

SAP und IoT - Die Anbindung von Bluetooth Low Energy (BLE) an SAP

Thomas Randl
Fakultät für Informatik

WS 2020/21

In dieser Arbeit werden die verschiedenen Anbindungsmöglichkeiten des Internet of Things (IoT) Kommunikationsprotokolls Bluetooth Low Energy (BLE) an SAP Softwarelösungen erläutert. Dabei werden zunächst die Begriffe IoT und Industrie 4.0 im SAP Umfeld erläutert. Anschließend wird BLE im Hinblick auf Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten betrachtet. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Erläuterung der Schnittstellenlösung welche SAP für IoT Geräte bereitstellt. Um festzustellen, ob BLE für den eigenen Anwendungsfall in Verbindung mit SAP geeignet ist, wird zusätzlich ein Überblick über konkurrierende Protokolle gegeben und deren Einsatzmöglichkeiten diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Vorgestellte Technologien	1
2.1 Internet of Things und Industrie 4.0	1
2.2 SAP und Internet of Things	2
3 Allgemeine Funktionsweise Bluetooth Low Energy	3
3.1 Protokollstack	3
3.2 Kommunikation	5
3.3 Anwendungsszenarien	6
4 Schnittstellenbeschreibung	7
4.1 Komponenten SAP Leonardo IoT	7
4.2 Administration SAP Leonardo IoT	10
4.3 Bluetooth Low Energy mit Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	11
5 Vergleich von Bluetooth Low Energy mit konkurrierenden Protokollen	12
5.1 WLAN (IEEE 802.11b)	13
5.2 ZigBee (IEEE 802.15.4)	13
6 Zusammenfassung	14
Literatur	IV

Abbildungsverzeichnis

1	Bluetooth Low Energy (BLE) Protokollstack [Tow14, Seite 16]	3
2	Zeitlicher Ablauf einer BLE Verbindung [Tow14, Seite 22]	6
3	Überblick über die SAP Internet of Things (IoT) Architektur [Hol20, Seiten 117, 164, 181, 184, 201, 208, 221]	8
4	Zusammenhang zwischen BLE, Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) und SAP [Ziv21, Seite 3f] [Hol20, Seite 230f]	11

Abkürzungsverzeichnis

BLE	Bluetooth Low Energy
CPS	Cyber Physisches System
GAP	Generic Access Profile
GATT	Generic Attribute Profile
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
IoT	Internet of Things
M2M	Maschine zu Maschine Verbindung
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
RFID	Radio Frequency Identification
SIG	Special Interest Group

1 Einleitung

Technologischer Fortschritt erlaubt es dem Menschen immer mehr Prozesse in der Industrie oder im Alltag zu automatisieren. Dies führte in den letzten Jahren zur Entwicklung verschiedenster Kommunikationsprotokolle, welche eben diesen Zweck verfolgen. Besonders wichtig ist hierbei die Maschine zu Maschine Verbindung (M2M). So sollen technische Geräte - ohne Interaktion mit dem Menschen - dazu in der Lage sein miteinander in Verbindung zu treten, Daten auszutauschen und auf Ereignisse zu reagieren. Dieser Trend veranlasste das Unternehmen SAP, eine Softwarelösung zur Integration von IoT Geräten in die firmeninterne SAP Lösung zu ermöglichen. Mit dieser Schnittstelle ist es seither möglich, eine Vielzahl von Kommunikationsprotokollen an SAP anzubinden und dadurch weitere Industrieprozesse zu automatisieren. Eines dieser Protokolle ist BLE. Dieses hat sich aus dem klassischen Bluetooth Standard für den IoT Markt entwickelt.

Fraglich ist nun, wie praktisch eine derartige Verbindung zwischen SAP und BLE IoT Geräten ist. Zusätzlich wäre es interessant zu erfahren, wie aufwändig die Installation und Wartung einer solchen Verbindung ist und welchen Mehrwert BLE gegenüber anderen IoT Protokollen liefert. Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen, werden in den folgenden Kapiteln zunächst die Begriffe Industrie 4.0 und IoT im Zusammenhang mit SAP erläutert. Weiterhin wird die Funktionsweise von BLE näher betrachtet. Anschließend wird die Schnittstelle zwischen SAP und BLE im Detail dargestellt. Abschließend wird ein Überblick über konkurrierende IoT Kommunikationsprotokolle gegeben und herausgearbeitet, wann ein Einsatz von BLE sinnvoll ist. Dafür werden besonders der Energieverbrauch, die Infrastrukturanforderung und die Datenrate des jeweiligen Protokolls betrachtet.

2 Vorgestellte Technologien

Im folgenden Kapitel wird einleitend eine kurze Erläuterung über die drei zentralen Begriffe dieser Arbeit gegeben. Besonderer Schwerpunkt ist dabei die Aufschlüsselung der Begriffe und die Erklärung warum diese in dieser Arbeit einen derartigen Stellenwert besitzen.

2.1 Internet of Things und Industrie 4.0

Der Begriff IoT hat sich vor über 30 Jahren im Zusammenhang mit der Radio Frequency Identification (RFID) Technologie entwickelt. Seine Wurzeln liegen daher im Bereich der Identifikationstechnik. Dessen Aufgabe liegt darin Objekte eindeutig zuweisen zu können. Umgesetzt wurde dieser Vorgang zu seiner Zeit in dem ein Objekt mit einem RFID Tag versehen wurde. Das entsprechende Gegenstück dazu konnte dann mit Hilfe eines Scanners voll automatisiert und über Funk Daten lesen und schreiben. Dies erweiterte wiederum die Funktion des vorherigen Barcodes um einige automatisierbare Funktionen.

Nun konnten Daten nicht nur gelesen, sondern zusätzlich auch geschrieben werden. Die Geburtsstunde der IoT [Hol20, Seite 37].

Eine allgemeine Definition des Begriffes IoT lässt sich schwer finden. Jedoch ist es gängig zu definieren, dass ein IoT den Zusammenschluss physischer Komponenten mit deren digitalen Abbildern im Internet darstellt. Deshalb spricht man im Zusammenhang mit IoT in der Regel von dem Zusammenschluss verteilter Geräte wie Sensoren oder Steuerungen, welche zentral in einer Anwendung überwacht, beziehungsweise gesteuert werden [Hol20, Seite 33]. Einen Großteil des IoT Sektors nimmt dabei die M2M ein. Bei dieser werden Maschinen, Fahrzeuge und viele weitere Komponenten derart konfiguriert, dass sie automatisch miteinander kommunizieren. Das resultiert in autonomem Fahren oder anderen für den Menschen nützlichen Möglichkeiten [Hol20, Seite 449].

Der vermehrte Einsatz von IoT in der Industrie hat zur Einführung des Begriffes Industrial IoT geführt. Dieser wird auch als Industrie 4.0 bezeichnet. Er steht für die Weiterentwicklung die IoT in der industriellen Fertigung ermöglicht hat. Das letztliche Ziel welches mit dem Begriff Industrie 4.0 beschrieben wird ist eine vollständig autonome Fabrikations- und Wertschöpfungskette. Dies soll mit Hilfe von einem oder mehreren Cyber Physisches System (CPS) erreicht werden. Der Begriff CPS steht dabei für ein physisches Gerät, welches ein eingebettetes System und diverse Sensoren sowie Aktoren enthält. Das eingebettete System steuert dieses und kommuniziert mit anderen CPS [Sch17, Seite 30f].

