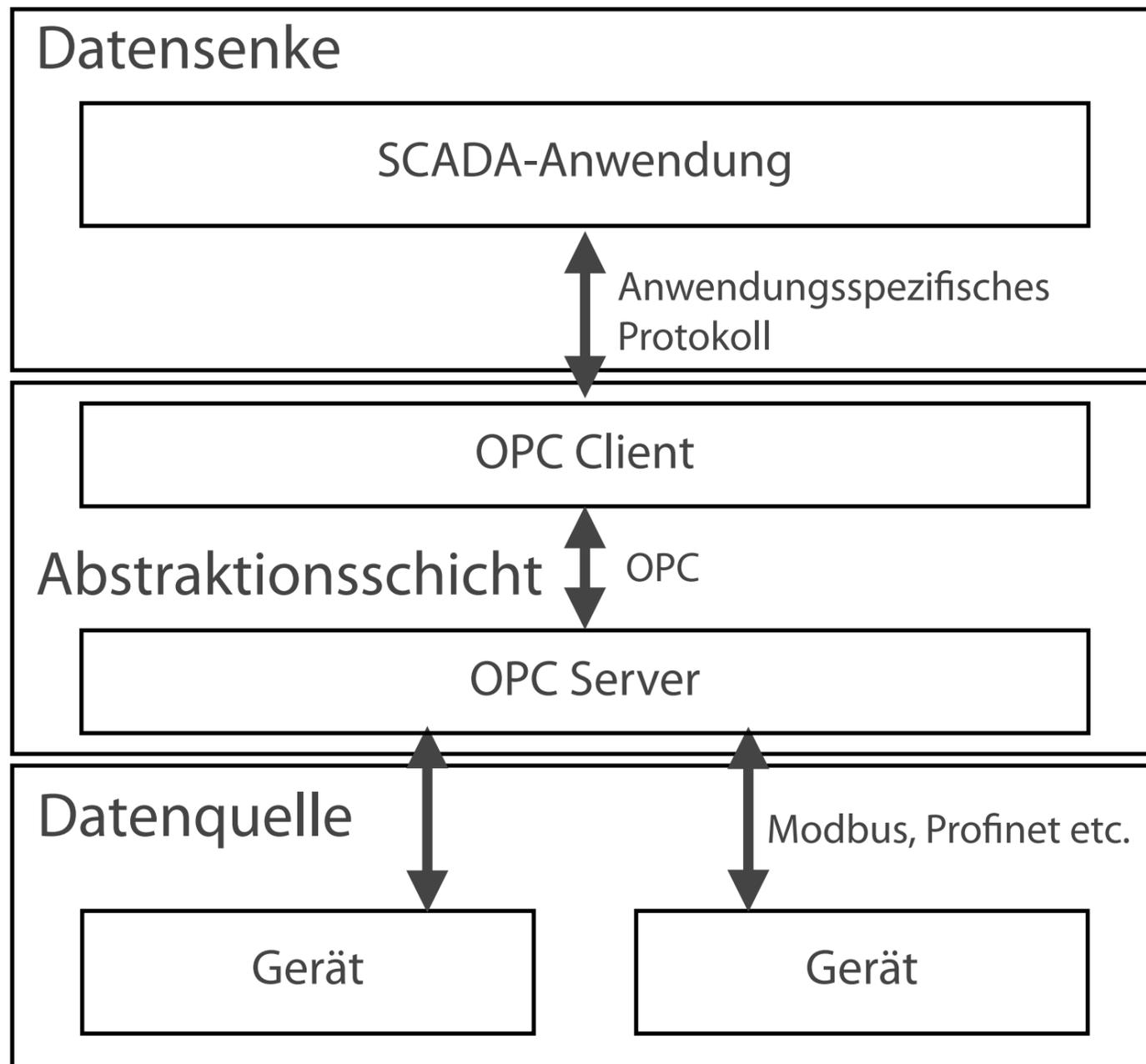


Fehlende Standardisierung für Prozessdatenaustausch

- Keine einheitliche Kommunikation
- Jede Gerät-Anwendung-Paarung benötigt eigenen Treiber
- OPC UA: Vereinheitlichung der Kommunikation
- Definiert, **wie Daten übertragen werden**, nicht aber was

Ziel von OPC UA ist es, eine einheitliche, herstellerunabhängige M2M-Kommunikationsarchitektur zur Verfügung zu stellen.

