ZIGBEE

Wahlfachprojekt SS 2018

Daniel Tod, Luca Strobl, Dominik Mayer, Jean Castillo

Betreuung durch Silvia Schmidt, MSc BSc

Inhalt

EINLEITUNG

Einleitung

Dieses Projekt gliedert sich in zwei Teile: in einen theoretischen und einen praktischen Teil.

Im theoretischen Teil geben wir einen allgemeinen Überblick über den Netzwerkstandard gefolgt von den Erläuterungen zur technischen Umsetzung des Protokolls.

Im praktischen Teil demonstrieren wir einen Angriff auf das ZigBee-Netzwerk, indem wir Befehle mitschneiden. Das Sniffing erfolgt mit spezieller Hardware und Software und wurde in einer Netzwerklabor-ähnlichen Umgebung durchgeführt. Die technischen Voraussetzungen sowie alle Schritte wurden genau dokumentiert und mit zahlreichen Grafiken hinterlegt, um dem Leser die Möglichkeit zu bieten, das Setup nachzubauen und selbst einen Angriff zu starten.

ZIGBEE

ZigBee

Allgemeine Informationen

ZigBee ist ein offener Niedrigenergie-Netzwerkstandard für geringe Datenaufkommen. Er findet unter anderem Anwendung in der Hausautomation, in Sensornetzwerken und in der Lichttechnik.

Der Standard wurde von der ZigBee-Allianz entwickelt, welche 2002 gegründet wurde und mittlerweile mehr als 400 Unternehmen umfasst.

Das Ziel von ZigBee ist, verschiedene Geräte miteinander zu verbinden. So soll zum Beispiel möglich sein, alle Glühbirnen eines Haushalts mit einer einzigen Fernbedienung zu steuern.
Aufgrund der Tatsache, dass es viele verschiedene Hersteller von ZigBee-fähigen Produkten gibt, stellt die Interoperabilität zwischen den unterschiedlichen Geräten ein zentrales Designkriterium dar.
Und da viele der Produkte der Unterhaltungselektronik zuzuordnen sind, ist auch eine einfache Handhabung, wie das Paaren von Geräten, von großer Bedeutung. Dadurch ergeben sich zahlreiche Schwachstellen.
[1][2][3]

Technische Informationen

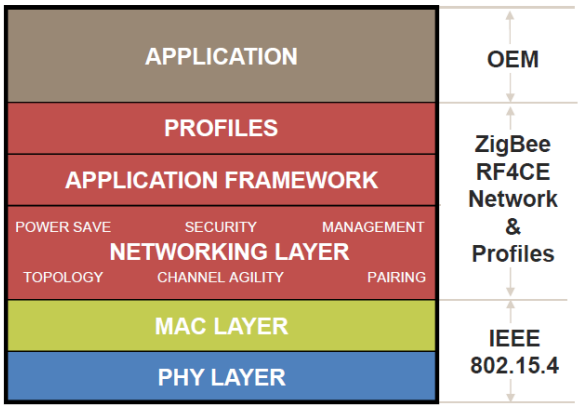
Allgemeines

ZigBee durchdringt Wände und Einrichtungsgegenstände und wird nicht von Personen beeinflusst, die sich durch den Kommunikationskanal bewegen. Die Übertragung ist robust gegen Interferenz und zeichnet sich vor allem durch ultra low power consumption aus. Die Kommunikation erfolgt bi-direktional, reicht bis zu 100 Meter und erlaubt eine Übertragungsrate von 250 kbps.[1][2]

Implementierung

ZigBee erweitert die PHY-Schicht und MAC-Schicht des IEEE 802.15.4 Standards um eine eigene NWK-Schicht und APL-Schicht (Grafik 1). Die verwendete Frequenz ist abhängig von der jeweiligen Region: in Amerika

erfolgt die Kommunikation im 915 MHz Bereich, in England liegt sie bei 868 MHz, in China bei 784 MHz und in Europa bei 2,4 GHz.[1][2][5][6]



Grafik 1: ZigBee

ZigBee-Profile

In ZigBee-Profilen werden Systemvoraussetzungen definiert. Um Kommunikation zwischen Geräten zu ermöglichen, müssen bestimmte Übereinkünfte getroffen werden. Das heißt, um den Anwendungen zu erlauben, Befehle zu senden, Daten abzufragen und Befehle und Anfragen zu verarbeiten, muss unter anderem die Übereinkunft von Nachrichten, das Nachrichtenformat und die Verarbeitung von Befehlen definiert werden.
Beispiele sind das ZigBee Light Link und das Home Automation Profil.[1][2][3]

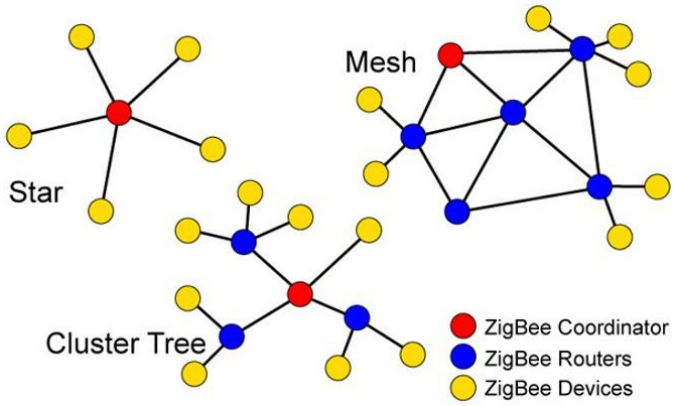
Gerätetypen

Der ZigBee-Standard definiert drei verschiedene Gerätetypen: den ZigBee-Coordinator, den ZigBee-Router und das ZigBee-End Device. Der Coordinator startet das Netzwerk mit festgelegten Parametern und arbeitet danach als Gateway, das immer erreichbar ist. Zu den Parametern zählen unter anderem der Übertragungskanal und die verwendeten Verschlüsselungscodes.
Der Router erweitert den Sendebereich und ist ebenfalls immer erreichbar. Beim Routing unterscheidet man zwischen der Star-, Mesh- und Cluster Tree-Topologie.
End Devices melden sich bei einem Router an, um dem ZigBee-Netzwerk beizutreten. Sie verfügen über einen Standby-Modus, um die Lebenszeit

zu erhöhen und zeichnen sich durch geringe Produktionskosten aus.[2][4][5]

