

# Trends im Umfeld von ‚Smart Buildings‘ sowie Eignungsvergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

---

Version 02, 12. April 2021  
Prof. Dr. Michael Krödel

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Anwendungsfälle (use cases) in modernen Gebäuden</b> .....	<b>6</b>
2.1 Klassische Automation .....	7
2.1.1 Raumautomation .....	7
2.1.2 Anlagenautomation .....	8
2.2 Weitere Mehrwertdienste im Smart Building .....	9
<b>3 Anforderungen an funkbasierte Übertragungsprotokolle</b> .....	<b>11</b>
3.1 Anforderungen aufgrund der für die Anwendungsfälle erforderlichen Sensoren .....	11
3.2 Entscheidungskriterien für die Eignungsbeurteilung .....	13
<b>4 Übersicht über verfügbare, funkbasierte Protokolle</b> .....	<b>18</b>
4.1 Frequenzbänder .....	18
4.2 Übersicht möglicher Übertragungsprotokolle .....	19
4.2.1 5G .....	20
4.2.2 Bluetooth / BLE (Bluetooth Low Energy) .....	21
4.2.3 EnOcean .....	22
4.2.4 KNX RF .....	23
4.2.5 LoRa .....	24
4.2.6 NB-IoT .....	26
4.2.7 Sigfox .....	27
4.2.8 Thread .....	28
4.2.9 WLAN .....	29
4.2.10 ZigBee / ZGP (ZigBee Green Power) .....	30
4.2.11 Z-Wave .....	31
<b>5 Eignungsvergleich der funkbasierten Übertragungsprotokolle</b> .....	<b>32</b>
5.1 Protokoll-Steckbriefe .....	32
5.2 Ergebnisübersicht .....	44
<b>6 Fazit</b> .....	<b>45</b>
<b>7 Quellen</b> .....	<b>46</b>

## 1 Einleitung

*Der Grad an Automation in Gebäuden nimmt stetig zu. Dabei verlagert sich ein Teil der Intelligenz in übergeordnete IT-basierte Systeme, die im Vergleich zur bisherigen Raum- und Anlagenautomation neuartige Mehrwertdienste ermöglichen. Diese wiederum sind auf möglichst viele Daten aus dem Gebäude angewiesen, welche sich besonders einfach über funkbasierte Übertragungsprotokolle bereitstellen lassen.*

Die zunehmende Verbreitung von Gebäudeautomation wird durch zwei Trends begünstigt. Einerseits verbreitet sich im privaten Bereich das „Smart Home“ und erzeugt eine entsprechende Erwartungshaltung in Nichtwohngebäuden, wie z.B. Büros bzw. Verwaltungsgebäuden.

Andererseits steigt die Erkenntnis, dass bei höherer Transparenz bezüglich konkreter Nutzung Gebäude effizienter betrieben werden können. Zum einen lassen sich Gebäude energieeffizienter betreiben und entsprechende Investitionen amortisieren sich innerhalb weniger Jahre [Becker 2007]. Zum anderen gilt es, existente Flächen möglichst optimal auszulasten. Dies gilt sowohl für Wechselarbeitsplätze in Großraumbüros, Besprechungsräume als auch z.B. für Verkaufsflächen. Dabei dürfen die Flächen nicht übermäßig ausgelastet werden, da dies ansonsten zur Verärgerung bei Mitarbeitern bzw. Kunden führt. Letztlich gewinnt ein weiterer Aspekt an Bedeutung: **Mehrwertdienste** zur Erhöhung der Attraktivität des Arbeitsplatzes bzw. Produktivität der Mitarbeiter.

Aus diesen Gründen schreitet der Wechsel von klassischen Gebäuden hin zu „Smart Buildings“ zunehmend voran. Dabei muss man zunächst in die klassische **Raum- und Anlagenautomation** einerseits und in echte **Mehrwertdienste** intelligenter Gebäude andererseits unterscheiden.

Die klassische **Raum- und Anlagenautomation** ermöglicht die raumseitige Betriebsoptimierung von Beleuchtung, Verschattung und Lüftung sowie den bedarfsoptimierten Betrieb der entsprechenden Anlagentechnik. So wichtig dieser erste Schritt an Automation auch ist, so ist dieser doch relativ „unintelligent“. Bei der Programmierung werden meist einfache Regeln hinterlegt, um eine Inbetriebnahme zügig durchführen zu können und die Anforderungen an die spätere Betreuung möglichst einfach zu halten. Auch ist es so, dass ein komplexeres, adaptives oder gar lernendes Verhalten durch die üblichen Technologien nicht bzw. kaum unterstützt wird. Bei den sogenannten Bus-Systemen ergibt sich das Gesamtverhalten aus der Kombination von Geräteparametern sowie funktionalen Verknüpfungen zwischen Sensoren und Aktoren. Das ist vermeintlich einfach umzusetzen, ermöglicht aber keine echte Gebäudeintelligenz. Bei höherem funktionalem Anspruch sind Controller (auch als Server oder DDC<sup>1</sup> bezeichnet) erforderlich, die entsprechend programmiert werden. Auch wenn die Art der Programmierung in der Gebäudeautomation nicht verbindlich festgeschrieben ist, so orientieren sich die meisten Hersteller an der Norm IEC 61131 - einer Norm zur Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen, die insbesondere in der Prozessautomation verwendet wird. Die dort aufgeführten Programmiervarianten erlauben eine freie, kreative Programmierung, aber bei (zu) komplexen Anforderungen wird die Programmierung sehr schnell unübersichtlich und ist somit für eine Nachbetreuung ungeeignet. Im besten Fall hat man sich für einen Hersteller mit sehr funktionalen