Open Platform Communication Unified Architecture (OPC-UA)



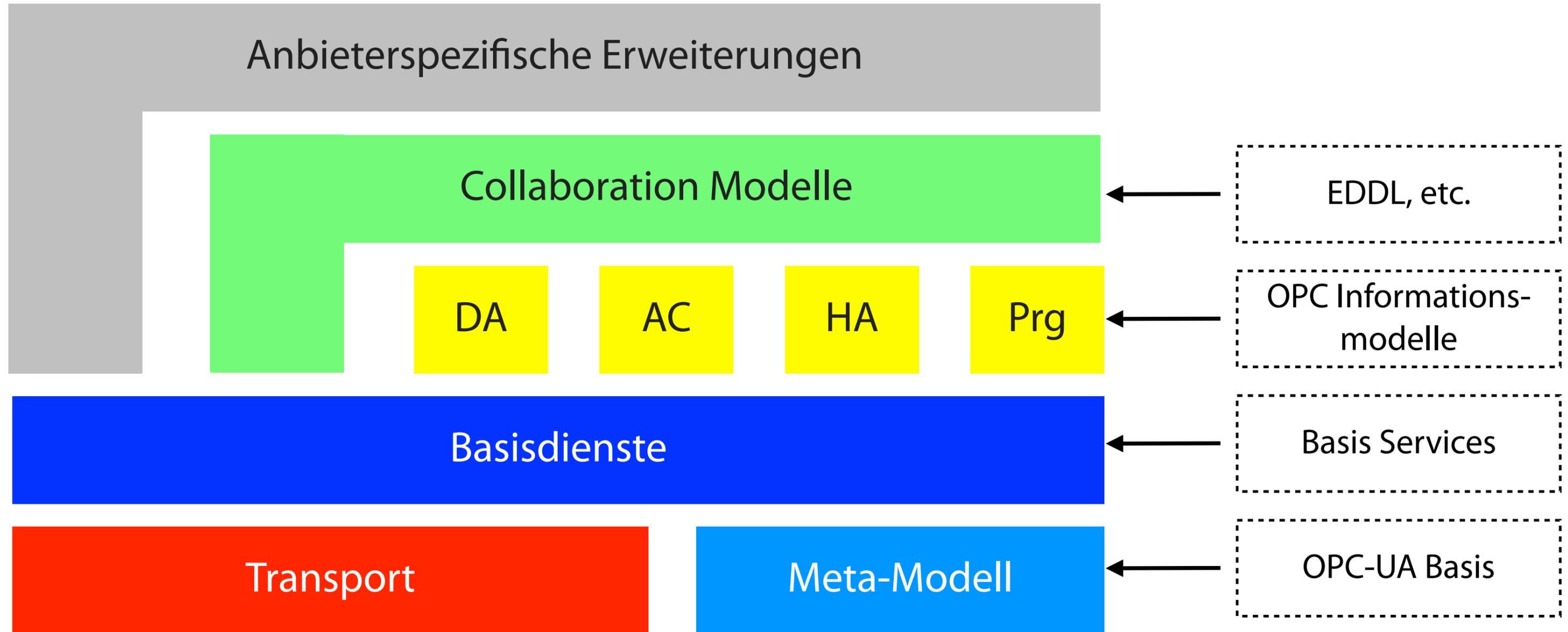
OPC UA ist eine Abstraktionsarchitektur

- Vermittelt zwischen Datenquellen und Datensenken
- Geräte (PLCs, Sensoren) senden Daten an OPC Server
- OPC Server: Verarbeitung und Weiterleitung
- OPC Client: stellt Daten Anwendungen zur Verfügung

