

**Seminar**  
**Next Generation Networks**

**IP-Pakete über IEEE**  
**802.15.4-Netzwerke**

Student:  
Biesinger Christoph  
1350722  
Masterstudiengang Informatik

Betreuer:  
M.Sc. Dario Fanucchi

**Kurzfassung**

IP-Pakete über IEEE 802.15.4-Netzwerke beschreibt eine Netzwerktechnologie für das Internet Protocol Version 6 IPv6, IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks 6LoWPAN. 6LoWPAN bildet eine Adaptationsschicht zwischen dem Data Link und Network Layer, welche als notwendige Grundlage dient um die Low-Rate Wireless Personal Area Networks LR-WPANs des Internet der Dinge IoT mit den bereits bestehenden Netzwerken über IPv6 zu verbinden. Daher werden verschiedene Mechanismen, wie Headerkompression und mehrere Verfahren für Routing ausgebildet, womit ein Kommunikationsprotokoll und Standard um den kommenden Entwicklungen des Internet der Dinge genügend zu leisten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Motivation . . . . .	4
1.2	IEEE 802.15.4-Netzwerke - Low-Rate Wireless Personal Area Networks . .	4
<b>2</b>	<b>6LoWPAN: IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network</b>	<b>6</b>
2.1	Ursprüngliche Zielsetzungen . . . . .	6
2.2	Charakterisierung von 6LoWPAN . . . . .	6
2.2.1	Maximum Transmission Unit MTU . . . . .	7
2.3	6LoWPAN Header . . . . .	8
2.3.1	Dispatch Header . . . . .	8
2.3.2	Mesh Header . . . . .	9
2.3.3	Fragmentation and Assembly Header . . . . .	9
2.3.4	Kommunikationsszenarien . . . . .	10
2.4	IPv6 Header Compression . . . . .	11
<b>3</b>	<b>6LoWPAN Routing</b>	<b>13</b>
3.1	Route Over vs. Mesh Under . . . . .	13
3.2	RPL Ripple: Routing Protocol for Low power and Lossy Networks . . . .	14
<b>4</b>	<b>ZigBee und 6LoWPAN</b>	<b>15</b>
4.1	ZigBeeIP . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>16</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Mesh Network [1] . . . . .	5
2	Vergleich OSI-Referenzmodell, Wi-Fi Stack und 6LoWPAN-Stack [11] . .	8
3	Dispatch Header [10] . . . . .	8
4	Mesh Header [10] . . . . .	9
5	Fragmentation Header [10] . . . . .	10
6	Verschiedene Kommunikationsszenarien [11] . . . . .	10
7	ZigBee Protocol Stack basierend auf IEEE 802.15.4 [2] . . . . .	15
8	ZigBeeIP Protocol Stack basierend auf IEEE 802.15.4 [4] . . . . .	17

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Aktuell entwickelt sich ein neuer Trend im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien, unter dem Begriff des “Internet of Things” kurz IoT, indem sukzessiv Alltagsgegenstände mithilfe von Mikrocontrollern zu “intelligente Gegenstände” transformiert werden, womit die Grenze zwischen realer und virtueller Welt zunehmend verwischen soll. Das IoT ist in seiner Idee ein allumfassendes Kommunikationssystem, bei dem die Netzwerkknoten nicht mehr durch die Verwendung von Benutzern charakterisiert werden, sondern durch autonom agierende “Dinge”. Der technische Hintergrund ist, dass eine Vielzahl von eingebetteten Systemen, mit begrenzten Ressourcen und Kapazitäten an Rechnerleistung und Stromverbrauch, Informationen sammeln und erzeugen. Diese sollen darüberhinaus miteinander verbunden sein und ein globales Netzwerk erzeugen, sprich das “Internet der Dinge”. Diese Eingebetten Systeme sollen dabei in sehr großer Anzahl über alle Bereiche des Lebens und an alle Orte verteilt werden und die Anzahl der bestehenden Benutzersysteme wie Computer, Smartphones oder Tablets um mehrere Größenordnungen übersteigen.

Dieser Trend soll dabei nicht nur in das alltägliche Privatleben eindringen, sondern auch im Rahmen der Initiative “Industrie 4.0” das Wirtschaftsleben mit intelligenten Fabriken revolutionieren, indem diese dynamisch auf Veränderungen reagieren. Deshalb wird eine Netzwerktechnologie nötig, die sowohl die Anforderungen der Hardware mit der bereits vorhandenen Netzwerkstruktur verbindet, weshalb die Internet Engineering Task Force IETF den 6LoWPAN Standard geschaffen hat.

## 1.2 IEEE 802.15.4-Netzwerke - Low-Rate Wireless Personal Area Networks

Das technische Grundgerüst des IoT bilden die verwendeten Rechnernetzwerke, zur Erstellung dieser Netzwerke werden verschiedene Technologien verwendet. Dafür wurden viele verschiedene Technologien entwickelt, wie beispielsweise Radio-Frequency Identification RFID, Wireless Sensor Networks WSN oder Bluetooth, wobei wir uns in dieser Arbeit auf den IEEE 802.15.4 Standard beschränken, welches Low-Rate Wireless Personal Area Networks LR-WPANs beschreibt. LR-WPANs müssen dabei bestimmte Anforderungen erfüllen, da sie abhängig von den Beschränkungen der verwendeten Cyber-Physikalischen Systeme sind, welche als Hardwaregrundlage fungieren. Diese LR-WPAN-Eigenschaften sind dabei, ...