2.2 SAP und Internet of Things

SAP ist eine deutsche Firma, welche sich auf die Entwicklung von Softwarelösungen für Betriebe spezialisiert hat. Sie wurde im Jahr 1972 von fünf Mitarbeitern des Konzerns IBM gegründet. Heute ist die SAP SE das größte Softwareunternehmen Europas und bietet IT Lösungen für beinahe alle Wirtschaftsbereiche [SAP].

Seit 2018 verfolgt SAP nun die Strategie des „intelligenten Unternehmens“. Im Zuge dessen wurde Technologien wie Machine Learning, Blockchain und auch IoT in das Angebot der IT Lösungen für Unternehmen aufgenommen. SAP führte diese Angebote unter der Marke „SAP Leonardo“ ein. Diese ist seit 2019 fester Bestandteil der Unternehmensstrategie [Hol20, Seite 102f].

Mit der Anbindung von IoT an SAP Softwarelösungen will der Konzern die Informationsgewinnungs- und Steuerungsmöglichkeiten der Technologie für den Kunden praktisch einfangen. Dafür werden diese Funktionen in die SAP Anwendung aufgenommen, wodurch der Kunde auf diese zugreifen kann, ohne eine andere Anwendung zu benötigen. Die optimale Nutzerinteraktion mit dem System hat dabei unter anderem den höchsten Stellenwert [Hol20, Seite 105f].

Als eine der Plattformen von „SAP Leonardo“ wird IoT unter anderem in Produktion, Wartung und Logistik eingesetzt. In Produktion und Wartung liegt der Schwerpunkt auf der Datenerhebung durch CPS und der Verknüpfung mit Geschäftsdaten aus dem Backend. In der Logistik wiederum liegt ein Schwerpunkt in der Positionserfassung verschiedener CPS [Hol20, Seite 107ff]. Durch die Verknüpfung von IoT und SAP gibt es viele weitere nützliche Anwendungsfälle. In Kapitel 4.1 wird erläutert wie IoT Systeme

an SAP angeschlossen werden können.

3 Allgemeine Funktionsweise Bluetooth Low Energy

Im nachfolgenden Kapitel wird nun ein kurzer Überblick über die Technologie BLE gegeben. Dabei wird zum einen die Architektur unter Erläuterung des Protokollstacks und zum anderen die Funktionsweise erläutert.

3.1 Protokollstack

Die Architektur von BLE geht aus dem Protokollstack hervor. Dieser ist in Abbildung 1 dargestellt. Besonders auffällig ist die Untergliederung in drei Ebenen. Der „Controller“ stellt dabei den hardwarenächsten Bereich dar. Hier befinden sich die zwei Layer „LE Physical“ und „Link“.

Diese beiden Protokolle sind in einer Vielzahl von Gerätearchitekturen beheimatet. Im Fall von BLE sendet das Physical Layer im Frequenzbereich 2,4 GHz bis 2,4835 GHz. Diesen Bereich teilt sich das Protokoll mit anderen Technologien wie beispielsweise WiFi. Um Kollisionen zu vermeiden, teilt BLE den Bereich in 40 Kanäle auf und wechselt während der Verbindung in regelmäßigen Abständen oder bei Übertragungsproblemen den Kanal. Dieser Ansatz nennt sich Frequency Hopping Spread Spectrum [Tow14, Seite 16f].

Das Link Layer unterscheidet sich in seiner Funktionsweise nicht großartig von dem anderer Kommunikationsprotokolle. Hier werden die Nachrichten, welche für das Versenden aus den oberen Schichten ankommen, in Pakete gepackt und an das Physical Layer

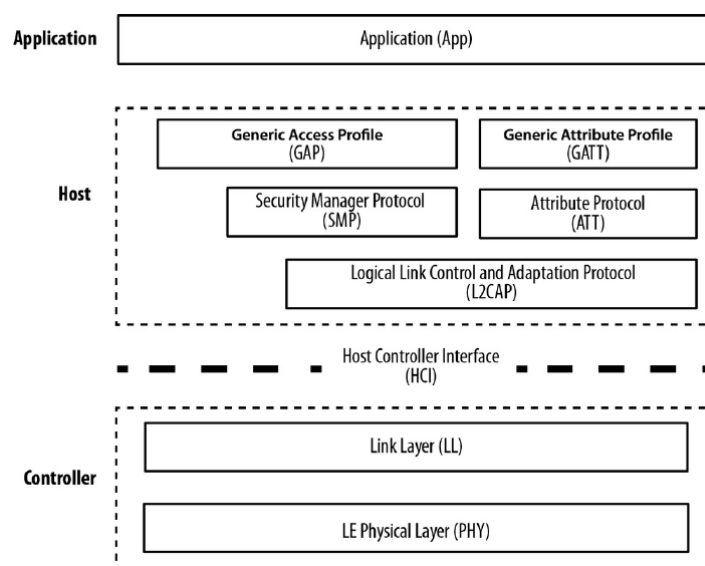


Abbildung 1: BLE Protokollstack [Tow14, Seite 16]

weitergereicht. Dieser Prozess ist für ankommende Pakete natürlich in umgekehrter Reihenfolge [Tan14, Seit 194]. Lediglich die Größe der Payload seit Version 4.2 von bis zu 251 Byte pro Paket ist eine Besonderheit [Gup]. Bei WLAN (IEEE 802.11) zum Vergleich kann ein Paket bis zu 2312 Byte groß sein [Ges15, Seite 233]. Daraus lässt sich schließen, dass BLE einen weitaus geringeren Datendurchsatz als WLAN hat. Allerdings liefert BLE wiederum andere Vorteile. Auf diese wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Das Herzstück des BLE Protokollstacks bilden die beiden Profile Generic Access Profile (GAP) und Generic Attribute Profile (GATT). Diese befinden sich, wie in Abbildung 1 zu erkennen, im Host Bereich der Architektur. Die beiden Protokolle bilden die Schnittstelle zur tatsächlichen Anwendung, mit welcher der Nutzer interagiert. Das GAP ist dafür vorgesehen, sämtliche Parameter der Verbindung zwischen den Geräten zu verwalten. Vom Verbindungsaufbau bis hin zur Kommunikation werden sämtliche Funktionen von diesem Profil bereitgestellt und abgehandelt. Im Zuge der jeweiligen Konfiguration kann ein Gerät in BLE eine der folgenden vier Rollen annehmen:

- Broadcaster (Keine Verbindung)
- Observer (Keine Verbindung)
- Central (Verbindung)
- Peripheral (Verbindung)

In BLE ist es nicht festgeschrieben, dass Geräte eine Verbindung eingehen müssen, um Informationen zu erhalten. Die Rollen des Broadcasters und Observers sind sogar ausschließlich ohne feste Verbindung zwischen den Geräten vorgesehen. Diese Funktion wird im allgemeinen gerne von BLE Beacons verwendet.