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition

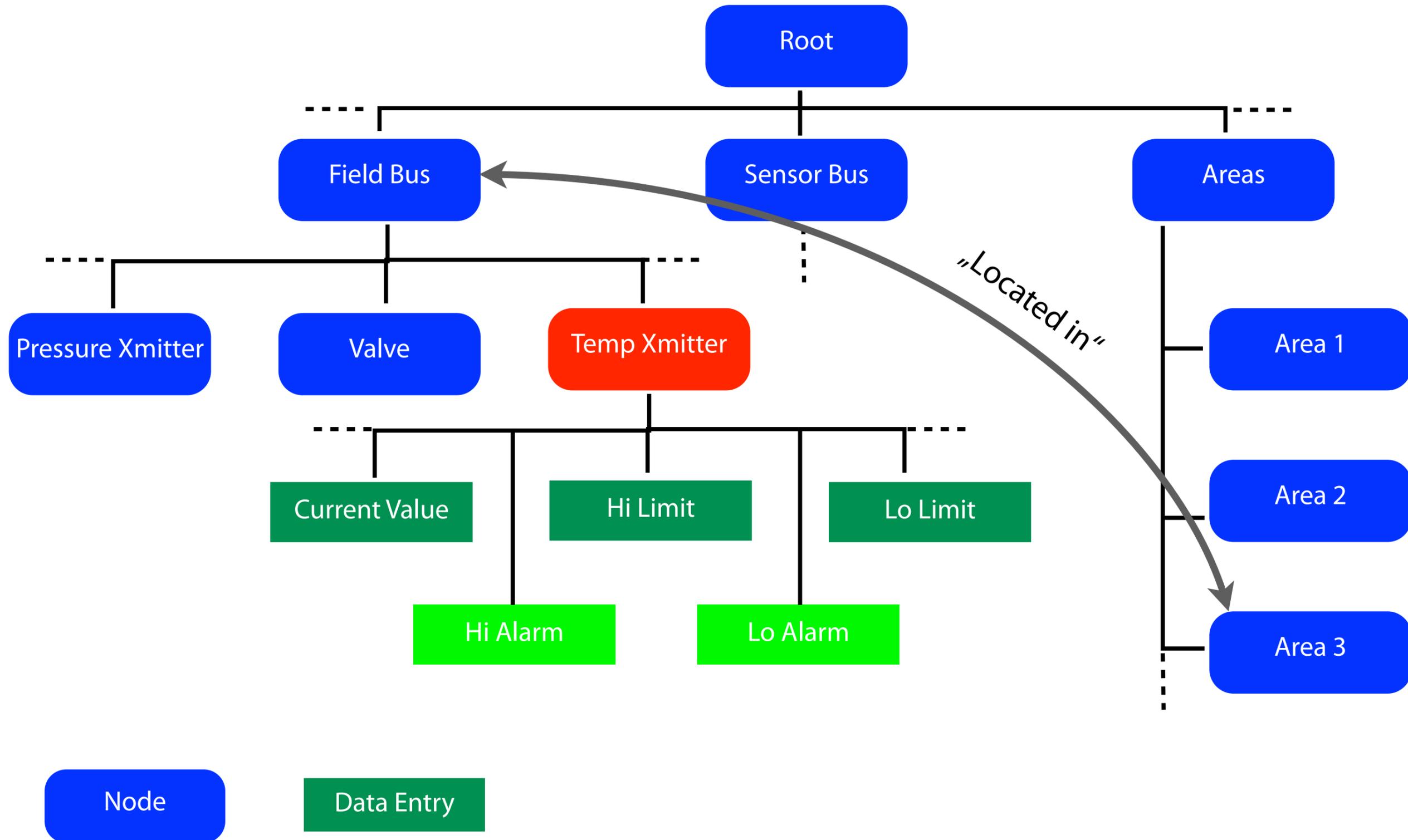
OPC UA ist Service-orientiert und betriebssystemunabhängig.