- eine einfache Architektur für drahtlose Kommunikationsnetzwerke
- begrenzte Kapazität an Stromverbrauch (batteriebetrieben), Datendurchsatz (bis 250 kb/s) und Reichweite (weniger als 100 Meter)
- kleine Paketgröße (127 Bytes) auf dem IEEE 802.15.4 Frame

- Unterhalt einer hohen Anzahl an unzuverlässigen Geräten durch Veränderung der physikalischen Gegebenheiten
- Unterstützung verschiedener Topologiearten: Mesh, Stern und Peer-to-Peer

Der IEEE 802.15.4 Standard spezifiziert dabei den Physical Layer (PHY) und den Media Access Control Layer (MAC) des OSI-Referenzmodells für LR-WPANs. Die PHY-Schicht stellt dabei die Übertragung von PHY protocol data units PPDU's über die verwendeten drahtlosen physikalischen Medium sicher, wobei zwei Arten von Gerätetypen unterschieden werden können. Den Reduced Function Devices RFD, den typischen batteriebetriebenen Geräten innerhalb des IoT, und den Full Function Devices FFD, leistungsfähiger Hardware mit Stromanschluss. Letztere können Nachrichten innerhalb des Netzwerkes weiterleiten und werden an zu PAN Koordinatoren (Personal Area Network) sollten sie die Organisation des ganzen Netzwerkes übernehmen. Aufgrund dieser Eigenschaften und Aufgaben wird das Netzwerk oft zu einem vermaschten Netzwerk (Mesh Network) ausgebaut. Die MAC-Schicht ist für die Datenübertragung und den Empfang mitsamt Verwaltung verantwortlich, wie die Validierung der Frames und dem Beacon Management.

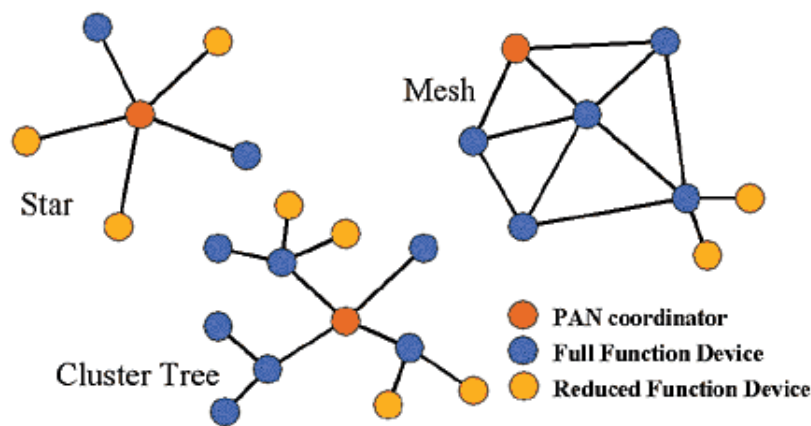


Abbildung 1: Mesh Network [1]

Dadurch bildet der Standard die Basis für die Dienste der Netzwerkschicht wie IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks 6LoWPAN.

## 2 6LoWPAN: IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network

6LoWPAN steht für IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks und beschreibt eine Netzwerktechnologie und Adaptionsschicht für IPv6 Pakete über 802.15.4-Netzwerke. Im folgenden Kapitel wird nun die ursprüngliche Zielsetzung der verantwortlichen Workgroup 2.1 und die grundlegenden Charakteristiken 2.2 vorgestellt. Anschließend wird 6LoWPAN im Detail anhand den 6LoWPAN Header 2.3 mitsamt dem “Stacked Header Prinzip” betrachtet. Das letzte Unterkapitel 2.4 behandelt schließlich den Kompressionsmechanismus für IPv6 Header.

### 2.1 Ursprüngliche Zielsetzungen

LoWPANs bestehen wie im vorherigen Kapitel 1.2 beschrieben, aus einfachen Netzknoten mit begrenzten Kapazitäten. Gerade da diese Netzwerke mitsamt ihren Geräten für künftige Technologien wie IoT und “Industrie 4.0” gedacht sind, bot es sich an, diese Netzwerke mittels Internet Protocol Version 6 IPv6 zu verbinden. Darüberhinaus folgte man dem Ansatz, möglichst das zu Benutzen, was bereits vorhanden war.

Während der Entwicklung für eine angepasste Version von IPv6 wurden daher einige Vorgaben[8] definiert, welche anhand den IEEE 802.15.4-Netzwerken ausgerichtet sind. Diese wären, die Reduzierung des Paket-Overheads von IPv6, ein geringerer Verbrauch von Bandbreite und Strom, sowie möglichst geringe Anforderungen an die Rechnerkapazität.

Anhand diesen Vorgaben, wurden nun folgende Ziele für die Umsetzung von 6LoWPAN definiert, ...

- Erstellung eines Fragmentation und Assembly Layers, zur Kombination von LR-WPANs und IPv6.
- Ein Mechanismus zur Kompression des Headers, sowie die Nutzung des Network Management, von IPv6.
- Erschaffung eines Mesh Routing Protokolls, anhand von LR-WPANs. (siehe Kapitel 3.2 bzgl. Routing Protocol for Low power and Lossy Networks)

### 2.2 Charakterisierung von 6LoWPAN

Anhand der Vorgaben und Zielsetzungen, können nun die eindeutigen Charakteristiken von 6LoWPAN abgeleitet werden.

**IPv6-Stack als Grundlage** Der Hauptgrund an der Verwendung von IP-basierter Technologie, beruht sich sowohl an der Bekanntheit, dass die weltweite Entwicklergemeinschaft Erfahrungen mit dem Protokoll aufweisen kann, IPv6 eine bereits bewährte Technologie verkörpert und das auf eine bereits bestehende Infrastruktur aufgebaut werden kann. Dies wird auch erweitert durch die Verwendung von TCP/IP.

**Eigenschaften von IPv6** Zusätzlich bietet IPv6 eine kosteneffektive Nutzung, da es geringe Kosten bei der Implementierung, der Protokoll-Komplexität, der benötigten Konfigurations Infrastruktur und dem Header/Protokoll-Overhead aufweist.