Ein Gerät, welches als Broadcaster definiert ist, sendet dauerhaft einen bestimmten Datensatz. Dabei ist zu keinem Zeitpunkt klar, ob andere Vorrichtungen in Reichweite sind, welche den Datensatz empfangen. Ein Gerät, welches diese Daten lesen kann, muss als Observer konfiguriert sein. Ein solcher scannt die drei Advertisement Kanäle von BLE dauerhaft nach Broadcastnachrichten. Falls er eine erhält, liest er diese und verwendet sie anschließend. Wichtig ist hierbei, dass der Observer keine Antwort auf eine Nachricht sendet.

Sollte eine derartige Vorrichtung allerdings eine Verbindung eingehen, dann muss dieses als Central konfiguriert sein. Dies ist die gängigste Form der BLE Apparaturen. So ist beispielsweise jedes Smartphone in der Regel als Central konfiguriert und kann Verbindungen zu Peripherals wie zum Beispiel BLE Kopfhörern aufnehmen. Dabei ist ein Central in der Regel sogar in der Lage, mehrere Verbindungen zu selben Zeit einzugehen. Ein Peripheral wiederum ist das Gegenstück zum Central, welches seine Verbindungsbereitschaft an sämtliche Vorrichtungen in Reichweite signalisiert. Im Fall einer aktiven Verbindung übernimmt das Central die Steuerung des Gerätes unter Berücksichtigung des Funktionsumfangs des Peripherals [Usa17, Seite 34].

Das GAP ermöglicht es einer BLE Apparatur zusätzlich seine Sichtbarkeit und Verbindungsbereitschaft gegenüber anderen Geräten über die Advertisement Kanäle mitzuteilen. Dafür wird auf der Vorrichtung ein Modus eingestellt welcher anschließend an alle Geräte

in Reichweite mitgeteilt wird. Ein Modus ist dabei eng mit der Geräterolle verbunden. Ein Gerät kann folgende Modi annehmen [Tow14, Seite 35]:

- Broadcast (Rolle: Broadcaster)
- Nicht zu entdecken (Rolle: Peripheral)
- Eingeschränkt zu entdecken (Rolle: Peripheral)
- Normal zu entdecken (Rolle: Peripheral)
- Nicht verbindbar (Rolle: Alle)
- Verbindbar (Rolle: Central, Peripheral)

Im GATT wird definiert, ob es sich bei dem Gerät um einen Client oder Server handelt. Letzterer verarbeitet die Kommunikationsanfragen des Clients und liefert die gewünschten Antworten oder führt entsprechende Aktionen aus. Der Server ist in der Regel ein Peripheral, auf dem Services hinterlegt sind [Usa17, Seite 30]. Welche das sind und was für eine Aktion mit diesen verbunden ist, wird in der Regel durch die Nutzeranwendung festgelegt. Der Client ist dementsprechend ein Central, welches die gesamte Verbindung steuert. Jeder Service verfügt über einen Universally Unique Identifier. Mit diesem kann der Client eine gezielte Anfrage auf den entsprechenden Service tätigen.

An oberster Stelle des Protokollstacks befindet sich die Nutzeranwendung. Diese ist nach dem entsprechenden Use Case programmiert und variiert von Anwendung zu Anwendung. Ausschließlich der Stack unterhalb ist für alle Applikationen gleich.

3.2 Kommunikation

Nachdem in Kapitel 3.1 der Aufbau von BLE erläutert wurde, wird im folgenden Kapitel auf die Anwendung der Technologie eingegangen. Dabei soll besonders auf den Verbindungsaufbau durch das Advertisement und den Nachrichtenaustausch der stehenden Verbindung eingegangen werden.

Die Advertisement Funktion in BLE kann für zwei Szenarien verwendet werden. Zum einen die Signalisierung der Verbindungsbereitschaft. Zum anderen den Broadcast von Daten in der Rolle des Broadcasters (vgl. 3.1).

Von den 40 Kanälen, in die der BLE Frequenzbereich unterteilt ist (siehe Kapitel 3.1), sind drei für das Advertisement reserviert. Diese befinden sich in den Bereichen 2,402 - 2,404 GHz, 2,426 - 2,428 GHz und 2,48 - 2,482 GHz. Dabei sind sie mit den Nummern 37 - 39 belegt [Tow14, Seite 16].

Eine Advertisement Nachricht beinhaltet weiterhin ein Header Feld, welches die Paketadressierung regelt. So kann ein Gerät eine der folgenden vier Advertisement Nachrichten an Geräte in Sendereichweite senden [Tow14, Seite 22]:

- ADV_IND: Allgemeine Mitteilung der Verbindungsbereitschaft
- ADV_DIRECT_IND: Zielgerichtete Mitteilung der Verbindungsbereitschaft
- ADV_SCAN_IND: Allgemeine Mitteilung der Anwesenheit des Gerätes

- ADV_NONCONN_IND: Allgemeine Mitteilung der Verbindungsunverfügbarkeit

Eine Verbindung in BLE besteht aus einer Reihe sogenannter Verbindungsevents. Ein solches wird über drei Parameter definiert, welche in den anfänglichen Advertisement Nachrichten vereinbart werden. In Abbildung 2 ist der Ablauf einer BLE Verbindung in chronologischer Reihenfolge dargestellt.

Der erste Parameter ist das Verbindungsintervall. Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, ist eine Verbindung in derartige Verbindungsintervalle unterteilt. Diese legen die Zeit zwischen den Verbindungsereignissen fest. Dabei sind Werte zwischen 7,5 ms und 4 s möglich. Kürzere Intervalle bedeuten allerdings einen höheren Energieverbrauch. Ein Verbindungsereignis liegt im Intervall und kann somit maximal so lange wie dieses dauern. Die anderen beiden Parameter legen fest, wann eine Verbindung abbricht beziehungsweise beendet wird.

BLE ist in seiner Rolle als energiesparsames IoT Protokoll darum bemüht, die als Peripheral eingesetzten Server möglichst energieeffizient zu betreiben. Daher kann ein derartiges Gerät mehrere Verbindungsevents aussetzen, wenn derzeit keine Daten zu senden oder empfangen sind. Der Parameter „Slave Latency“ legt dabei die Anzahl der überspringbaren Ereignisse fest.

Den Zeitpunkt, ab welchem eine Verbindung für beendet erklärt wird, legt der Parameter „Connection Supervision Timeout“ fest. Dieser legt den Zeitraum fest, der zwischen dem Austausch zweier Datenpakete verstreichen darf. Bei Überschreitung dieses Wertes wird die Verbindung aufgelöst [Tow14, Seite 22f].