Topologie

In der Star-Topologie verbinden sich alle End Devices mit einem zentralen Coordinator. Es gibt keine Router.
In der Mesh-Topologie bauen Router eine Verbindung zum Coordinator auf, wobei ein Router nicht zwingend mit dem Coordinator verbunden sein muss. Es reicht, wenn eine Verbindung zu mindestens einem anderen Router besteht. End Devices stellen keine direkte Verbindung mit dem Coordinator her, sie binden sich lediglich an Router.
Die Cluster Tree-Topologie zeichnet sich dadurch aus, dass sich sowohl Router als auch End Devices mit dem Coordinator verbinden können. An die Router können sich weitere Router oder End Devices hängen. Grafik 2 verbildlicht die verschiedenen Topologie-Konzepte.[2][3]



Grafik 2: ZigBee-Netzwerk Topologien

Kommunikation

Der Coordinator startet ein Wireless Personal Area Network (WPAN) mit einer 64-Bit erweiterten PAN-ID zur Identifizierung. ZigBee-fähige Geräte können diesem Netzwerk nun beitreten, indem sie die verfügbaren Netze scannen und einen Pairing-Prozess anstoßen. Der Pairing-Prozess mit dem Coordinator unterscheidet sich zwischen den einzelnen Produkten. So sendet eine Philips Hue Glühbirne beispielsweise eine Anfrage an den stärksten Sender, um eine Verbindung aufzubauen. Dabei ist zu beachten, dass sich aufgrund der Sicherheit die Glühbirne innerhalb eines bestimmten Radius um den Coordinator befinden muss, um

dem Netzwerk beitreten zu können. Eine andere Methode des Pairings ist die Push-Button-Funktion, die unter anderem bei Fernbedieungen zum Einsatz kommt.
Jedes ZigBee-Funkmodul besitzt eine eindeutige 64-Bit IEEE Adresse, wobei den Modulen bei Eintritt ins Netzwerk noch eine 16-Bit Short Address zugewiesen wird.[2][3][4]

Für die Kommunikation innerhalb des Netzwerks werden zwei verschiedene Schlüssel verwendet: der Network Key und der Link Key.
Der Network Key wird für die Verschlüsselung des Broadcast Traffics benutzt und muss jedem Gerät im Netzwerk bekannt sein.
Der Link Key hingegen dient zur Verschlüsselung von Unicast Traffic. Für jede einzelne bidirektionale Verbindung zwischen zwei Nodes ist ein Link Key notwendig, das heißt, wenn ein Sensor mit dem Coordinator und einem anderen Sensor verbunden ist, so verwendet er zwei verschiedene Link Keys, einen für den Kommunikationskanal mit dem Coordinator und einen für den Kanal mit dem anderen Sensor.
Die Schlüssel haben eine Länge von 128 Bit und werden mittels AES-CCM* generiert.[2][3][4][5][6][7]

Die Verteilung des Network Keys auf die Geräte erfolgt durch den Transport über das Netzwerk oder durch manuelles Vorinstallieren des Schlüssels auf den einzelnen Geräten, das aber einen erheblichen zusätzlichen Aufwand bedeutet und dadurch die Usability stark einschränkt.
Beim Transport wird der Network Key vom Trust Center auf alle Geräte verteilt. Dabei wird der Schlüssel mit dem Default Trust Center Link Key verschlüsselt. Das Trust Center ist verantwortlich für das Sicherheitsmanagement in einem ZigBee-Netzwerk. Es kümmert sich um die Authentifizierung von Geräten, die dem Netzwerk beitreten möchten sowie um die Verteilung der Schlüssel.[2][3][5][6][7]

Die Generierung des Link Keys kann durch drei verschiedene Methoden erfolgen: er wird mithilfe des Master Keys erzeugt, der bei der Produktion auf dem Gerät vorinstalliert wird. Die zweite Möglichkeit ist das Hinzufügen des Link Keys durch den Endbenutzer über eine out-of-band Methode. Zuletzt kann das Trust Center den Link Key an die einzelnen Nodes senden.[3][5][6][7]

ANGRIFF AUF ZIGBEE

Angriff auf ZigBee

Voraussetzungen

Hardware

In diesem Projekt wurde die folgende Hardware verwendet:

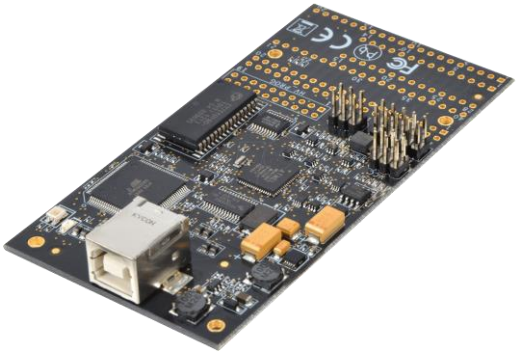
- Raspberry Pi 3 Model B+ [18] (Grafik 3)
- SD Karte mit mindestens 8 GB Speicher
- RaspBee: ZigBee Aufsatzmodul für Raspberry Pi [19] (Grafik 4)
- Philips Hue Glühbirne [29] (Grafik 5)
- Atmel RZ Raven USB-Stick [21] (Grafik 6)
- AVR Dragon Programmier-Board [22] (Grafik 7)
- IDC-Kabel (Grafik 8)
- USB 2.0 Kabel, A Stecker auf B Stecker (Grafik 9)
- Windows-PC
- USB-Stick mit mindestens 4GB Speicher
- USB Maus und Tastatur
- Externer Monitor
- HDMI-Kabel