**Stacked Header Prinzip** Dieses Prinzip beschreibt die Erstellung von mehreren Typen an Headern, welche gestapelt (stacked) werden können und somit verschiedene Anforderungen erfüllen können. Daher besitzt 6LoWPAN vier verschiedene Header-Typen, welche im Kapitel 2.3 im Zusammenspiel und einzeln erklärt werden. Die Notwendigkeit zur Verwendung dieses “Stacked Header Prinzip” wird im folgenden Unterkapitel 2.2.1 erläutert.

**Routing Möglichkeiten** 6LoWPAN arrangiert zwei Varianten zum Routing von Paketen. Die erste Variante ist das traditionelle Routing per Network Layer mittels Routing Protokoll (Route-Over) oder alternativ ein Data Link Layer Routing mittels MAC-Adressen (Mesh-Under). Eine genaue Erklärung der Varianten und deren Unterschied werden im Kapitel 3 genauer erläutert.

**Kompressions Mechanismus** Kompression der IPv6-Header mittels eines Mechanismus, basierend auf dem Stacked Header Prinzip zur Reduzierung der Paket-Größe. Eine genaue Beschreibung erfolgt im Kapitel 2.4.

### 2.2.1 Maximum Transmission Unit MTU

Durch die Verbindung von Internet Protocol Version 6 und IEEE 802.15.4-Netzwerken innerhalb von 6LoWPAN, müssen verschiedene Anforderungen an die Maximum Transmission Unit MTU[9] gleichzeitig erfüllt werden. Dabei ermöglicht IPv6 Pakete mit einer MTU von bis zu 1280 Bytes, wobei LR-WPAN Frames aufgrund ihres Headers, sowie der AES-CCM-128 Verschlüsselung nur maximal 81 bytes für die darüberliegende Schicht bereitstellen. Deshalb wird ein Adaptions Layer benötigt, welcher Pakete fragmentiert und wieder zusammensetzt.

Zusätzlich folgt, dass der IPv6 Header weitere 40 Bytes und ein Transportprotokoll wie UDP weitere 8 Bytes beansprucht, wodurch nur noch weitere 33 Bytes für die eigentliche Anwendung verfügbar wäre.

Deshalb müssen folgende Betrachtungen berücksichtigt werden:

- Ein Adaption Layer muss die Anforderungen bezüglich der MTU von IPv6 (1280 Bytes) und LR-WPAN (81 Bytes) beachten.
- Ein Mechanismus zur Kompression der Header ist zwingend notwendig.

Die Lösung dieser Probleme wird durch die 6LoWPAN Header aufgrund des Stacked Header Prinzips und dem Kompressionsmechanismus durch das LOWPAN\_IPHC Encodingformat umgesetzt.

## 2.3 6LoWPAN Header

Die 6LoWPAN Header, Dispatch Header 2.3.1, Mesh Header 2.3.2, Fragmentation and Assembly Header 2.3.3 und das LOWPAN\_IPHC Encodingformat 2.4, bilden zusammen die Adaptionsschicht zwischen dem Data Link Layer, symbolisiert durch das IEEE 802.15.4-Frame, und dem Network layer, repräsentiert durch IPv6 Pakete, siehe Abbildung 2. Diese Adaptionsschicht wird mit Hilfe des “Stacked Header Prinzip” umgesetzt, bei dem die verschiedenen 6LoWPAN Header aneinandergereiht werden um die jeweiligen Header-Informationen darzustellen. Die Header werden dabei durch den 2 Bit langen vordefinierten Type Identifier unterschieden. Durch dieses Prinzip werden nur die Informationen gesendet, welche benötigt werden und unnötige Headerteile werden ausgespart. Direkte Anwendung des “Stacked Header Prinzip” werden im Kapitel 2.3.4 anhand von Beispielen weiter verdeutlicht.

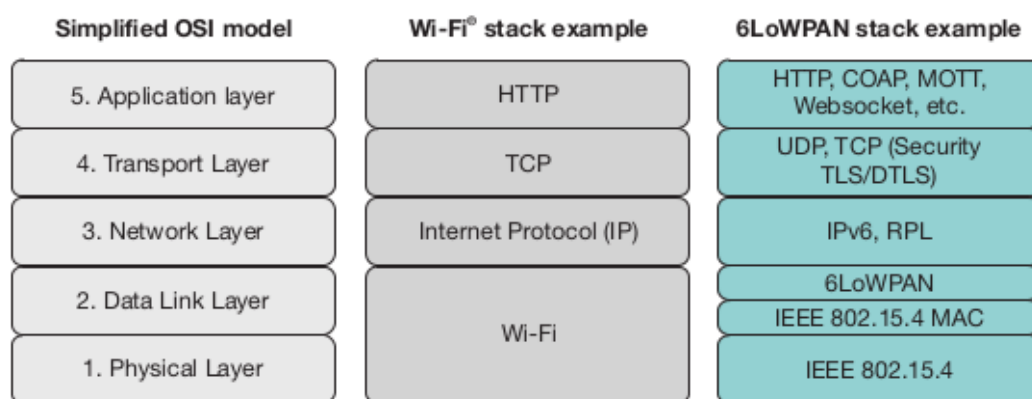


Abbildung 2: Vergleich OSI-Referenzmodell, Wi-Fi Stack und 6LoWPAN-Stack [11]

### 2.3.1 Dispatch Header

Der Dispatch Header hat eine Aufgabe, die Beschreibung der auf ihn folgenden Headertypen anhand der verwendeten Kompression. Der 1 Byte große Header ist dabei in zwei Felder aufgeteilt, zuerst den 2 Bit langen Type Identifier (01) gefolgt von dem 6 Bit langen Dispatch Value. Dieser Wert beschreibt dabei einen vordefinierten anderen Header Typ, wie in der darauffolgenden Abbildung 3 zu sehen ist.