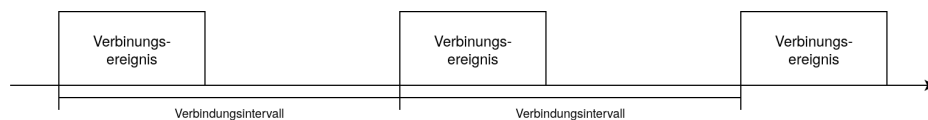


Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf einer BLE Verbindung [Tow14, Seite 22]

3.3 Anwendungsszenarien

Die Bluetooth Special Interest Group (SIG) stellt auf ihrer Website eine Vielzahl verschiedener Anwendungsmöglichkeiten für das Protokoll BLE vor. Dabei werden vier Hauptkategorien genannt, auf welche sich BLE konzentriert. Die im Alltag gebräuchlichsten sind dabei das Streamen von Audio und die Datenübertragung. Zusätzlich gibt es allerdings auch noch Positionsservices und das Aufspannen eines Netzwerkes zwischen mehreren BLE Geräten [BLU].

Seit einigen Jahren steigt die Anzahl der Endnutzer, die statt der herkömmlichen kabelgebundenen Kopfhörer auf die kabellose Alternative wechseln. Mit der Veröffentlichung des Bluetooth Standards 5.0 wurde dieser Use Case mit BLE enorm gefördert. Neben kabellosen Kopfhörern bilden auch Lautsprecher und Mediensysteme in Fahrzeugen interessante Use Cases seitens Bluetooth.

Die Möglichkeit der Datenübertragung ist die Basis des gesamten BLE Stacks. Neben

Audiodateien gibt es eine Vielzahl anderer Anwendungsfälle, wie beispielsweise kabellosen Tastaturen oder Mäuse. Auch neuere Technologien wie Fitnesstracker oder Smart Watches erfreuen sich in den letzten Jahren immer größerer Beliebtheit. So sind laut Heise Online die Umsatzzahlen im Verkauf von Smart Watches, im Vergleich zum Jahr 2019, dieses Jahr um 20 Prozent gestiegen [HEI]. BLE wird in diesem Fall verwendet, um die von den jeweiligen Peripherals erhobenen Fitness- oder Gesundheitsdaten an das Smartphone als Central Gerät zu übertragen.

Ein großes Problem der vergangenen Jahre war die Positionsbestimmung in geschlossenen Räumen. Im Freien ist diese durch Satellitenkommunikation möglich. In Gebäuden kann diese Technologie allerdings aufgrund zu großer Ungenauigkeiten und der fehlenden direkten Verbindung nicht gewährleistet werden. Für dieses Problem liefert BLE mithilfe der Broadcaster Rolle eine Lösung. Dafür gibt es ein breites Spektrum an Möglichkeiten. Dieses reicht von Indoor Navigation über die Positionsüberwachung von Gegenständen oder Personen bis hin zu Informationssystemen. Letztere stellen BLE Broadcaster dar, die bei Annäherung eines Observers nützliche Informationen senden. Dies kann beispielsweise in einem Museum sehr nützlich sein. Auch im Hinblick auf eine SAP Anbindung bietet die Indoor Positionsbestimmung mittels BLE eine praktische Lösung. Diese kann beispielsweise zur Überwachung von autonomen Fahrzeugen in der Fertigung genutzt werden.

Der vierte große Bereich, welchen die Bluetooth SIG besonders hervorhebt, behandelt die Vernetzung verschiedener BLE Geräte. Dieser Bereich ist vor allem im Hinblick an SAP besonders interessant, da er sich mit der Kontrolle, Überwachung und Automatisierung ganzer Systeme befasst. Die Bluetooth SIG verspricht unter anderem Lösungen zur Überwachung und Steuerung von Temperatur, Feuchtigkeit und Raumbelegungen in Gebäuden. Diese sollen das Ziel verfolgen, die Produktivität der Angestellten zu steigern.

4 Schnittstellenbeschreibung

Nachdem in Kapitel 3 auf die Funktionsweise von BLE eingegangen und die resultierenden Möglichkeiten erläutert wurden, wird in diesem Kapitel auf die Anbindung des Kommunikationsprotokolls an SAP eingegangen. Dabei liegen die Schwerpunkte auf Schnittstelle, Administration und daraus resultierenden Möglichkeiten für den Anwender.

4.1 Komponenten SAP Leonardo IoT

In Kapitel 2.2 wurde auf die Marke SAP Leonardo verwiesen, welche unter anderem eine IoT Schnittstelle liefert. Ein Überblick über diese Schnittstelle findet sich in Abbildung 3. Aus dieser geht hervor, dass sich die gesamte Anwendung in der SAP Cloud befindet. Den Kern bildet hier die Unterkategorie von SAP Leonardo mit dem Beinamen IoT. Dieser Teil enthält eine buchbare Grafische Benutzeroberfläche (GUI), die neben einer Administrationsoberfläche, auf die in Kapitel 4.2 näher eingegangen wird, Services für Datenverwaltung und IT Sicherheit liefert. Zusätzlich bietet SAP eine voll Funktionsfä-

hige Web integrierte Entwicklungsumgebung.

Die Datenverwaltung in SAP Leonardo IoT soll den Nutzer dabei unterstützen relevante Daten die von etwaigen IoT Geräten empfangen wurden gewinnbringend zu verwerten. Hierfür können Regeln und Aktionen definiert werden, wie die Daten behandelt werden sollen. Da auf verschiedenen Daten unterschiedlich schnell zugegriffen werden muss, bietet SAP auch hierfür verschieden Speicherbereiche an, welche sich entsprechend im Preis unterscheiden [Hol20, Seite 173]. Wenn ein sehr schneller Speicherzugriff notwendig ist, dann liefert die Hot Storage Funktion die benötigte Geschwindigkeit. Allerdings ist diese auch am teuersten. Weitere Speicherzugriffsvarianten die das SAP IoT Paket enthält sind der Warm und Cold Storage. Bei der Warm Storage Variante sind schnelle aber nicht so häufige Speicherzugriffe notwendig. Die Cold Storage Variante hingegen speichert Daten, die über lange Zeit nicht mehr benötigt werden. Entsprechend sind langsame Speichermedien vollkommen ausreichend. Diese Art des Speicherzugriffs nennt man auch Mutli Temperature Datenverwaltung [Hol20, Seite 118f]. Falls eine langfristige Speicherung oder eine Weiterverwendung der Daten benötigt werden, können SAP HANA oder Big Data Services gebucht werden, welche dies übernehmen [Hol20, Seite 173].