Grafik 3: Raspberry Pi 3 Model B+ [12]

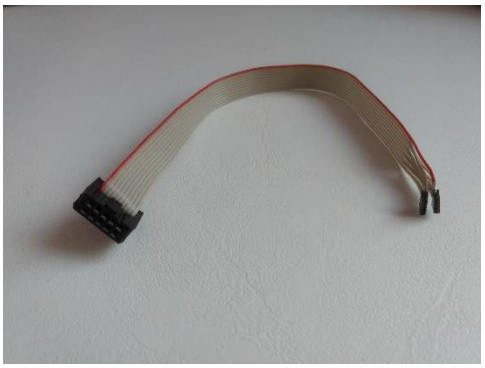
Grafik 4: RaspBee Modul [13]

Grafik 5: Philips Hue Glühbirne [14]

Grafik 6: Atmel RZ Raven USB-Stick [15]



Grafik 7: AVR Dragon Programmier-Board [16]



Grafik 8: IDC-Kabel

Grafik 8: USB 2.0 Kabel, A Stecker auf B [17]

Software

In diesem Projekt wurde die folgende Software verwendet:

- RaspBee Gateway SD-Karten Image Raspbian Jessi RaspBee (Stable) Version 01-2017 [23]
  - Verwandelt den Raspberry Pi in ein ZigBee-Gateway
- SD Card Formatter 5.0 for SD/SDHC/SDXC [24]
- Win32 Disk Imager [25]
- KillerBee [26]
  - Framework und Tools für Angriffe auf ZigBee und IEEE 802.15.4 Netzwerke
- Kali Linux 64 Bit Version 2018.2 [27]

Setup

Windows-PC

- Downloade und entpacke das RaspBee Gateway SD Karten-Image
- Downloade und installiere den SD Card Formatter
- Downloade und installiere den Win32 Disk Imager
- Stecke die SD Karte in das Notebook und formatiere sie mit dem SD Card Formatter
- Installiere das RaspBee Gateway SD-Karten Image mit Win32 Disk Imager
  - Wähle das Image aus
  - Überprüfe das angegebene Laufwerk
  - Klicke auf „Write“
- Entferne die SD Karte sicher aus dem Notebook

Raspberry Pi

- Stecke die SD Karte in den dafür vorgesehenen Slot am Raspberry Pi
- Stecke das RaspBee Modul auf die rechten äußeren GPIO Pins (Grafik 10)
- Verbinde den Monitor, die Maus und die Tastatur mit dem Raspberry Pi und stecke ihn an die Stromversorgung an

Grafik 10: Raspberry Pi mit aufgestecktem RaspBee-Modul

Philips Hue

- Schraube die Philips Hue Glühbirne in eine passende Fassung und versorge sie mit Strom

Kali Linux

- Downloade Kali Linux
- Stecke den USB-Stick in den Windows-PC
- Starte Win 32 Disk Imager und installiere das Image
  - Wähle das Image aus
  - Überprüfe das angegebene Laufwerk
  - Klicke auf „Write“
- Lass den USB-Stick stecken und starte den PC neu
- Unterbreche den Neustart mit der Hersteller-spezifischen Tastenkombination (wird normalerweise am Bildschirm angezeigt)
- Bei der Frage, von welchem Laufwerk gebootet werden soll, wähle den USB-Stick aus
- Nachdem das Image geladen worden ist, erscheint das Boot-Menü
- Wähle die erste Option (Live amd64) aus und warte, bis Kali geladen ist

KillerBee

Öffne in Kali ein Terminal (Strg+Alt+T) und gib die folgenden Befehle ein:

Dependencies

- $ sudo apt-get install python-gtk2 python-cairo python-usb python-crypto python-serial python-dev libgcrypt-dev
  - installiert die notwendigen Dependencies
- $ sudo apt install mercurial
  - installiert mercurial
- $ sudo hg clone https://bitbucket.org/secdev/scapy-com
  - klont das Repository in das aktuelle Verzeichnis
- $ cd scapy-com
  - wechselt in das Verzeichnis „scapy-com“

- $ sudo python setup.py install
  - führt die Installation aus

KillerBee

- $ sudo apt-get install git
  - installiert das git-Kommando
- $ mkdir Killerbee
  - erstellt ein neues Verzeichnis „Killerbee“
- $ cd Killerbee
  - wechselt in das zuvor erstellte Verzeichnis
- $ git clone https://github.com/riverloopsec/killerbee.git
  - klont das Repository in das aktuelle Verzeichnis
- $ cd /Killerbee/killerbee/
  - wechselt in das Verzeichnis „killerbee“
- $ sudo python setup.py install
  - führt die Installation aus

Atmel RZ Raven USB-Stick

- Verbinde den AVR Dragon mit dem Atmel RZ Raven USB über das IDC-Kabel (Grafik 11)
  - Achte dabei auf die korrekte Verbindung der Pins (Grafik 12 und 13) [28]:

```
2 4 6 8 10
1 3 5 7 9
```

Grafik 12: AVR Dragon Pin Out [28]