01	000001	IPv6 Uncompressed
01	000010	IPv6 HC1 Compressed Encoding
01	111111	Additional Dispatch byte
Dispatch Header		

Abbildung 3: Dispatch Header [10]



### 2.3.2 Mesh Header

Der Mesh Header codiert das Hop Limit des Paketes sowie die Quell- und Zieladresse des Frames auf dem Data Link Layer. Dadurch beinhaltet der Mesh Header alle nötigen Informationen für ein einfaches aber effektives Routing mittels MAC-Adressen, wobei ein einfaches Mesh Netzwerk erstellt wird, deshalb nennt sich dieses Verfahren “Mesh-Under”. Zusätzlich bietet der Mesh Header durch IEEE 802.15.4 die Möglichkeit, die kurzen 16 Bit Adressen zu verwenden, anstatt den normalen 64 Bit Adressen. Daher erfolgt die Aufteilung des Headers in:

- den Type Identifier (01), 2 Bit
- die Angabe der Adressenlänge, separat für Quelladresse (O) und Zieladresse (F). Jeweils 1 Bit.
- das Hop Limit, 4 Bit
- sowie der Quell- und Zieladresse (32 - 128 Bit)

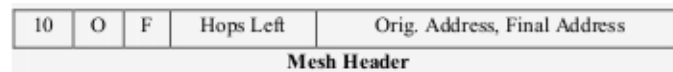


Abbildung 4: Mesh Header [10]

### 2.3.3 Fragmentation and Assembly Header

Die Notwendigkeit für den Fragmentation and Assembly Header wurde bereits im Kapitel 2.2.1 ausgiebig erläutert, wodurch sich für den Header mehrere Charakteristiken ergeben, welche zu folgendem Aufbau des Headers führen, ...

- dem Type Identifier (11), 2 Bit
- Angabe ob sich um das erste Fragment (000) oder ein darauffolgendes Fragment (100) handelt, 3 Bit
- Die Datagram Size gibt die Länge des gesamten IP Paketes vor der Fragmentation auf dem Data Link Layer an. Dieses Feld ist für folgende Pakete optional und kann daher weggelassen werden. 11 Bit.
- Der Datagram Tag beschreibt eine eindeutige Nummer, welche für alle Fragmente des IPv6 Datagrams verwendet wird. Dadurch werden die einzelnen Frames auf der Empfängerseite zugeordnet. 16 Bit.
- Das letzte Feld wird nur im zweiten und den darauffolgenden Fragmenten verwendet und entspricht einer Sequenznummer um die richtige Reihenfolge der Fragmente zu gewährleisten. 8 Bits.

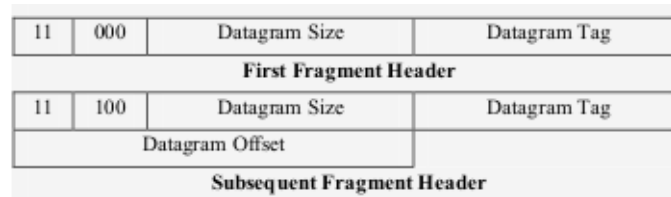


Abbildung 5: Fragmentation Header [10]

### 2.3.4 Kommunikationsszenarien

Im folgenden werden drei Kommunikationsszenarien vorgestellt, welche das Stacked-Header-Prinzip erläutern.

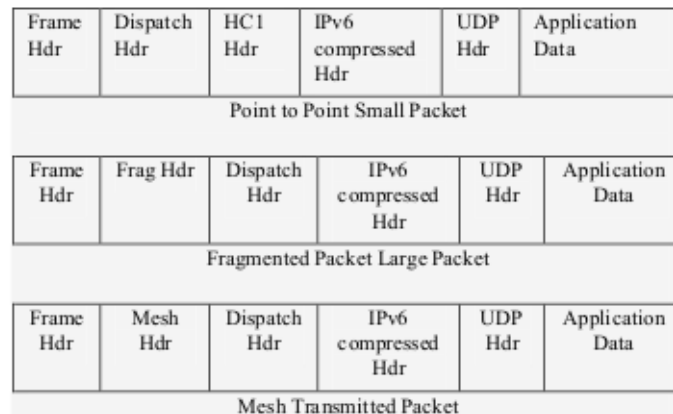


Abbildung 6: Verschiedene Kommunikationsszenarien [11]

- Das erste Beispiel beschreibt eine einfache Kommunikation mit Point-to-Point Small Packets. Dabei wird nur der Dispatch und LOWPAN\_IPHC Header verwendet, sowie der komprimierte IPv6 Header welcher lediglich 2 Bytes Länge. Die beiden 6LoWPAN Header beanspruchen zusammen ebenfalls nur 2 Bytes.
- Das nächste Szenario beschreibt das erste fragmentierte Teilpaket eines großen Paketes. Dabei wird vor dem Dispatch Header der Fragmentation Header auf dem Data Link Layer verwendet.
- Das letzte Beispiel erläutert ein Paket welches “über ein Mesh Netzwerk transportiert wird.

## 2.4 IPv6 Header Compression

Die Grundlage für die Kompression des IPv6 Headers ist das Codierungsformat LOWPAN\_IPHC [14]. LOWPAN\_IPHC gewährleistet dabei eine effektive Komprimierung von lokalen, globalen und Multicast IPv6 Adressen, basierend auf geteilten Informationen, Felder des IPv6 Headers, innerhalb des Kontext von 6LoWPAN. Damit werden Informationen, welche von IEEE 802.15.4-Netzwerken auf dem Data Link Layer und IPv6 auf dem Network Layer, redundant existieren innerhalb von 6LoWPAN kombiniert. Dadurch kann der, im Kontext sehr große, IPv6 Header deutlich komprimiert werden.