Um die Sicherheit der Anwendung zu gewährleisten, bietet die SAP Cloud Platform

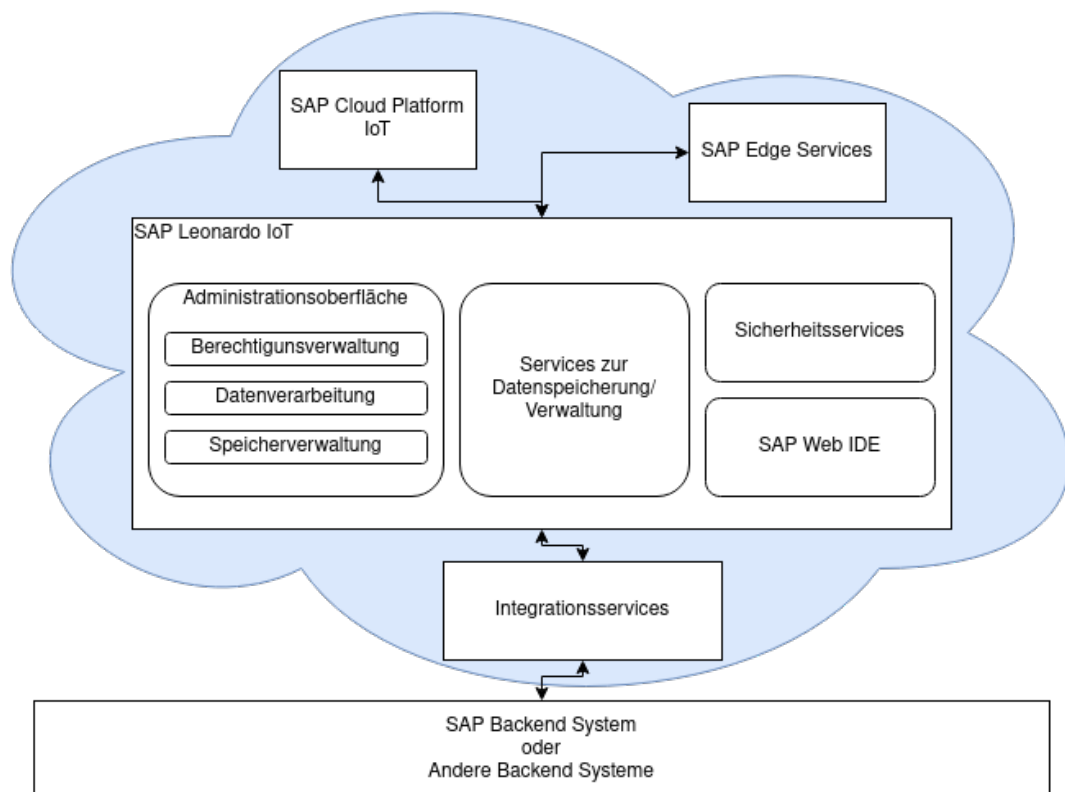


Abbildung 3: Überblick über die SAP IoT Architektur [Hol20, Seiten 117, 164, 181, 184, 201, 208, 221]

diverse Services zur Authentifizierung. In der Regel weist man dabei seine Identität über eine Drittanbieter Software aus. Darüber hinaus bietet die Anwendung SAP Cloud Platform Cockpit die Möglichkeit, Nutzern verschiedene Rollen zuzuweisen [Hol20, Seite 176ff].

Um die SAP Cloud mit einem Backend System zu verbinden, wird der SAP Cloud Platform Integration Service verwendet. Dabei ist zu beachten, das auch nicht SAP Systeme über diesen Service mit der Cloud kommunizieren können. Der Service ist mit dem SAP Cloud Paket buchbar [Hol20, Seite 146].

Um ein IoT Gerät mit SAP Leonardo IoT anzubinden gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen den Service SAP Cloud Platform IoT und zum anderen die Verwendung sogenannter Edge Services. Erster ist die Standardlösung, welche von SAP angeboten wird. Über diesen Service lassen sich angeschlossene Geräte unter dem Reiter Device Management verwalten und neue hinzufügen. Im Reiter Component Management wiederum kann der Gateway konfiguriert werden, über den die Kommunikation mit dem jeweiligen Gerät abgehandelt wird [Hol20, Seite 200f]. Hierbei gibt es folgende drei mögliche Gateways [Hol20, Seite 117]:

- Open Platform Communications (OPC)
- MQTT
- Hypertext Transfer Protocol (HTTP)

Über den Reiter Processing kann anschließend definiert werden, auf welche Weiße ankommende Daten von IoT Geräten verarbeitet werden. Zusätzlich können Daten sogar für einen Zeitraum X aufbewahrt werden [Hol20, Seite 205].

Sollte das IoT Gerät, welches an SAP angebunden werden soll, über keine Möglichkeit verfügen an einen der drei SAP Cloud Platform IoT Gateways angeschlossen zu werden, wird ein SAP Edge Service benötigt. Ein solcher kommt darüber hinaus zum Einsatz, wenn es nötig ist die Daten, welche das IoT Gerät ermittelt, möglichst schnell zu verwerten und auf diese zu reagieren. Dafür wird direkt am IoT Gerät ein Service installiert, welcher über Konfigurationsmöglichkeiten verfügt um entsprechende Regeln anzuwenden. Da die Latenz zur Cloud in diesem Fall viel zu hoch ist wird ein SAP Edge Service nicht an die SAP Cloud Platform IoT angebunden. Ein solcher Service verfügt selbst über eine Liste von Gateways um direkt mit dem IoT Gerät und SAP Leonardo IoT zu kommunizieren. Dabei erweitert SAP die Liste an Möglichen Gateways zu IoT Geräten um die Protokolle Sigfox, FILE, Modbus, Constrained Application Protocol (CoAP) und Simple Network Management Protocol (SNMP). Um auf bestimmte Szenarios reagieren zu können sind über einen SAP Edge Service folgende integrierte Services verfügbar [Hol20, Seite 229ff]:

- Essenzielle Business Funktionen: Synchronisation mit SAP Geschäftssystemen
- Streaming: Analyse und Verarbeiten der IoT Rohdaten
- Persistenz: Vorübergehende Speicherung von Daten auf dem SAP Edge Service
- Predictive Analytics: Analyse der Daten mittels künstlicher Intelligenz

4.2 Administration SAP Leonardo IoT

Der Administrationsbereich von SAP Leonardo IoT verfügt über einen Arbeitsbereich, welcher neben diversen Administrationsfunktionen zusätzlich Möglichkeiten zur Modellierung und Simulation in Form eines digitalen Zwillings der angeschlossenen IoT Systeme bietet. Zur Administration der Schnittstelle liefert die GUI folgende Möglichkeiten:

- Rollenverwaltung und Zuweisung
- Tenantverwaltung
- Paketverwaltung
- Definition von Regeln und Aktionen

Im Bereich „Trust Configurator“ lassen sich den jeweiligen Benutzern des Systems ihre Rollen zuweisen. Dies wird, abhängig von deren Identity Provider, über deren Email oder entsprechen andere Identifikatoren abgehandelt [Hol20, Seite 209f]. Um Zuweisungen vornehmen zu können, benötigt der Nutzer Administrationsrechte. Diese erhält er über einen bei der Buchung durch SAP ausgestellten Tenant. Dieser definiert die Rolle des Tenant Administrators und entspricht dem Systemadministrator. Er verfügt über folgende drei gesonderte Administrationsbereiche [Hol20, Seiten 220 - 221, 223]:

- Objektberechtigungen: Anlegen von Berechtigungen für Objekt- und Personen-
gruppen
- Personen: Anlegen und Unternehmenszuweisung von Personen
- Unternehmen: Anlegen von Unternehmen zur Personenzuweisung