---

<sup>1</sup> Direct Digital Control

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

Programm-Bibliotheken entschieden, aber ist damit an den Hersteller gebunden und von dessen Weiterentwicklung der Bibliotheken abhängig.

Abbildung 1 zeigt die übliche Struktur der Gebäudeautomation mit drei Ebenen. In dieser Abbildung ist bereits zu sehen, dass ein Teil der „Intelligenz“ von den Bus-Systemen (Feldebene) bzw. den Controllern (Automationsebene) in die Management-Ebene verlagert wird. In dieser Ebene ist klassischerweise die GLT (Gebäude-Leittechnik) zu finden, die zur Überwachung der Gesamtanlage, Optimierung oder Steuerung von Betriebsabläufen sowie allgemeiner Visualisierung zuständig ist. Diese ist gemäß ihrer Historie nicht dafür geeignet, die anstehenden Steuerungsaufgaben zu übernehmen und somit bilden sich derzeit am Markt neue Systeme – hier als BMS (Building Management System) bezeichnet. Im Vergleich zu klassischen GLT-Systemen erlauben BMS-Systeme die beliebige Programmierung von Gebäudeintelligenz mit modernen IT-Sprachen bzw. -Werkzeugen, beliebige Kopplungen mit anderen IT-Systemen wie Raumbuchungssystemen oder Datenbanken, Visualisierungen auch für „normale“ Nutzer und nicht nur Facility-Manager, standortbezogene Dienste wie z.B. Indoor-Navigation etc. Auch die intelligente Auswertung von Sensordaten ist ein weiteres Merkmal von BMS-Systemen. So bieten einige BMS-Systeme bereits verfügbare Werkzeuge der KI (Künstlichen Intelligenz). Dabei besteht schon heute die Wahl zwischen Cloud-basierten Systemen oder Software zur Installation im eigenen Rechenzentrum.

Ein Großteil der Anforderungen, wie sie später in Kapitel 3 vorgestellt werden, lassen sich nur oder zumindest deutlich besser über IT-basierte BMS-Systeme umsetzen!