Im folgenden können nun die Informationen des IPv6 Headers von ursprünglich 40 Byte schrittweise komprimiert werden, indem diese Informationen durch Annahmen mit festen Werten gefüllt werden (Version, Traffic Class und Flow Label) oder durch Informationen aus dem IEEE 802.15.4 Frame ersetzt werden (Payload Length, Next Hop).

**LOWPAN\_IPHC Codierungsformat** Das LOWPAN\_IPHC Codierungsformat beschreibt wie der IPv6 Header komprimiert wird. Bei dem Standard Encoding, entspricht das Codierungsformat einem Header von 2 Byte breite. Sollte für IPv6 das Additional Context Feld aktiv sein, nimmt der LOWPAN\_IPHC Header 3 Byte ein. Im Grunde entspricht der LOWPAN\_IPHC Header dabei einem reinen Flag-Feld und gibt mit einzelnen Bits oder Bitfolgen an, ob Felder des IPv6 Header komprimiert werden bzw. wie diese Komprimierung stattfindet.

Die wichtigsten Felder sind dabei, ...

- die Bitfolge 011, welche den LOWPAN\_IPHC Header einläutet.
- das HLIM-Feld (2 Bit), welches die Größe des Hop Limit angibt,
- das SAC bzw. DAC Feld (1 Bit), gibt die Kompression für Source bzw. Destination Adresse an.
- sowie das SAM bzw. DAM Feld (2 Bit), erläutert die Länge der Adressen an. (16-Bit Adressen werden durch die Kombination "10" angegeben)

Der Hauptpunkt der Kompression liegt dabei in den IPv6 Adressen[5], welche eine Länge von 128 Bit aufweisen. Diese Adresse ist dabei grundlegend in zwei Bereiche aufgeteilt. Die erste Hälfte von 64 Bit, wird als Präfix bezeichnet und steht für das angeschlossene Subnetz. Die zweite Hälfte von 64 Bit, ist der Interface-Identifizierer IID und ist gleichzusetzen mit der MAC-Adresse.

Aufgrund dieser Tatsache muss bei der Kompression der IPv6 Adressen besonders betrachtet werden, wobei sich Unterschiede bei der Reichweite (Anzahl der Hops) des IP-Pakets aufzeigen.

**Kommunikation über einen (1) Hop** bezeichnet den einfachsten Fall und entspricht dem "Best Case" für LOWPAN\_IPHC Kompression. Da der Suffix der IPv6-Adresse der MAC-Adresse auf dem Data Link Layer entspricht, wird diese Information vom IEEE 802.15.4 Frame "übernommen. Der Präfix kann bei einer Link Local-Adresse

sogar komplett weggelassen werden, womit von dem IPv6 Header nur 3 Bytes “übrigbleiben”, 1 Byte Dispatch Header, 1 Byte LOWPAN\_IPHC Encoding Feld und 1 Byte für das Hop Limit Feld, welches als einziges ohne “Änderungen” übernommen wird. Damit wurden 37 Bytes des ursprünglichen IPv6 Header gespart, dies entspricht eine Kompression von 92,5 Prozent.

**Kommunikation über mehrere (>1) Hops** unterscheidet sich zur Kommunikation “über einen Hop” nur anhand der MAC-Adressen. Diese sind innerhalb mehreren Hops nicht identisch, weshalb der Suffix angegeben werden muss. Dabei können nun die langen 64-Bit Adressen oder die kurzen 16-Bit Adressen gewählt werden. Der Präfix kann innerhalb eines Subnetzes (Verbindung mit Link Local-Adresse) weggelassen werden. Damit ergibt sich für den IPv6 Header eine Länge von 7 Bytes, zusammengesetzt aus Dispatch Header (1 Byte), LOWPAN\_IPHC Feld (1 Byte), HOP Limit Feld (1 Byte), sowie der Quell- und Zieladresse (jeweils 2 Bytes). Dies entspricht eine Reduktion von 33 Bytes durch Kompression, wodurch 82,5 Prozent gespart wurden.

Im ursprünglichen Design der Kompression [9] wurden die Kompressionsheader LOWPAN\_HC1 und LOWPAN\_HC2 vorgestellt. Diese wurden später durch LOWPAN\_IPHC [14] ersetzt, da sie für die praktische Umsetzung unzureichend waren.

**HC1 Encodingformat** HC1 Coding beschreibt die Kompression des IPv6 Headers anhand eines 8 Bit langen Feld-Headers. Dieser LOWPAN\_HC1 Header gibt an, wie mit den IPv6 Header Feldern umgegangen wird und welches Protokoll IPv6 nachfolgt (UDP, TCP, ICMP). Im letzteren Fall kann zusätzlich das LOWPAN\_HC2 Encodingformat angewendet werden, welches einen LOWPAN\_HC2 Header an den LOWPAN\_HC1 Header anschließt, und die Kompression für das anschließende Transportprotokoll angibt.

**Grundlage für Austausch** Nötig wurde ein anderes Codierungsformat, da HC1 Encoding Probleme mit der Kompression der Adressen aufzuweisen hat. Im Idealfall für HC1 Encoding, der Verwendung von Link Local-Adressen (Mesh-Under Routing), können die IPv6 Adressen vollständig gespart werden. Dieser Wegfall beeinflusst zwar nicht das Routing auf der Netzwerkschicht, da IPv6 Neighbor Discovery und Routing Protokolle ebenfalls mit Link Local-Adressen funktionieren, aber Kommunikationsverbindungen auf höheren Schichten sind von IPv6 Adressen abhängig. Bei Route-Over Routing und der deshalb nötigen Nutzung von IPv6 Adressen, werden diese nur auf 64 Bit komprimiert, da der Interface Identifier IID angegeben werden muss und dieser nicht für die kurzen 16-Bit Adressen von IEEE 802.15.4 geeignet ist. Bei Multicast Verbindung muss sogar die vollständige IPv6 Adresse angegeben werden, wodurch 128 Bit Traffic entsteht.