OPC UA Architektur

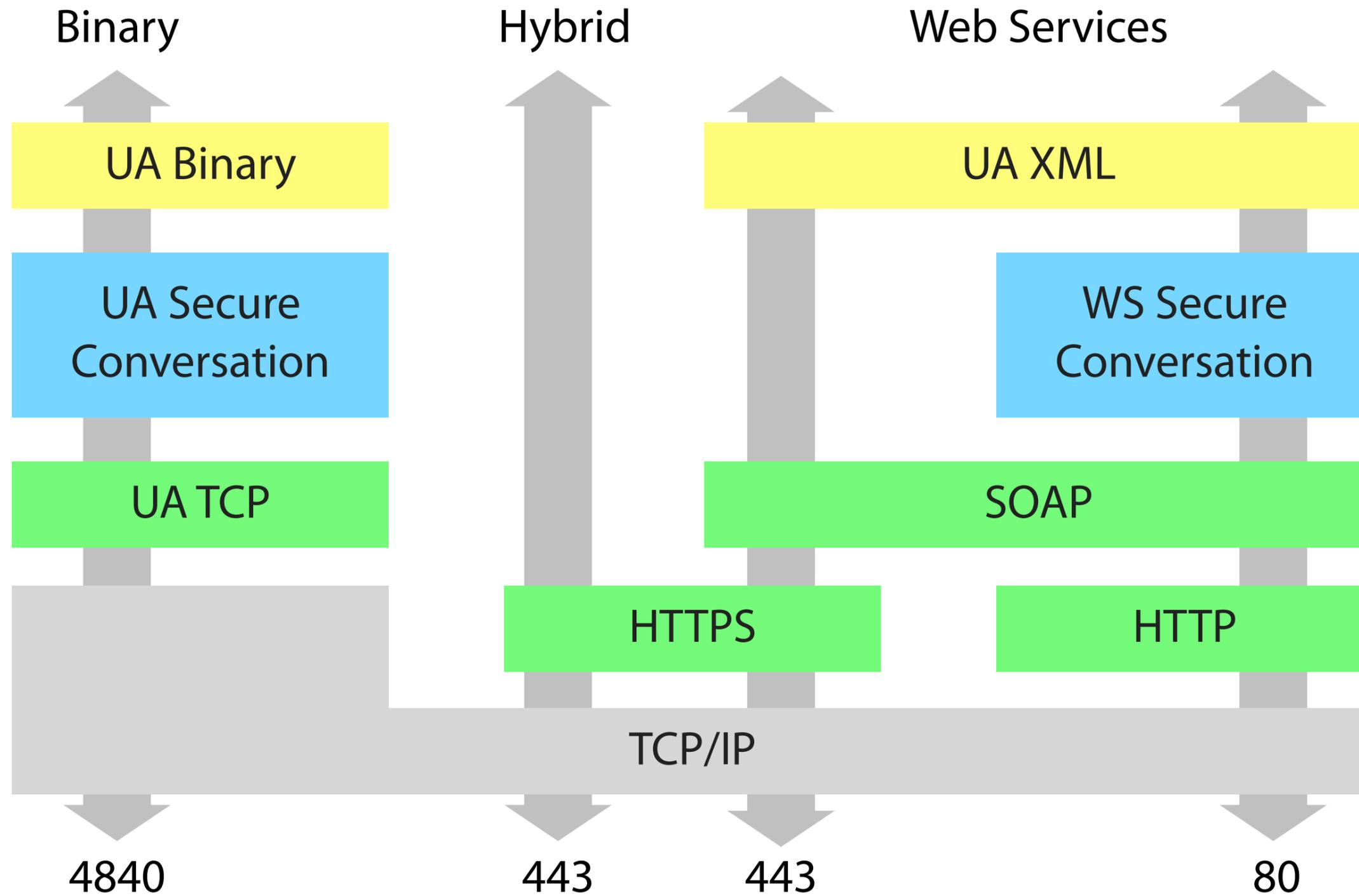


Ziel von OPC UA ist es, eine einheitliche, herstellerunabhängige M2M-Kommunikationsarchitektur zur Verfügung zu stellen.

Einheitlicher Adressraum für Daten und Typen (Metadaten)