Ein weiterer wichtiger Bereich der Administration ist die Definition von Regeln und Aktionen. Ein Beispiel für eine Regel wäre die Messung eines zu hohen Temperaturwertes mittels IoT Gerätes. Regeln dienen daher der Definition von Grenzwerten, welche bei Über- oder Unterschreitung eine Aktion erfordern. Um in SAP Leonardo IoT eine Regel einführen zu können, muss zunächst ein Kontext definiert werden. Dieser beschreibt die Eigenschaft des Gerätebereichs, für welche die Regel definiert ist. Im vorigen Beispiel wäre der Kontext die Temperaturmessungseinheit des Gerätes. In diesem Kontext lassen sich Regeln in einer der drei Kategorien Streaming Cloud, Streaming Hybrid, oder Eingeplant definieren. Streaming Cloud Regeln werden für Ereignisse definiert, welche bei Geräten auftreten, die über die SAP IoT Plattform angeschlossen sind. Streaming Hybrid Daten sind wiederum das Pendant für die Edge Services. Eingeplante Regeln prüfen in bestimmten Abständen oder zu selbst definierten Zeitpunkten, ob in den letzten X Minuten eine Regelverletzung erkannt wurde. Diese finden bei nichtkritischen Komponenten Verwendung. Für jede Regel lässt sich nun eine Aktion definieren, welche bei deren Verletzung ausgeführt wird. Sämtliche Einstellungen für Regeln und Aktionen finden sich unter dem Reiter „IoT-Regeln und Aktionen“ im Administrationspanel [Hol20, Seite 224ff].

4.3 Bluetooth Low Energy mit Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

Bei BLE handelt es sich um ein Protokoll, welches nicht über IP Adressen, also das Internet, kommuniziert. Da SAP Leonardo IoT jedoch eine Lösung in der SAP Cloud ist, wird eine Schnittstelle benötigt, um Daten zwischen Endgerät und Cloud zu transportieren. Zusätzlich verfügen die SAP IoT Lösungen über kein BLE Modul, welches direkt mit einem entsprechenden Endgerät kommunizieren kann. SAP verfügt allerdings sowohl in der SAP Cloud Platform IoT als auch in den SAP Edge Services über einen MQTT Gateway. Ein solcher ist in der Lage, Daten über einen sogenannten Publisher zu empfangen und dann über das Internet an die entsprechenden Stellen weiterzuleiten. In Abbildung 4 sind die verschiedenen Verbindungsabschnitte zwischen BLE und SAP dargestellt und in einen Zusammenhang gebracht. Die BLE Sensoren/Geräte nehmen entweder die Rolle eines Broadcasters oder Peripherals ein. Die Bedeutung dieser Rollen findet sich in Kapitel 3.2. Zum Empfangen von Nachrichten wird ein Gerät benötigt, welches über ein BLE Modul verfügt und entweder als Observer oder Central konfigurierbar ist. Dieses Gerät muss zusätzlich über eine Internetverbindung verfügen. Zur Anbindung an SAP wird auf dem Gerät eine Software installiert, welche MQTT unterstützt. Diese Software wird als Publisher konfiguriert. Dieser Publisher kann dann als solcher am SAP MQTT Broker angelegt werden. Auf der SAP Seite leitet der SAP MQTT Broker dann sämtliche an ihn veröffentlichten Daten an etwaige konfigurierte Stellen weiter. Diese Stellen werden im MQTT Kontext als Subscriber benannt.

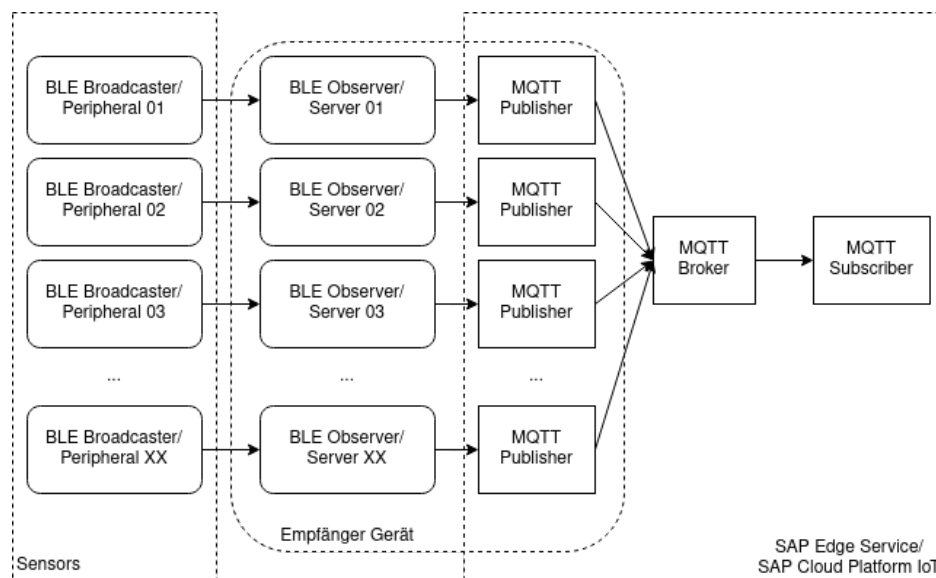


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen BLE, MQTT und SAP [Ziv21, Seite 3f] [Hol20, Seite 230f]

Das MQTT Protokoll besteht grundlegend aus folgenden drei Komponenten:

- Broker: Verwaltung von Publishern und Subscribern
- Publisher: Veröffentlichung von Daten am Broker
- Subscriber: Empfangen von Daten zu abonnierten Topics

Aus Abbildung 4 geht hervor, dass sämtliche Kommunikation zwischen dem Nachrichtenempfänger (Subscriber) und dem Sender (Publisher) über den Broker verlaufen. Eine Besonderheit bei MQTT ist, dass die Publisher und Subscriber nichts voneinander wissen. Dies liegt an der Topic Funktion von MQTT. Ein Topic beschreibt ein Thema, welches der Broker kennt. Der Publisher gibt an, dass er auf ein bestimmtes Thema Nachrichten sendet. Ein Subscriber wiederum abonniert ein Topic. Wenn nun ein Publisher eine Nachricht an dieses Topic veröffentlicht, benachrichtigt der Broker sämtliche Subscriber, dass eine Nachricht veröffentlicht wurde und übermittelt ihnen die veröffentlichte Nachricht. Dabei können auch mehrere Publisher auf ein Thema veröffentlichen und mehrere Subscriber ein Thema abonnieren.

Ein Thema im MQTT Kontext gliedert sich hierarchisch in einer Baumstruktur. Sollte beispielsweise ein BLE Sensor dafür verwendet werden, in einem Logistikzentrum die Position eines autonomen Transportfahrzeuges zu überwachen, dann könnte am Broker ein Topic mit der Hierarchie „lagerhalle/abschnitt_c/fahrzeug_12/position“ angelegt werden, auf welches der entsprechende Publisher veröffentlicht. Ein Subscriber wiederum wäre bemächtigt, mit dem Topic „lagerhalle/abschnitt_c/+ /position“ die Position aller registrierten Fahrzeuge in Abschnitt C der Lagerhalle zu abonnieren [MQT19].

Im konkreten Fall von BLE und SAP können die Topics über die GUI der SAP Cloud Platform IoT oder des SAP Edge Services konfiguriert werden. Die Nachrichten, welche veröffentlicht werden, enthalten die Payload im Json Format. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer Umwandlung der BLE Daten in das Json Format auf BLE Empfänger Seite. Diese muss durch das Empfängergerät vorgenommen werden, bevor die Daten an den Publisher weitergereicht werden. [Hol20, Seite 247].