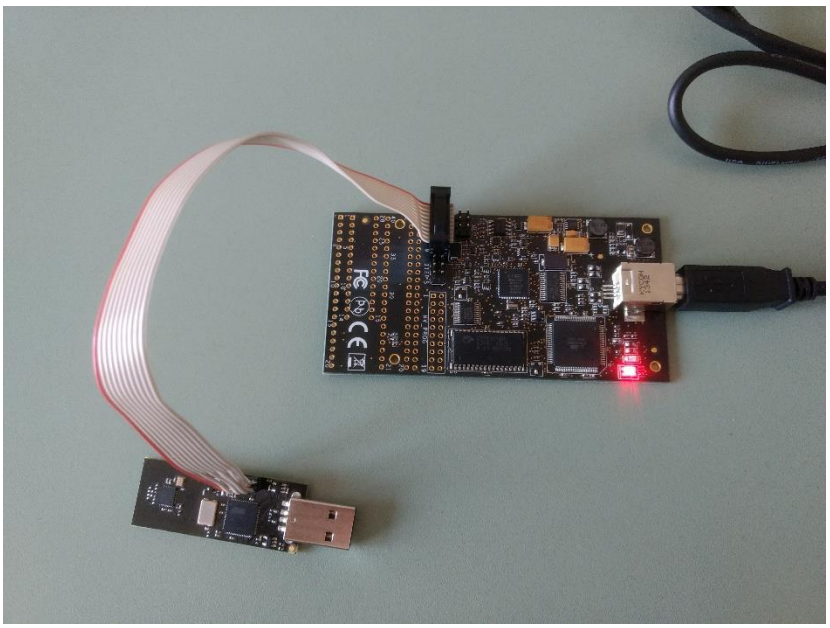
```
9  7 5 3 1
10 8 6 4 2
```

Grafik 13: RZ Raven Pin Out [28]

- Verbinde den PC, auf dem Kali Linux läuft, mit dem AVR Dragon über das USB-Kabel A Stecker auf B Stecker

Firmware-Sicherung

- $ sudo apt-get install avrdude
  - installiert avrdude
- $ sudo avrdude -P usb -c dragon_jtag -p usb1287 -U flash:r:Desktop/backup.hex:i
  - -P port: identifiziert die Schnittstelle, über die der AVR Dragon verbunden ist
  - -c programmer-id: verwendet das angegebene Programmier-Board
  - -p partno: gibt den Typ des Microcontrollers an, der mit dem Programmier-Board verbunden ist
  - -U memtype:op:filename:filefmt: führt eine Speicher-Operation aus
    - memtype: gibt den Speichertyp an
    - op: gibt die Art der Operation an (r: read, w: write)
    - filename: gibt die Datei an, in die geschrieben werden soll
    - filefmt: beinhaltet das Format der Datei (i: Intel Hex)
- Terminal-Output: avrdude done. Thank you.



Grafik 11: AVR Dragon Board und Atmel RZ Raven Stick

Firmware-Flash

- $ sudo avrdude -P usb -c dragon_jtag -p usb1287 -B 10 -U flash:w:/Killerbee/killerbee/firmware/kb-rzusbstick-003.hex:a
  - -B bitclock: spezifiziert die bit clock Periode für das JTAG-Interface oder die ISP-Clock; der Wert wird in Mikrosekunden angegeben
- Terminal-Output: avrdude done. Thank you. [28]

Verifizierung

- Die LED des Atmel USB-Sticks leuchtet nun bernsteinfarben (Grafik 14)
- Bei Eingabe des Befehls $ sudo zbid erscheint folgender Output: [9]

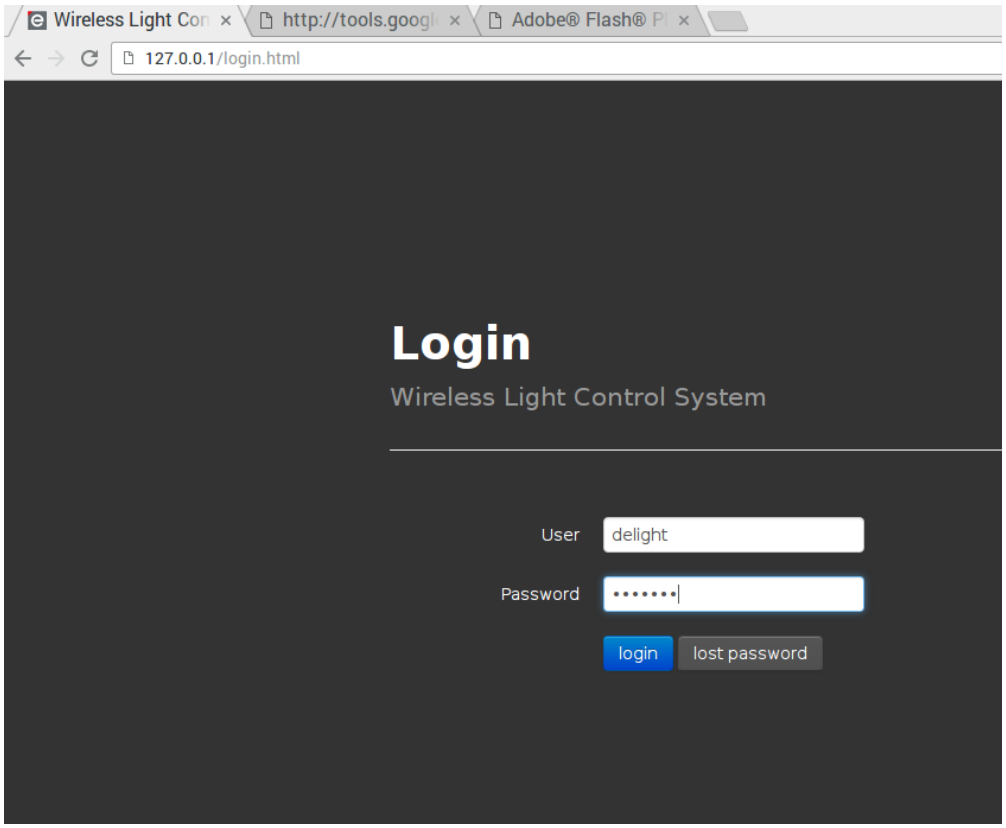
```
lstrobl@ubuntu:~$ sudo zbid
          Dev Product String       Serial Number
          1:4 KILLERB001           FFFFFFFFFFFF
```