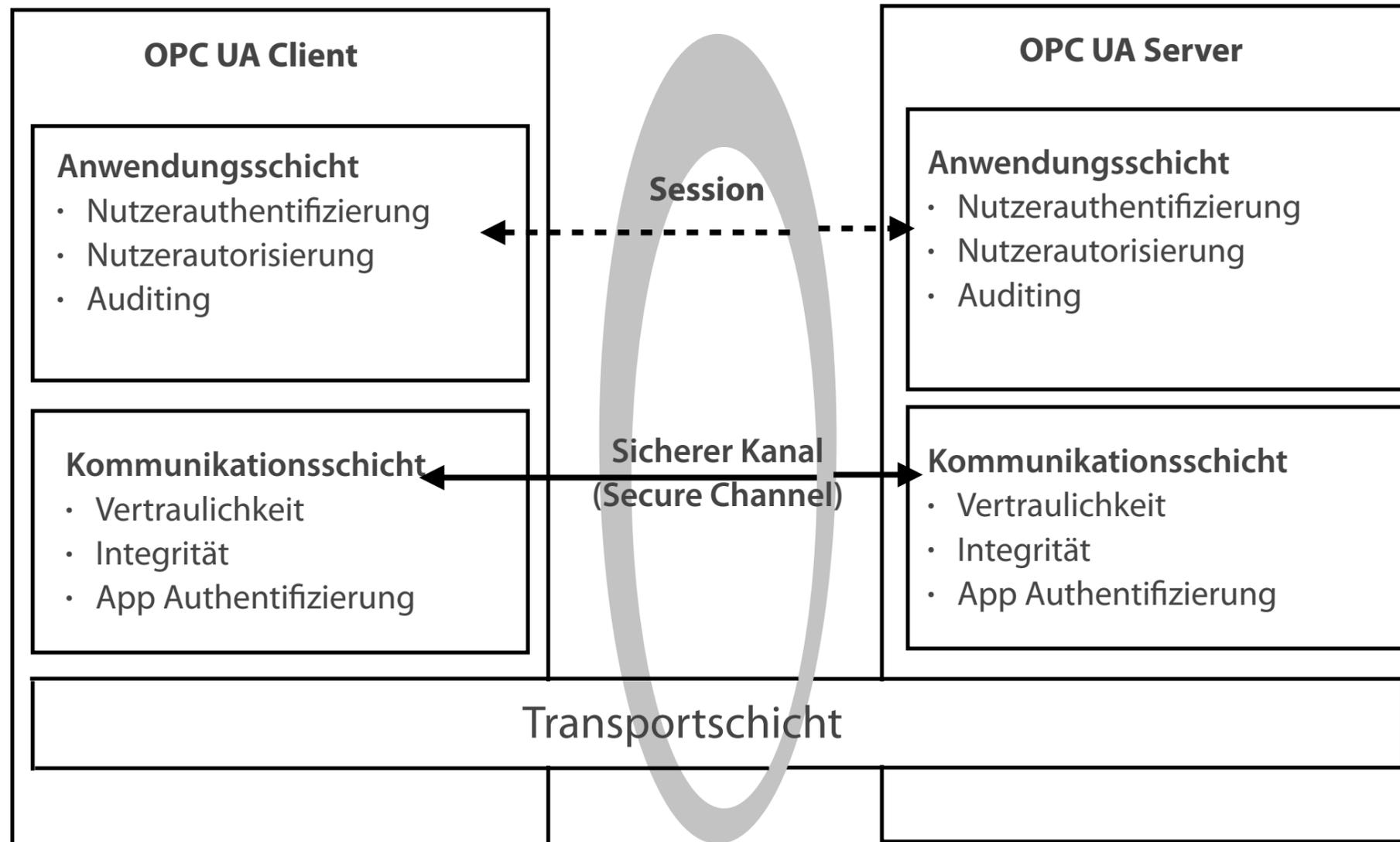


OPC-UA Transportprofile



OPC UA

Sicherheitskonzept



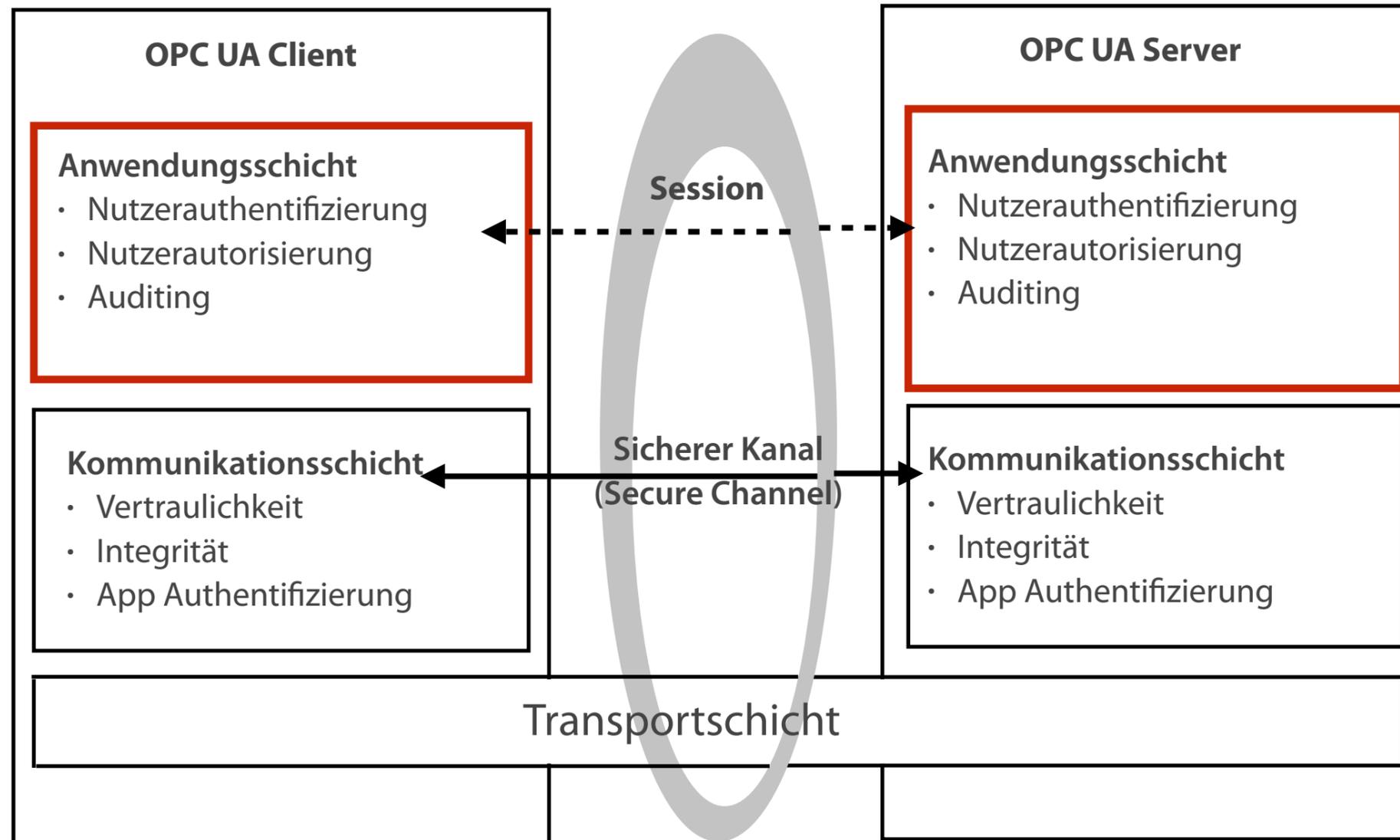
OPC UA Sicherheitskonzept

- Mehrschichtiges Sicherheitskonzept
- Unterteilung zwischen Anwendungs- und Kommunikationsschicht
- 2016 Prüfung durch Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
—> **keine systematischen Fehler gefunden**

In OPC UA wird Sicherheit als integraler Bestandteil des Standards behandelt.