5 Vergleich von Bluetooth Low Energy mit konkurrierenden Protokollen

Nach Erläuterung der technischen Rahmenbedingungen für die Anbindung von BLE Geräten an SAP im vorangehenden Kapitel und der Erklärung der klassischen Anwendungsgebiete in Kapitel 3.3, stellt sich nun die Frage was BLE von anderen IoT Protokollen unterscheidet und wie sich BLE im Vergleich zu diesen profilieren kann. Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, wird im folgenden Kapitel geklärt, welche IoT Kommunikationsprotokolle mit BLE konkurrieren und es werden Vor- und Nachteile gegeneinander abgewägt.

5.1 WLAN (IEEE 802.11b)

WLAN ist ein Kommunikationsprotokoll, welches wie BLE im lizenzfreien Frequenzbereich von 2,4 bis 5 GHz sendet, aber eine viel höhere Datenrate und Reichweite bietet. Deshalb ist WLAN aktuell das Protokoll mit den meisten Nutzgeräten weltweit [Ges15, Seite 193f]. Dabei gehört es allerdings nicht zur Gruppe der klassischen IoT Kommunikationsprotokolle, da sämtliche Kommunikation über einen Router läuft, welcher die Geräte miteinander verbindet.

Die hohe Datenrate und Reichweite von WLAN resultiert in einem sehr hohen Energieverbrauch. Ein BLE Gerät kann hingegen bereits mit geringen Stromquellen versorgt werden. Des Weiteren sind die Kosten für BLE Chip Lösungen viel geringer und können einem Unternehmen in hoher Stückzahl viel Geld einsparen. Im Gegensatz zu WLAN ist BLE ausschließlich im Ad-Hoc Modus verfügbar. Dies ermöglicht die Aufspannung eines dezentralen Funkbetriebes und einer daraus resultierend geringeren Infrastruktur und wiederum eingesparten Kosten in Installation und Instandhaltung [Ges15, Seite 206].

WLAN bietet zwar auch die Möglichkeit eines Ad-Hoc Modus. Dies bringt allerdings eine aufwändigere Konfiguration mit sich, da jede IP Adresse manuell zugewiesen werden muss. Zusätzlich ist dieser Ad-Hoc Modus ausschließlich ohne Zugriff auf das Internet verfügbar und benötigt auf Grund der WLAN spezifischen Paketgröße dennoch mehr Energie als BLE. Der WLAN Ad-Hoc Modus bietet deshalb allerdings auch die Möglichkeit einer höheren Datenrate. Um den hohen Stromverbrauch einzuschränken, verfügt WLAN über diverse Stromsparfunktionen. Dafür werden einerseits eingeholte Informationen gecached um unnötigen Datenaustausch zu vermeiden. Andererseits werden die Abstände zwischen dem Senden bestimmter Signale verlängert [Ges15, Seite 240ff].

Beide Protokolle arbeiten auf dem selben Frequenzband und sind primär für den Nachrichtenaustausch zwischen zwei Geräten gedacht. Für den Einsatz von WLAN sprechen Datenrate, Reichweite und Zugriff auf das Internet. Nachteil davon ist jedoch die Notwendigkeit einer Infrastruktur und der hohe Energieverbrauch. BLE kommt hingegen ohne Infrastruktur aus und kann über die Konfiguration verschiedener Rollen selbstständig ein Ad-Hoc Netzwerk aufspannen. Sollten anhand dieser Punkte noch keine eindeutige Entscheidung zwischen den Protokollen gefällt werden können, sollten die geringeren Kosten für BLE Geräte in Betracht gezogen werden [Ges15, Seite 271].

5.2 ZigBee (IEEE 802.15.4)

ZigBee ist ein Funkprotokoll, welches eine günstige, ausfallsichere und energiesparsame Vernetzung von IoT Geräten ermöglicht. Im Kontext mit SAP besonders interessant sind die Anwendungsgebiete in Medizin-, Gebäude-, und Industrie-Automatisierung. Es basiert auf dem IEEE 802.15.4 Standard [Ges15, Seite 195].

ZigBee legt den Hauptaugenmerk auf die Fernsteuerung von einfachen Gebäudeausstattungsgeräten wie beispielsweise Lampen, Lichtschaltern und Heizungen. Das Protokoll sendet Nachrichten aus Energiegründen nur über kurze Distanzen zu benachbarten ZigBee Geräten. Eine hohe Reichweite erreicht das Protokoll durch die Vernetzung der verfügbaren Geräte. Um ein Netz aufzuspannen, werden alle Geräte an einem Gateway

bekannt gemacht. Dieser wird als Koordinator bezeichnet. Neben diesem beinhaltet ein ZigBee Netzwerk Router und Endknoten. Ein Router gibt dabei alle Nachrichten, welche nicht an ihn adressiert sind, an den nächsten Knoten weiter. Sollte ein Gerät ausfallen oder entfernt werden, wird dies erkannt und eine neue Route zu den verlorenen Geräten wird eingerichtet [ZIG].

Die zugrundeliegende IEEE 802.15.4 Standard benötigt im Vergleich zu BLE beinahe die doppelte Energie um ein Paket zu übertragen [Faf16, Seite 4]. Diesen höheren Energieverbrauch bekommt ZigBee allerdings durch die kurzen Sendedistanzen zwischen den einzelnen Geräten des Netzwerkes und dem Senden kleiner Datenpakete unter Kontrolle. Dadurch kann ein ZigBee Gerät trotz des vergleichbar hohen Energieverbrauchs von IEEE 802.15.4 im Hibernation Mode des ZigBee Protokollstacks bis zu mehrere Jahre aktiv sein [Ges15, Seite 267].

Die Mobilität des ZigBee Protokolls ist durch die Gateway Instanz in Form des Koordinators eingeschränkt. Im Kontext mit SAP fällt dieser allerdings nicht schwer ins Gewicht, da auch für BLE ein Gateway für MQTT eingerichtet werden muss. Dennoch verfügt ZigBee über keinen Ad-Hoc Modus wie ihn BLE in vollem Umfang einsetzt. Im Bezug auf Signalstörungen der beiden Protokolle über mehrere Räume hinweg sind ist die Stabilität der Übertragungen beinahe identisch [Faf16, Seite 6].

ZigBee ist somit ein Protokoll, welches eine gute Alternative zu BLE bietet. Allerdings muss die geringe Datenrate des Protokolls in den Auswahlprozess eingebunden werden. ZigBee eignet sich hervorragend, um knappe Befehle an verteilte Systeme zu übertragen. Sollte jedoch eine aufwändigere Kommunikation benötigt werden, stößt ZigBee schnell an seine Grenzen. Somit ist BLE das funktional umfangreichere Protokoll, muss sich allerdings im Steuerungsbereich von einfachen Geräten geschlagen geben.