Grafik 14: Der Stick leuchtet jetzt bernsteinfarben

Sniffing

Raspberry Pi I

- Öffne den Browser am Raspberry Pi und gib die folgende Adresse in die Adresszeile ein:
  - 127.0.0.1
- Melde dich im Login-Fenster mit den folgenden Werten an (Grafik 15)
  - Username: delight
  - Password: delight
- Es erscheint ein Überblicksfenster



Grafik 15: Browser-Login

Kali-PC I

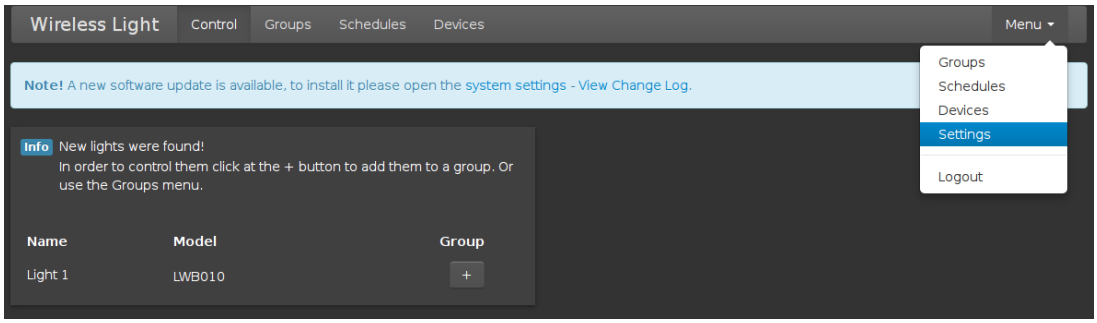
- Starte Kali Linux
- Stecke den Atmel RZ Raven USB-Stick an
- Öffne ein Terminal und gib die folgenden Befehle ein (Grafik 16):
- $ sudo zbstumbler
- Notiere dir den Channel und beende den Befehl mit Strg+C
- $ sudo wireshark -f <channel>
  - ersetze <channel> mit der vorher notierten Zahl
- Wireshark öffnet sich und beginnt, den Netzwerkverkehr mitzuschneiden [9]

```
lstrobl@ubuntu:~$ sudo zbstumbler
[sudo] password for lstrobl:
Warning: You are using pyUSB 1.x, support is in beta.
zbstumbler: Transmitting and receiving on interface '1:4'
New Network: PANID 0x0B64  Source 0x8E85
        Ext PANID: 00:21:2e:ff:ff:01:40:30      Stack Profile: ZigBee Enterprise
        Stack Version: ZigBee 2006/2007
        Channel: 15
^C
7 packets transmitted, 1 responses.
lstrobl@ubuntu:~$ sudo zbwireshark -f 15
Warning: You are using pyUSB 1.x, support is in beta.
zbwireshark: listening on '1:4'
```