## 3 6LoWPAN Routing

Dieses Kapitel behandelt das Routing für 6LoWPAN. Dabei wird zuerst auf die zwei verschiedenen Kategorien des 6LoWPANs Routing, Route Over vs. Mesh Under 3.1 behandelt. Im nächsten Schritt, wird das Routing Protokoll der Netzwerkschicht RPL Routing Protocol for Low power and Lossy Networks 3.2 beispielhaft betrachtet.

### 3.1 Route Over vs. Mesh Under

Routing ist ein wichtiges Thema, da Knotenpunkte begrenzte Fähigkeiten besitzen, siehe LR-WPAN 1.2, weshalb verschiedene Routing-Protokolle entworfen wurde. Diese können dabei in zwei Kategorien eingeteilt werden.

**Mesh Under** beschreibt das Routing auf dem Adaption Layer von 6LoWPAN, wodurch das Routing auf dem Data Link Layer, mit Hilfe der kurzen 16-Bit oder der Standard-64-Bit langen MAC Adressen stattfindet. Dafür wird der Mesh Header 2.3.2 den restlichen 6LoWPAN Headern, wie dem Fragmentation and Assembly Header sowie dem Dispatch Header vorangestellt. Wobei mehrere Link Layer Hops einen einzelnen IP Hop ersetzen, damit entspricht die Reichweite einer IPv6 Verbindung alle Knoten im gleichen Multihop Mesh. Bei einem fragmentierten Paket werden die einzelnen Fragmente über den Mesh, evtl. auf unterschiedlichen Routen, geschickt und am Ziel gesammelt und bei Eintreffen aller Fragmente wieder zusammengesetzt.

**Route Over** ist das Standard IP-Routing auf dem Network Layer, dabei wird jeder Knoten auf dem Data Link Layer als IP Router betrachtet, womit ein Hop auf dem Data Link Layer einem Hop auf dem Network Layer entspricht, daher spiegelt diese einzige Verbindung die Reichweite der IPv6 Verbindung dar. Damit können nun die Dienste von IPv6 bzgl. Routing, wie Routing Tabellen und Hop-by-Hop Optionen angewendet werden. Der Adaption Layer von 6LoWPAN “übernimmt in diesem Fall das Mapping zwischen den beiden Layern und sorgt hauptsächlich für das Fragmentieren und Zusammensetzen der Pakete. Zusammengefasst besteht das Route Over Netzwerk aus mehreren sich überlappenden Link Local Bereichen, wobei jeder Knoten seinen eigenen Link Local Bereich, mit in direkten Verbindung stehenden Nachbarn, besitzt. Für diesen Fall wird im folgenden Kapitel 3.2 das Routing Protokoll RPL Routing Protocol for Low power and Lossy Networks vorgestellt.

**Vor- und Nachteile der Verfahren** [6] Durch Mesh-Under wurde eine Alternative außerhalb des IP-basierten Network Layer geschaffen, welche die komplexen Topologien von LR-WPANs für höhere Schichten erfolgreich abstrahiert. Leider führt Mesh-Under zu mehr technischen Problemen und Risiken als durch die Anführung behoben wurden. Als wichtigster Punkt kann dabei die Aufgabentrennung der Layer innerhalb des OSI-Referenzmodells angesehen werden. Mit Mesh-Under wird zwar das Routing für LR-WPANs optimiert, aber verhindert die Kombination mit

anderen Technologien auf dem Link Layer, z.B. WLAN und damit Multi-Layer Verbindungen, weshalb ein IP Routing Protokoll benötigt wird. Zusätzlich trüben weitere Nachteile von Mesh-Under gegenüber Route-Over das Gesamtbild, wie unzureichende Adressbereiche oder schlichtweg unzureichende Routing-Funktionalität.

Dagegen liefert das Standard-Routing mittels Route-Over zwar eine geringere Kompression der Pakete, besitzt dafür aber alle Vorteile des Network Layers, wie spezielles Routing-Protokolle, vollständige Funktionalität und Multi-Layer Verbindungen. Zusätzlich ist Route-Over natürlich unabhängig von Protokollen des Data Link Layers, weshalb die Route-Over Variante die bessere Variante bildet und verwendet werden sollte.

### 3.2 RPL Ripple: Routing Protocol for Low power and Lossy Networks

Routing Protocol for Low power and Lossy Networks RPL, auch "Ripple" genannt, ist ein Distanzvektor-Routing-Protokoll welches für Verbindungen innerhalb von "Low power and Lossy Networks" LLNs konzipiert wurde [15]. Solche LLNs charakterisieren sich durch Eigenschaften, wie Beschränkungen an Rechnerzeit, Speicher und Stromverbrauch sowie mit Verbindungen mit geringer Datenrate und allen voran Instabilität und hoher Verlustrate. Diese Eigenschaften sind dabei fast deckungsgleich mit denen von LR-WPANs, weshalb RPL für 6LoWPAN angewendet wird.

Die Funktionsweise von RPL zeichnet sich dadurch aus, dass ein zielorientierter, gerichteter, azyklischer Graph DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph)[7] erstellt wird. Dieser DODAG entspricht dabei einer logischen Routing Topologie welches das tatsächliche physikalische Netzwerk abstrahiert. Wobei zu jedem Zeitpunkt mehrere DODAGs gleichzeitig auf dem physikalischen Netzwerk liegen können und jeder Graph unterschiedliche Anforderungen und Beschränkungen an die Knoten zuweisen kann. Darüberhinaus kann auf einem Knoten auch mehrere Graphen (RPL Instanzen) gleichzeitig liegen.