OPC UA

Sicherheit auf der Anwendungsschicht



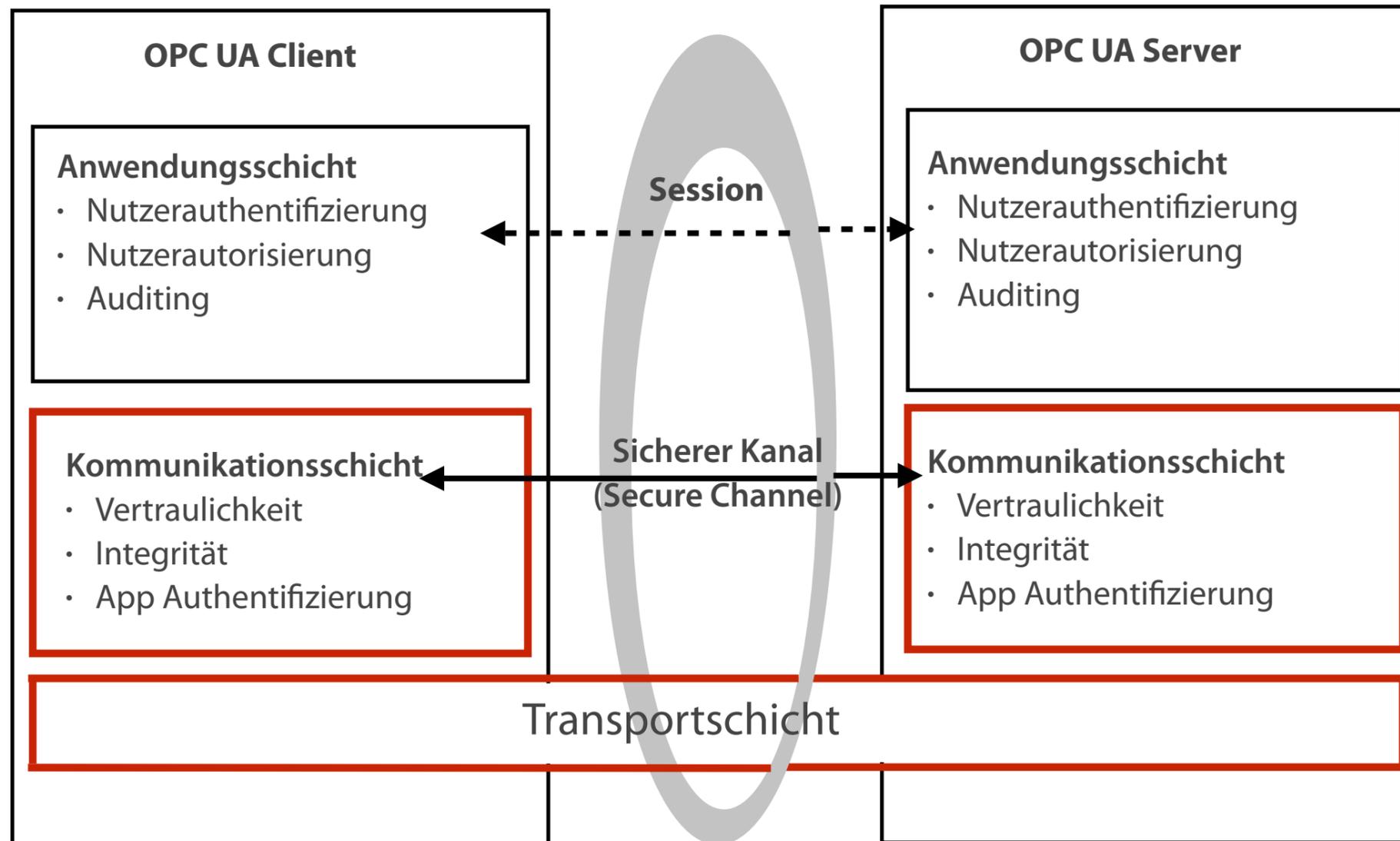
Sicherheitskonzept auf Anwendungsschicht

- Kommunikation findet in **Sessions** statt
- Sessions kommunizieren über **sichere Kanäle**
- Kommunikationsschicht stellt sicheren Kanal
- Aufgaben: Authentifizierung und Autorisierung von Nutzern, Auditing

Die Sicherheit der Anwendungsschicht baut auf die Sicherheit der Kommunikationsschicht auf. Auf der Anwendungsschicht wird der korrekte Nutzerzugriff sichergestellt.

OPC UA

Sicherheit auf der Kommunikationsschicht



Kommunikation erfolgt über sicherer Kanäle

- Transport über TCP-ähnliches Verfahren (UA TCP) oder HTTPS
- Kommunikation über SSL/TLS ähnliche Verfahren (UA Secure Conversation)
- Nutzung von Zertifikaten und Public-Key-Infrastruktur
- Infrastruktur für Schlüssel und Zertifikate vorausgesetzt

Zur Sicherung auf der Kommunikation- und Transportschicht werden bewährte Verfahren wiederverwendet. Der sichere Kanal ist die Grundlage für den sicheren Austausch von Daten der Anwendungsschicht.