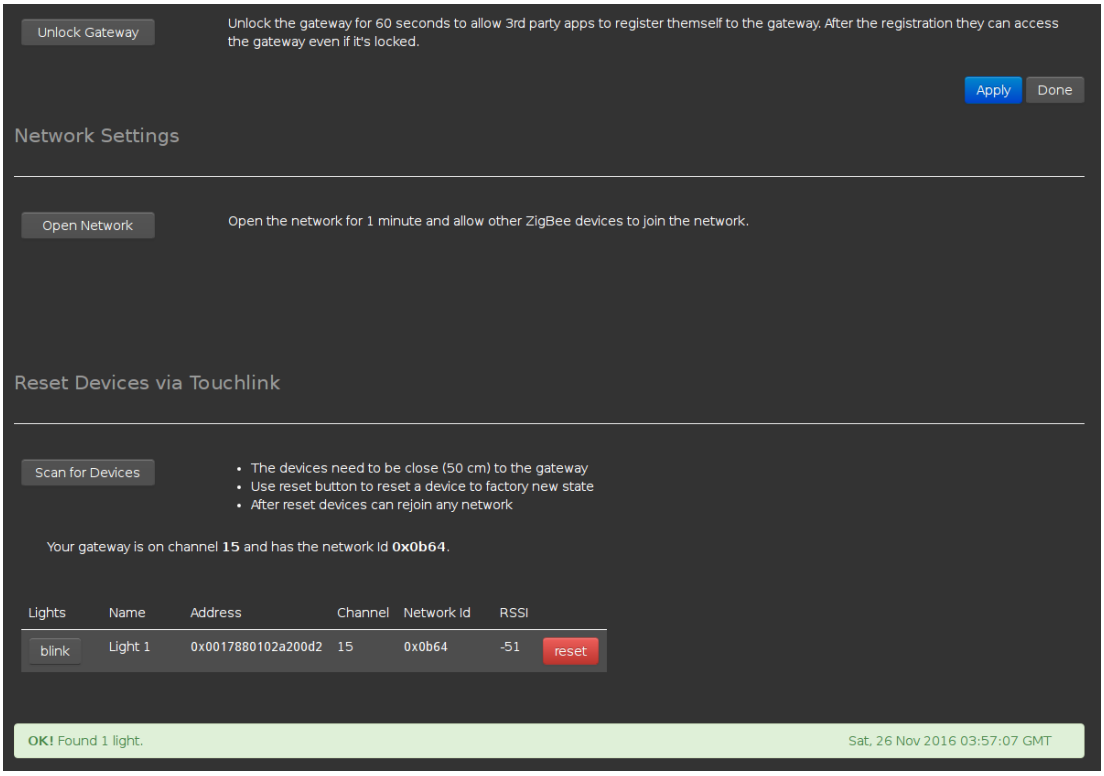
Grafik 16: zbstumbler und zbwireshark

Raspberry Pi II

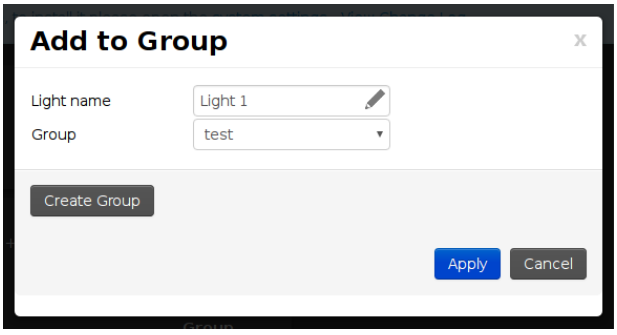
- Klicke im Überblicksfenster im rechten oberen Eck auf „Menu“ und dann auf Settings (Grafik 17)
- Klicke im Settings-Fenster „Scan for Devices“ (Grafik 18)
- Die Glühbirne sollte nun angezeigt werden; falls ein roter Reset-Button angezeigt wird, so drücke diesen (Grafik 18)
- Scrolle etwas hinauf und klicke auf „Open Network“ (Grafik 18)
- Klicke auf „Control“ in der Leiste und klicke im neuen Fenster auf das Pluszeichen
- Klicke auf „Create Group“, gib einen Namen ein und erstelle die Gruppe mit „Create“ (Grafik 19)
- Klicke auf „Apply“
- Die Glühbirne wurde jetzt hinzugefügt
- Klicke „on“ zum einschalten und „off“ zum ausschalten



Grafik 17: Gehe zu Menu -> Settings



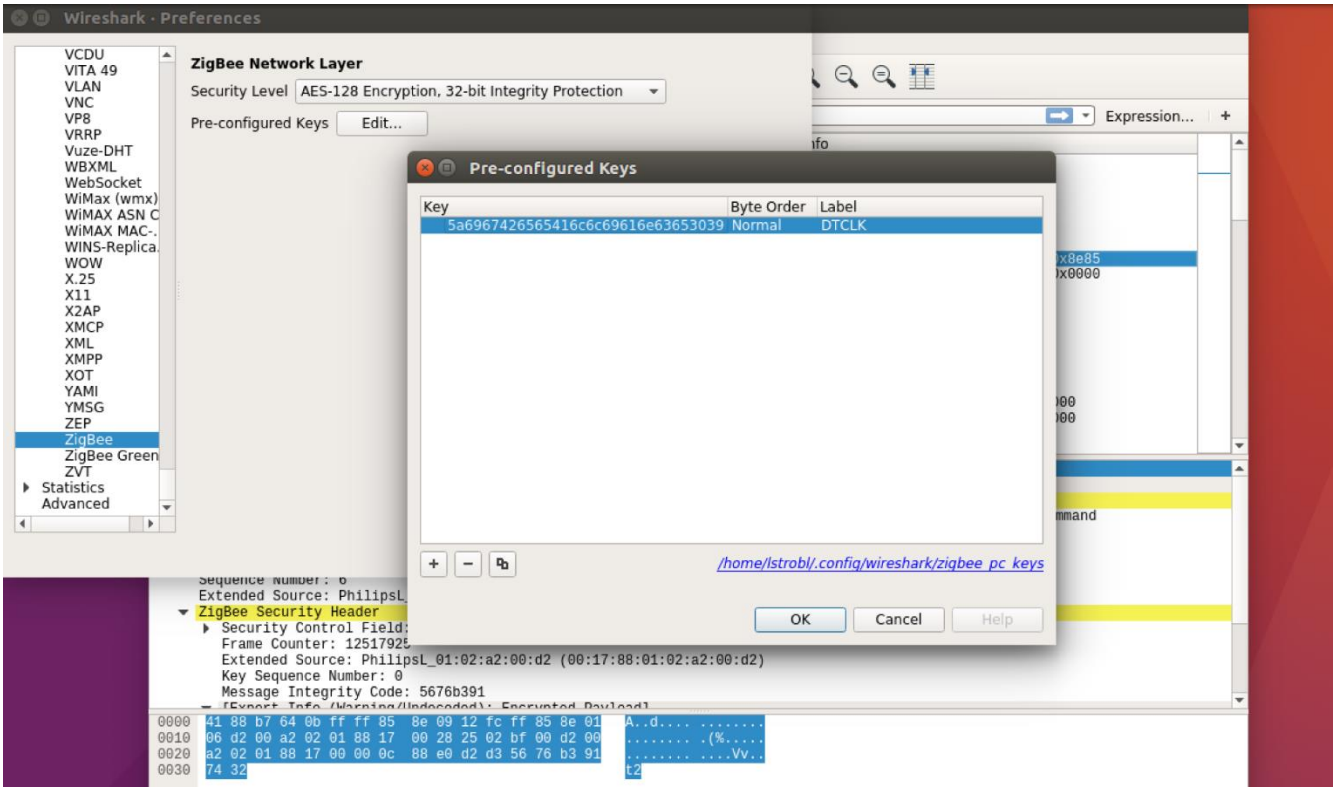
Grafik 18: Scan for Devices, reset, Open Network