Jedem DODAG wird dabei eine Objekt-Funktion zugeordnet, welche dem Graph dadurch bestimmte Anforderungen und Beschränkungen zuweist um den "besten" Pfad für den Graphen zu bestimmen. Dieser Prozess wird durch einen Distanzvektoralgorithmus durchgeführt und arbeitet nach dem Prinzip "Teile deinen Nachbarn mit, wie du die Welt siehst"[12].

Die Knoten eines DODAG operieren dadurch als IPv6 Router, wobei ein Knoten, welcher auf der Abstraktionsebene von IPv6 an ein anderes Subnetz grenzt, innerhalb des DODAG als Root-Knoten dient.

Die Anforderungen entsprechen dabei ausgewählten Metriken, wie "Übertragungszeit, Verzögerung oder Jitter, wobei die Beschränkungen bestimmte Vorgaben vermeiden, z.B. die Vermeidung Nicht-Verschlüsselter Knoten oder Batterie-betriebener Knoten.

## 4 ZigBee und 6LoWPAN

Mit ZigBee gibt es bereits seit längerem eine proprietäre Spezifikation der ZigBee Alliance, einem Zusammenschluss von über 230 Unternehmen, um den IEEE 802.15.4 Standard auf der Network und Application Layer zu erweitern.

ZigBee war bis zum Erscheinen von 6LoWPAN die am verbreitetste Technologie auf dem Markt, da nicht nur die notwendige softwareseitige Spezifikation erstellt wurde sondern auch passende Hardware vertrieben wurde.

Im Gegensatz zu 6LoWPAN beschreibt ZigBee nicht nur die Anbindung von LR-WPANs mit IPv6, sondern baute einen eigenen Network Stack basierend auf IEEE 802.15.4 auf. Die Architektur kann in Abbildung 7 betrachtet werden und beschreibt dabei folgende Schichten und Objekte:

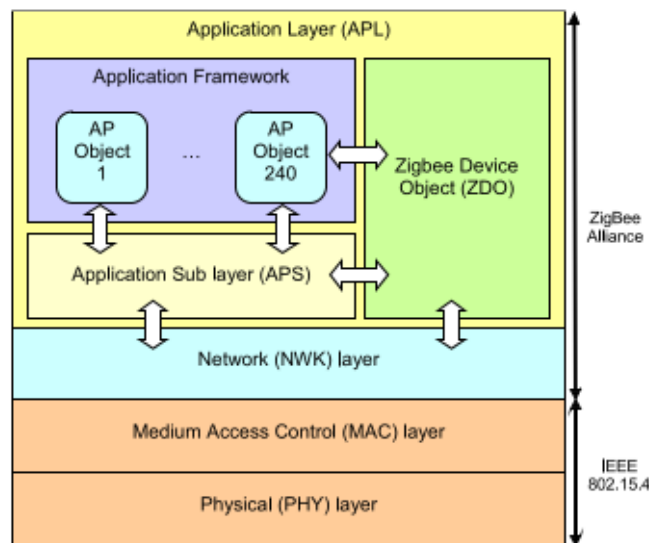


Abbildung 7: ZigBee Protocol Stack basierend auf IEEE 802.15.4 [2]

**Network Layer NWK** Die Aufgabe des NWK liegt in der Erstellung, sowie der Organisation eines Mesh Netzwerkes basierend auf IEEE 802.15.4 welches abstrahiert wird von dem tatsächlichen physikalischen Netzwerk. Das Routing erfolgt dabei ähnlich zu RPL, indem durch einen Route Discovery Algorithmus, dem “Ad-hoc On Demand Distance Vector Routing Algorithm AODV” ein Graph erzeugt wird. Dabei übernehmen Full Function Devices FFD als Knoten im Graphen die Routingaufgaben, indem diese Routing Tabellen RT anlegen und verwalten.

**Application Layer APL** Der APL spezifiziert ein Framework für die Kommunikation und Entwicklung von Anwendungen auf dem Application Layer. Der Kernbereich ist dabei das Application Framework, welches bis zu 240 Application Objects APO unterstützt, benutzerdefinierte Module auf Anwendungsebene. Anhand dieser APOs wurden zwei Sub Layer erschaffen, welche verschiedene Aufgaben

übernehmen. Der ZigBee Device Object ZDO Layer sorgt für die Verwaltung der Kommunikation, des Netzwerkes sowie der Netzwerksicherheit, wobei der Application Sub Layer APS den eigentlichen Datentransfer überwacht und die Sicherheit der Services kontrolliert.

**ZigBee vs. 6LoWPAN** Der direkte Vergleich zwischen beiden Technologien bezieht sich einerseits auf die Eigenschaften andererseits auf den wichtigen Punkt der Interoperabilität zu anderen Technologien und Protokollen. Dabei liegt 6LoWPAN eindeutig im Vorteil, da Interoperabilität ein wichtiges Designziel war, indem auf IPv6 aufgebaut wurde. ZigBee benötigt dagegen für die Anbindung an andere Geräte bzw. Protokolle eine aufwändige Schnittstelle auf Anwendungsebene. Aber auch die Kerneigenschaften beider Technologien im Vergleich spricht eindeutig für 6LoWPAN, da durch die Routingvariante Mesh-Under der Paket Overhead deutlich geringer ist, als beim ZigBee Protokoll. Zusätzlich ist auch die durchschnittliche Implementierung von 6LoWPAN mit 30 KB weitaus genügsamer als die 90 KB von ZigBee. Aufgrund dieser Probleme hat die ZigBee Alliance aber durch die Entwicklung der neuen Spezifikation ZigBeeIP 4.1 reagiert.