Einführung

Übertragungsstandard für IoT: IEEE 802.15.4

Routing in WSNs: 6LoWPAN, RPL

Intermezzo: Industrieallianzen

Maschine-zu-Maschine Kommunikation: OPC UA

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Protokolle und Standards

IEEE 802.15.4

- Spezifikation unterste 2 Schichten des OSI-Modells
- Konzipiert für Low Power and Lossy Networks
- Einsatzbereich: Wireless Sensor Networks

6LoWPAN/RPL

- Routingprotokolle und Standards um IPv6 in WPANs zu nutzen
- 6LoWPAN: Adaptionsschicht zwischen 802.15.4 WPANs und IPv6-Netzen
- 6LoWPAN: Benötigen Border-Router um Pakete zwischen Internet und 802.15.4 WPANs zu routen
- RPL: Routingprotokoll für LLNs
- RPL: Optimiert für Mehrpunkt-zu-Punkt und Punkt-zu-Mehrpunkt Datenflüsse

OPC UA

- Kommunikationsarchitektur für Industrial Internet
- Abstraktionsschicht zwischen Endgeräten (PLCs, Sensoren) und Anwendungen (HMIs usw.)
- Vereinfacht Kommunikation zwischen Geräten u. Anwendungen
- Sicherheit integraler Bestandteil

Zusammenfassung

Protokolle und Standards

Dies war nur ein Ausschnitt!

- Vielzahl an IoT/Industrial Internet Protokollen und Standards
- Nutzung unterschiedlicher Protokolle in unterschiedlichen Domänen
- IoT/Industrial Internet noch relativ neu: viele konkurrierende Standards

Dies war nur ein kleiner Einblick. Im Bereich IoT/Industrial Internet gibt es eine Vielzahl von Protokollen deren Verwendung von Domäne, verfügbaren Ressourcen, Netzwerkart und mehr abhängt.

Quellen

Literatur:

Adams, J. T. (2006, März). An introduction to IEEE STD 802.15. 4. In Aerospace Conference, 2006 IEEE (pp. 8-pp). IEEE.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2016). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2016, April). Sicherheitsanalyse OPC UA.

Calveras Augé, A. M., & Ludovici, A. (2010). Implementation and evaluation of multi-hop routing in 6LoWPAN. In IX Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2010) (pp. 1-6). Universidad de Valladolid.

Chowdhury, A. H., Ikram, M., Cha, H. S., Redwan, H., Shams, S. M., Kim, K. H., & Yoo, S. W. (2009, Juni). Route-over vs Mesh-under Routing in 6LoWPAN. In Proceedings of the 2009 international conference on wireless communications and mobile computing: Connecting the world wirelessly (pp. 1208-1212). ACM.

Culler, D. (2011). The Internet of Every Thing - steps towards sustainability. CWSN.

Deering, S., & Hinden, R. (1998). RFC 2460: Internet Protocol.

EnOcean Alliance. (2017). <https://www.enocean-alliance.org/en/home>

Erdelj, M., Mitton, N., & Natalizio, E. (2013). Applications of industrial wireless sensor networks. *Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards*, 1-22.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.

IEEE Standards Association (2015), IEEE 802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks.

MatrikonOPC (2009). OPC – was ist das eigentlich? "Das OPC-Handbuch für Jedermann".

OPC Foundation. (2015). OPC UA Spezifizierung.

Shelby, Z., & Bormann, C. (2011). 6LoWPAN: The wireless embedded Internet (Vol. 43). John Wiley & Sons.

Tanenbaum Tanenbaum, A. S. , Wetherall, D. J. (2012). *Computer Networks*. Seattle, Prentice Hall, USA, 6th ed edition.

Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., ... & Alexander, R. (2012). RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. RFC 6550.

Zimmermann, H. (1980). OSI reference model--The ISO model of architecture for open systems interconnection. *IEEE Transactions on communications*, 28(4), 425-432.

ZigBee Alliance. (2017). <http://www.zigbee.org/>

Z-Wave Alliance. (2017). <http://z-wavealliance.org/>

Abbildungen:

EnergieAgentur.NRW (2014). Station der Zukunftsenergientour. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20_Station_der_Zukunftsenergientour-Energieeffizienz-Projekte_SmartHome_in_Paderborn_\(12100915513\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20_Station_der_Zukunftsenergientour-Energieeffizienz-Projekte_SmartHome_in_Paderborn_(12100915513).jpg)

Flickr-Nutzer „amerune“ (2013). Trans-Alaska oil pipeline, near Fairbanks. <https://www.flickr.com/photos/amerune/9294639633>

Ito, J. (2008). Strawberry Greenhouse. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strawberry_greenhouse.jpg

Viinamäki, S. (2016). Drahtlose Lichtschalter. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/Wireless_remote_switch.jpg