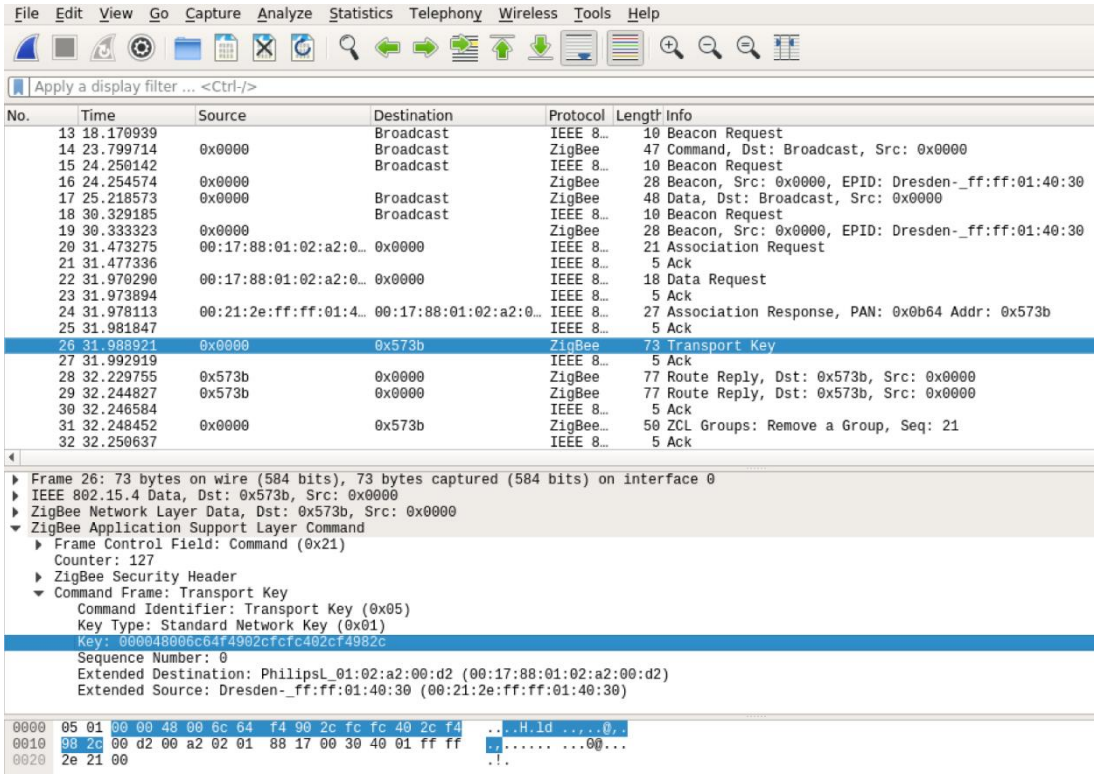
Grafik 19: Create Group

Kali-PC II

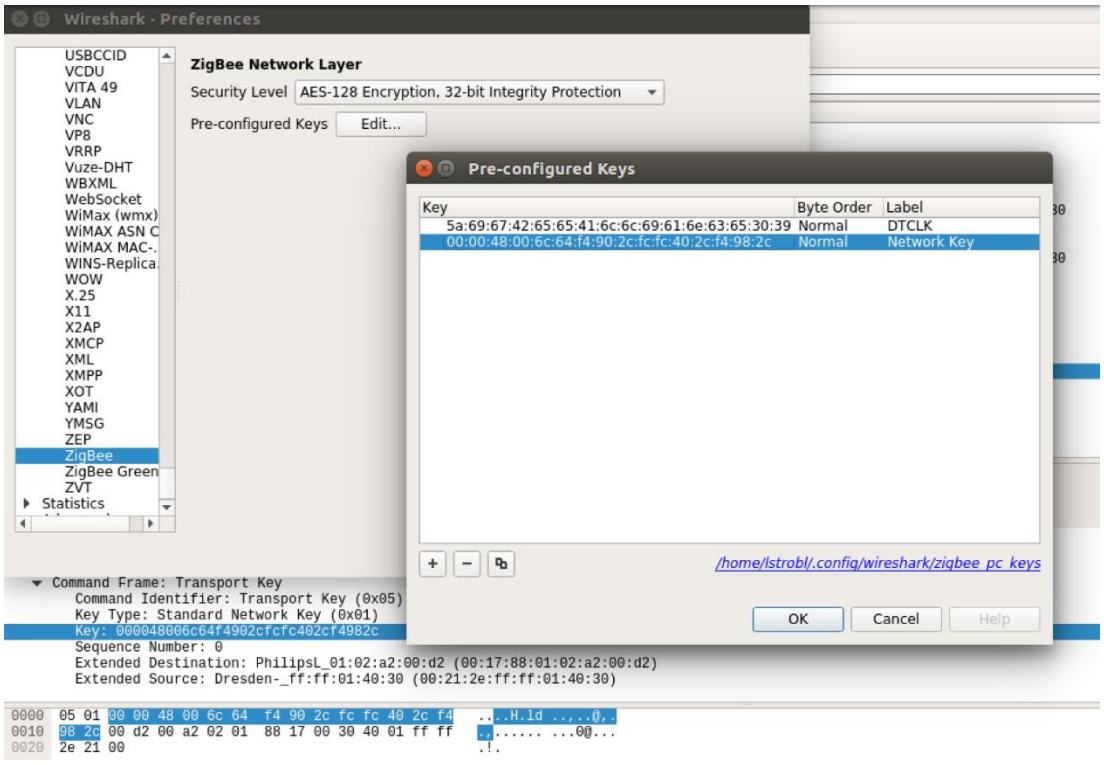
- Stoppe Wireshark durch Drücken des roten Knopfes in der linken oberen Ecke
- Gehe zu Edit -> Preferences -> Protocols -> ZigBee
- Klicke auf das Plus-Zeichen und gib folgenden Schlüssel ein (Grafik 20):
  - 5a:69:67:42:65:65:41:6c:6c:69:61:6e:63:65:30:39
  - Dies ist der Default Trust Center Link Key; mit ihm wird der Network Key verschlüsselt [5][6][8][10]
- Sieh dir den mitgeschnittenen Netzwerkverkehr an und suche nach „Transport Key“ im Info-Feld (Grafik 21)
- Füge den Schlüssel wie bereits oben beschrieben in Wireshark hinzu (Grafik 22)
- Wireshark entschlüsselt nun automatisch verschlüsselte Pakete mit dem neu hinzugefügten Transport Key
- Abhängig von der Anzahl, wie oft du die Glühbirne aus- und eingeschaltet hast, siehst du jetzt die entschlüsselten Kommandos „ZCL OnOff“ (Grafik 23)