6 Zusammenfassung

Seit SAP im Jahr 2018 die Firmenstrategie um das „intelligente Unternehmen“ erweitert hat, bieten sich Firmen, welche SAP im Einsatz haben, eine Vielzahl neuer Möglichkeiten. Besonders Firmen in den Bereichen Logistik und Fertigung erhalten seitdem die Möglichkeit elektrische Kleingeräte aus dem IoT Sektor zur Überwachung oder Automatisierung in die Unternehmensprozesse zu integrieren. Das Unternehmen SAP hat mit der Integration einer IoT Schnittstelle auf den stetig steigenden Einsatz solcher Geräte in der Industrie reagiert.

Das IoT Kommunikationsprotokoll BLE hat sich seit der Frühphase der IoT Protokolle zu einem soliden Allrounder entwickelt, welcher nicht nur über die klassischen Bluetooth Funktionen der festen Verbindung und dessen Datenaustausch verfügt. Ferner kann ein BLE Gerät auch als Broadcaster definiert werden und ermöglicht somit Funktionen wie Indoor Positionsbestimmung. Doch auch der Datenaustausch mit BLE lässt einen soliden Durchsatz zu, welcher in der Lage ist, Audiodateien wiederzugeben. Dabei sind Geräte, welche BLE verwenden, nicht an Infrastruktur gebunden, sondern spannen ihr eigenes Netzwerk auf.

Die Schnittstelle, welche SAP zur Anbindung von IoT Geräten bereitstellt, läuft unter

dem Namen SAP Leonardo IoT in der SAP Cloud. Dies erfordert einen Gateway für die IoT Geräte, um deren Nachrichten in ein IP Format zu übertragen und in die Cloud zu senden. SAP bietet zu diesem Zweck zwei Möglichkeiten des Anschlusses. Zum einen die SAP Platform IoT, welche selbst in der Cloud liegt und die Anbindung über eine Reihe von Gateways wie beispielsweise MQTT unterstützt. Diese Lösung bietet sich bei IoT Geräten an, welche keine zeitrelevanten Daten versenden. Sollte das der Fall sein, kann ein Edge Service auf dem IoT Gerät installiert werden, welche direkt auf Ereignisse reagiert und erst in nächster Instanz Daten an die Cloud sendet. Ein BLE Gerät lässt sich mithilfe des MQTT Gateways, welchen beide Optionen anbieten, an SAP anbinden. Ein IoT Gerät kann zu verschiedensten Zwecken in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Dabei ist eine dauerhafte Stromquelle nicht immer verfügbar. Daraus resultierend sollte ein Protokoll einen möglichst geringen Stromverbrauch aufweisen. Dennoch sollte es je nach Anwendungsfall in der Lage sein, auch größere Datenmengen zu verarbeiten. BLE vereint diese Kriterien. Dabei benötigt es beispielsweise bedeutend weniger Energie als WLAN und läuft darüber hinaus in einem Ad-Hoc Modus. Ein System, welches jedoch über einen langen Zeitraum ohne Stromquelle betrieben werden muss, sollte dennoch auf Protokolle wie ZigBee zurückgreifen.

Aus all diesen Gründen ist es daher durchaus sinnvoll, in bestimmten Industriezweigen auf den Einsatz von IoT Geräten zurückzugreifen. Besonders wenn bereits ein SAP System im Einsatz ist, bietet es sich zusätzlich an, dieses als zentrales Steuerungs- und Datenbanksystem zu erweitern. Da BLE Geräte sowohl weit verbreitet als auch ein günstiges und funktionsreiches Angebot für viele Anwendungsfälle bieten, ist es in Zusammenhang mit SAP auch eine solide Kombination, welche ein großes Spektrum an Einsatzvarianten ermöglicht.

Literatur

- [BLU] Learn About Bluetooth Solutions. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf>. Last visit: 26 Okt 2020.
- [Faf16] X. Fafoutis, E. Tsimbalo, W. Zhao, H. Chen, E. Mellios, W. Harwin, R. Piechocki und I. Craddock. BLE or IEEE 802.15.4: Which Home IoT Communication Solution is more Energy-Efficient? *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2(5), 12 2016.
- [Ges15] R. Gessler und T. Krause. Wireless-Netzwerke fuer den Nahbereich. In *Eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren*, Bd. 2, S. 193 – 195, 206, 233, 240 – 242, 267, 271. Springer Vieweg, Kuenzelsau (Deutschland), Widdern (Deutschland), 2015.
- [Gup] S. Gupta und R. Kumar. BLE v4.2: Creating Faster, More Secure, Power-Efficient Designs - Part 1. <https://www.electronicdesign.com/communications/ble-v42-creating-faster-more-secure-power-efficient-designs-part-1>. Last visit: 15 Okt 2020.
- [HEI] Smartwatches: Apple dominiert, Huawei und Garmin stark . <https://www.heise.de/news/Smartwatches-Apple-dominiert-Huawei-und-Garmin-stark-4876304.html>. Last visit: 26 Okt 2020.
- [Hol20] A. Holtschulte, M. Mohr und M. Stollberg. Architektur, Loesungen, Anwendungsszenarien. In *IoT mit SAP*, Bd. 1, S. 33, 37, 102 – 103, 105 – 109, 117 – 119, 146, 164, 173, 176 – 178, 181, 184, 200 – 201, 205, 208 – 210, 220 – 221, 223 – 227, 229 – 233, 247, 449. Rheinwerk Verlag GmbH, Bonn (Deutschland), 2020.
- [MQT19] MQTT Version 5.0 OASIS Standard. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/solutions/>, 2019. Last visit: 13 Nov 2020.
- [SAP] Company Information. <https://www.sap.com/corporate/en/company.html>. Last visit: 27 Okt 2020.
- [Sch17] O. Schell, V. Schmid-Lutz, K. Schocke, V. Stockrahm und J. Zinovieva. In *Industrie 4.0 mit SAP*, Bd. 1, S. 30 – 31. Rheinwerk Verlag GmbH, Bonn (Deutschland), 2017.
- [Tan14] A. Tanenbaum und D. Wetherall. In *Computer Networks*, Bd. 5, S. 194. Pearson, Harlow (Vereinigtes Koenigreich), 2014.
- [Tow14] K. Townsend, C. Cufi, Akiba und R. Davidson. Tools and techniques for lowpower networking. In *Getting Started with Bluetooth Low Energy*, S. 16 – 18, 22– 23, 35. O’Reilly Media Inc., Sebastopol (Vereinigte Staaten von Amerika), 2014.

- [Usa17] M. Usama und B. Aftab. Take your first steps in IoT. In *Building Bluetooth Low Energy Systems*, S. 30, 34. Packt, Birmingham (Vereinigtes Koenigreich), Mumbai (Indien), 2017.
- [ZIG] Zigbee - The full-stack solution interlacing all your smart devices. <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>. Last visit: 19 Nov 2020.
- [Ziv21] C. Zivkovic, Y. Guan und C. Grimm. With Hands-on Examples Based on the VICINITY Platform. In *IoT Platforms, Use Cases, Privacy, and Business Models*, Bd. 1, S. 3 – 4. Springer Nature Switzerland AG, Kaiserslautern (Deutschland), Aalborg (Daenemark), 2021.