## 4.1 ZigBeeIP

Mit ZigBeeIP hat die ZigBee Alliance auf das Aufkommen von 6LoWPAN und dem Vorwurf der proprietären Software reagiert. Deshalb wurde eine Spezifikation mit skalierbarer Architektur entwickelt, welche weiterhin auf IEEE 802.15.4 Netzwerken sowie dem IPv6 Networking basiert. Wie die folgende Abbildung 8 präsentiert gilt als Grundlage 802.15.4 und darauf aufbauend unabhängige Standards, wie 6LoWPAN, IPv6 aber auch das Routingprotokoll RPL und IPv6 Anwendungen wie Neighbor Discovery sowie Transportprotokolle. Durch diese breite Verwendung von Standards wie die Interoperabilität mit anderen Standards gewährleistet und der Fehler eines abgeschlossenen Systems von ZigBee wird nicht wiederholt. Aufbauend auf dieser “super-specification” ?? folgt der ZigBee Smart Energy V2.0 Layer ein ip-basiertes Protokoll zur Kontrolle, Monitoring und dem Informationsaustausch von Anwendungen. Diese Anwendungen sind teil des ursprüngliche ZigBee Application Framework mitsamt der ZigBee Profiles.

Durch diese Entwicklung wurde nun eine offene Spezifikation geschaffen, welche vollständig auf Standards basiert wodurch viele verschiedene Geräte innerhalb eines einzigen Kontrollnetzwerkes verbunden werden können.

## 5 Fazit

Abschließend kann nun zusammengefasst werden, das durch das Internet der Dinge und dessen Anforderungen und Beschränkungen an die dadurch entstehenden Netzwerke Protokolle nötig sind, diese mit vorhandenen Technologien anzubinden.

Deshalb wurde 6LoWPAN entwickelt welches ein Bindeglied zwischen den IEEE 802.15.4-Netzwerken und IPv6 darstellt. Dabei bildet 6LoWPAN als Technologie und Kommu-



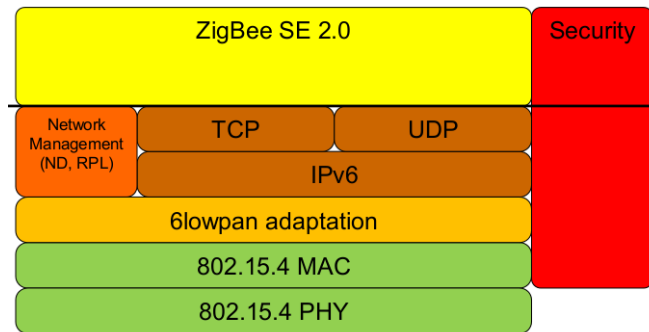


Abbildung 8: ZigBeeIP Protocol Stack basierend auf IEEE 802.15.4 [4]

nikationsprotokoll eine Adaptationsschicht um mit dem “Stacked Header Prinzip”, implementiert durch verschiedene Headertypen, und einem Kompressionsmechanismus die bis zu 1280 Byte großen IPv6 Pakete an die 127 Byte langen IEEE 802.15.4 Frames anzubinden.

Durch die Kombination beider Technologien, besitzt 6LoWPAN zwei verschiedene Routingverfahren, den Data Link Layer spezifischen Mesh-Under Routing mittels MAC-Adressen und dem Standard Routing Verfahren mittels IP-Pakete mitsamt der Verwendung von Routingprotokollen wie RPL.

Durch diese Eigenschaften wurde damit vom IETF ein fester Standard entwickelt, um eine Fragmentierung durch mehrere parallel agierende Technologien zu verhindern, da selbst weit verbreitete, bewährte aber proprietäre Alternativen wie ZigBee sich an 6LoWPAN anpassen.

## Literatur

- [1] Jon Adams. *Sensor Mag Meet the ZigBee Standard*. <http://www.sensorsmag.com/sensors-mag/meet-zigbee-standard-733>. Juni 2003.
- [2] et al. Bartoni. *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards*. <http://www.123seminarsonly.com/Seminar-Reports/015/53603449-zigbee.pdf>. Dez. 2006.
- [3] et al. Chowdhury. *Route-over vs Mesh-under Routing in 6LoWPAN*. Techn. Ber. Ajou University, Suwon, 443-749 Republic of Korea, 2009.
- [4] Robert Cragie. *The ZigBee IP Stack IPv6-based stack for 802.15.4 networks*. <http://labs.chinamobile.com/attachments/wiise/MiracleW-3.pdf>. 2010.
- [5] et al. Hinden. *RFC 4291: IP Version 6 Addressing Architecture*. <https://tools.ietf.org/html/rfc4291>. Feb. 2006.
- [6] Hui J. *Routing Architecture in Low-Power and Lossy Networks (LLNs) draft-routing-architecture-iot-00*. <https://tools.ietf.org/html/draft-routing-architecture-iot-00>. März 2011.

- [7] et al. JP Vasseur. *RPL: The IP routing protocol designed for low power and lossy networks*. Techn. Ber. Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance, 2011.
- [8] et al. Kushalnagar. *RFC 4919: IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals*. <https://tools.ietf.org/html/rfc4919>. Aug. 2007.
- [9] et al. Montenegro. *RFC 4944: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks*. <https://tools.ietf.org/html/rfc4944>. Sep. 2007.
- [10] Geoff Mulligan und 6LoWPAN Working Group. „The 6LoWPAN Architecture“. In: (Juni 2007). DOI: 10.1145/1278972.1278992.
- [11] Jonas Olsson. *6LoWPAN demystified*. Techn. Ber. Texas Instruments, 2014.
- [12] *Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Routing\\_Protocol\\_for\\_Low\\_power\\_and\\_Lossy\\_Networks](https://de.wikipedia.org/wiki/Routing_Protocol_for_Low_power_and_Lossy_Networks).
- [13] IEEE Computer Society. *Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. Techn. Ber. Institute of Electrical und Electronics Engineers Standards Association, 2011.
- [14] Hui Thubert. *RFC 6282: Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks*. <https://tools.ietf.org/html/rfc6282>. Sep. 2011.
- [15] et al. Winter. *RFC 6550: RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. <https://tools.ietf.org/html/rfc6550>. März 2012.