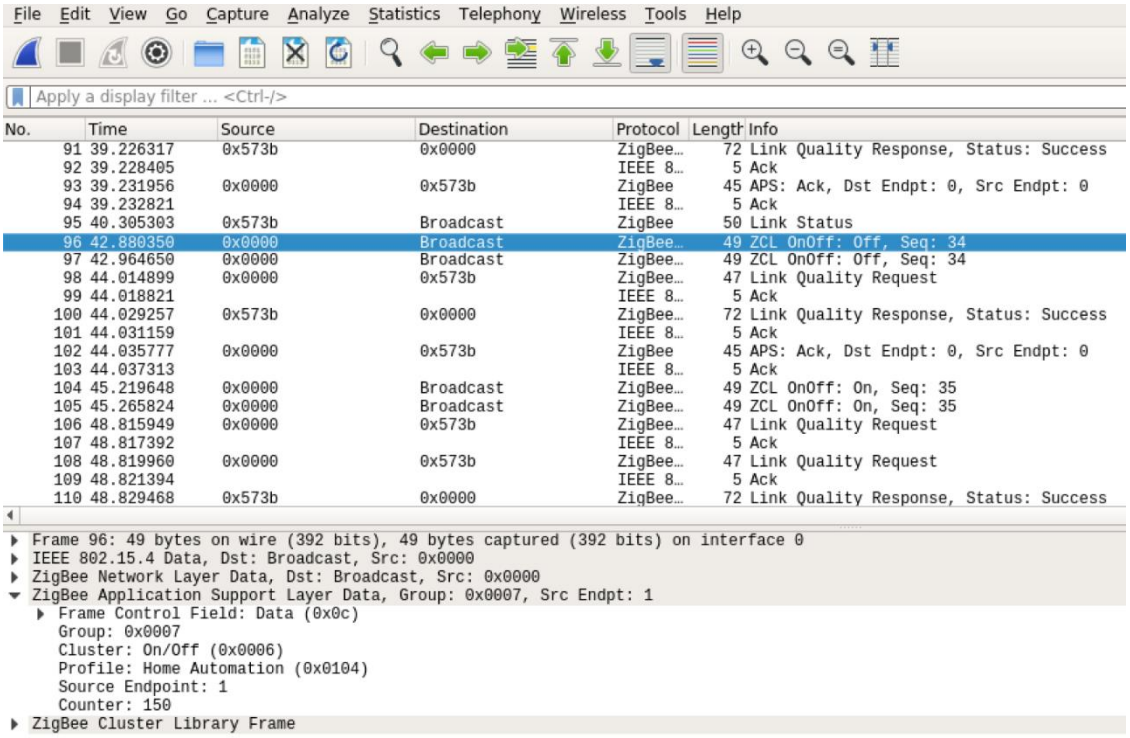
Grafik 20: Hinzufügen des Default Trust Center Link Keys



Grafik 21: Transport Key



Grafik 22: Hinzufügen des Transport Keys



Grafik 23: Entschlüsseltes OnOff-Kommando

QUELLEN

Quellen

[1] ZigBee Remote Control 2.0: Updated Standard for Radio Frequency-Based Remote Controls, October 2014

[2] ZigBee RF4CE: A Quiet Revolution is Underway December 6, 2012

[3] https://research.kudelskisecurity.com/2017/11/01/zigbee-security-basics-part-1/

[4] https://de.wikipedia.org/wiki/ZigBee

[5] Niko Vidgren, Keijo Haataja, José Luis Patino-Andres, Juan José Ramírez-Sanchis and Pekka Toivanen, “Security Threats in ZigBee-Enabled Systems: Vulnerability Evaluation, Practical Experiments, Countermeasures, and Lessons Learned,” 2013

[6] Philipp Morgner, Stephan Mattejat and Zinaida Benenson, “All Your Bulbs Are Belong to Us:
Investigating the Current State of Security in Connected Lighting Systems,” 2017

[7] https://research.kudelskisecurity.com/2017/11/08/zigbee-security-basics-part-2/

[8] https://research.kudelskisecurity.com/2017/11/21/zigbee-security-basics-part-3/

[9] http://securitysynapse.blogspot.com/2015/11/fun-with-zigbee-wireless-part-iii.html

[10] Tobias Zillner, “ZigBee Exploited – The good, the bad and the ugly,” Black Hat 2015 Power Point Präsentation

[11] https://www.elprocus.com/what-is-zigbee-technology-architecture-and-its-applications/

[12] https://at.rs-online.com/web/p/entwicklungskits-prozessor-mikrocontroller/1373331/

[13] https://www.dresden-elektronik.de/raspbee/

[14] https://www2.meethue.com/de-de/p/hue-white-einzelne-lampe-e27/8718696449578

[15] http://at.farnell.com/atmel/atavrzusbstick/kit-2-4ghz-rzraven-usb-stick/dp/1562234

[16] https://www.reichelt.de/Programmer-Entwicklungstools/AT-AVR-DRAGON/3/index.html?ACTION=3&GROUPID=5514&ARTICLE=97200

[17] https://www.startech.com/de/Kabel/USB-2.0/USB-2.0-Kabel/05-m-High-Speed-USB-20-Kabel~USB2HAB50CM

[18] https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/

[19] https://www.dresden-elektronik.de/raspbee/

[21] https://www.microchip.com/webdoc/rzraven/rzraven.RZ_Raven_module.html

[22]https://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=ATAVRDRAGON

[23] https://www.dresden-elektronik.de/funktechnik/solutions/wireless-light-control/raspbee-gw-sd-card-image/

[24] https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/index.html

[25] https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/

[26] https://github.com/riverloopsec/killerbee

[27] https://www.kali.org/downloads/

[28] https://medium.com/@netscylla/zigbee-killerbee-1a35af5ef4f4

[29] https://www2.meethue.com/de-at/p/hue-white-einzelne-lampe-e27/8718696449578