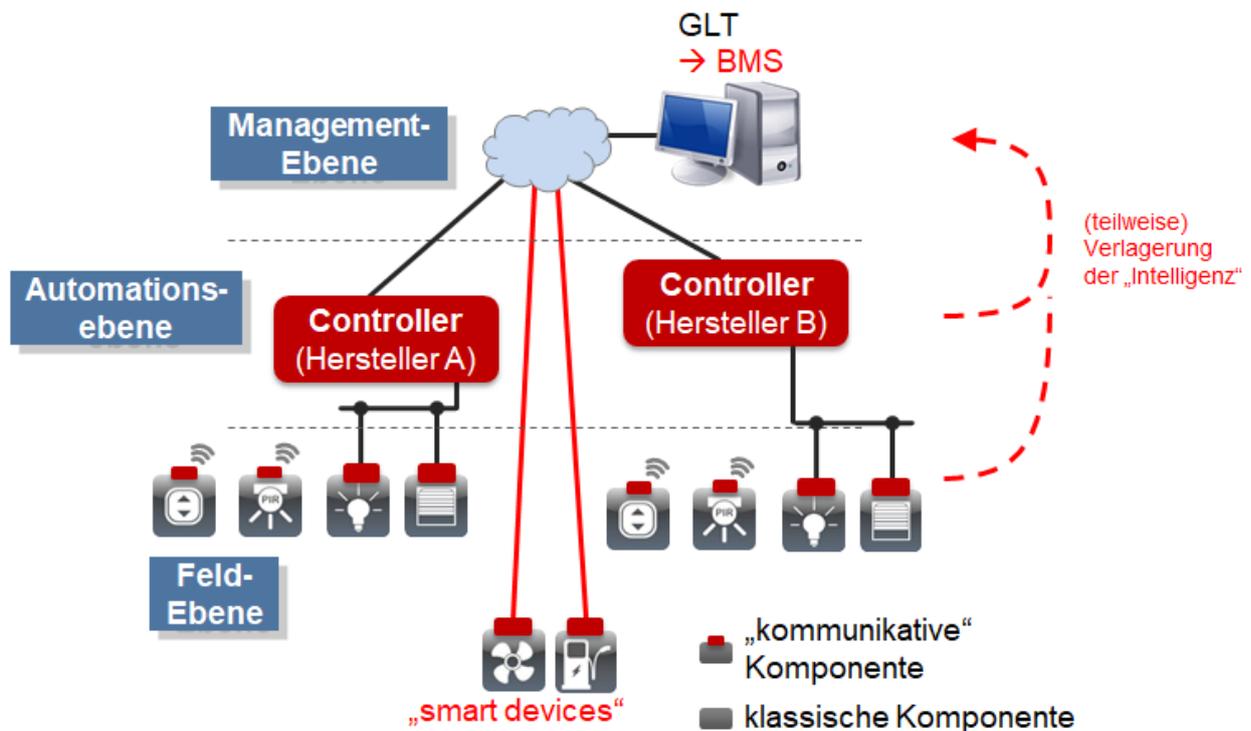


Abbildung 1: Ebenen der Gebäudeautomation inklusive Verlagerung der „Intelligenz“

Im Umkehrschluss lassen sich mit einem BMS völlig neue **Mehrwertdienste** umsetzen. Einen besonderen Fokus gewinnen alle Aspekte hinsichtlich der Auswertung von Sensordaten und somit ist es erforderlich bzw. sinnvoll, deutlich mehr Sensorinformationen einzubinden, als das aktuell üblich ist.

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

---

Eines der Kernelemente eines echten Smart Building ist die Anforderung der kostengünstigen Einbindung von Sensoren. Parallel zur klassischen kabelbasierten Anbindung steht eine ganze Reihe von funkbasierten Übertragungsprotokollen zur Verfügung. Diese haben den Vorteil, dass diese einfach installiert/nachgerüstet werden können und zudem ortsflexibel/-unabhängig sind. In Bezug auf funkbasierte Übertragung wird immer wieder die Befürchtung geäußert, dass die elektromagnetische Belastung („Elektrosmog“) deutlich zunimmt. Das ist aber nicht der Fall. Funkbasierte Übertragungsprotokolle für Sensoren senden nur wenige Informationen und auch immer nur dann, wenn etwas zu übertragen ist. Zudem besteht zu den entsprechenden Komponenten wie Taster, Präsenzmelder, Fensterkontakt etc. ein deutlicher Abstand. Somit kann die elektromagnetische Belastung funkbasierter Sensoren im Vergleich zu Dauerstrahlern wie Handy, Bluetooth-Headset, WLAN-Access Point und Netzteile vernachlässigt werden.

Die kabelbasierte Anbindung hat ihre Berechtigung und wird nicht komplett verdrängt werden; parallel dazu gewinnt die Integration von funkbasierten Komponenten an Bedeutung. Insbesondere dort, wo Komponenten sich z.B. in Möbeln oder ortsveränderlichen Objekten befinden, ist eine andersartige Anbindung gar nicht möglich. Somit zeichnet sich deutlich ab, dass in modernen Gebäuden auch funkbasierte Übertragungsprotokolle eingesetzt werden – insbesondere in Bezug auf die Integration von Sensoren.

Dieses Dokument befasst sich im weiteren Verlauf mit einem Überblick über mögliche funkbasierte Übertragungsprotokolle in modernen Gebäuden. Im Kapitel 2 werden zunächst mögliche Anwendungsfälle (use cases) moderner Gebäude beschrieben. Im Kapitel 3 werden diese in Anforderungen an funkbasierte Übertragungsprotokolle überführt. Die üblichen, derzeit am Markt verfügbaren Protokolle werden in Kapitel 4 beschrieben, um diese im folgenden Kapitel 5 mit den Anforderungen zu vergleichen und abzuleiten, für welche Anwendungsbereiche welche funkbasierten Protokolle zum Einsatz kommen können bzw. sollten.

## 2 Anwendungsfälle (use cases) in modernen Gebäuden

*Nur mit Gebäudeautomation lassen sich Gebäude bedarfsorientiert betreiben und tragen wesentlich zur übergeordneten Energieeffizienz bei. Im Detail unterscheidet man Aspekte der Raum- und der Anlagenautomation. Übergeordnet entwickeln sich derzeit „Smart Building“ Mehrwertdienste. Diese Dienste verfolgen nicht nur die weitere Auswertung von Sensordaten hinsichtlich zusätzlicher Energieeffizienz und Optimierung der Flächennutzung, sondern tragen auch zur Steigerung der Attraktivität des Arbeitsplatzes sowie der Produktivität der Mitarbeiter bei. Auf Basis der Anwendungsfälle kann direkt auf die erforderlichen Sensoren übergeleitet werden – diese Überleitung ist für den späteren Verlauf wichtig, um von den Anforderungen an die Sensoren auf die Eignung des Übertragungsprotokolls zu schließen.*

Um in späteren Kapiteln die funkbasierten Übertragungsprotokolle miteinander vergleichen zu können, muss aufgeführt werden, welche Anwendungsfälle (use cases) ermöglicht werden sollen. Denn erst, wenn man festlegt, was zu automatisieren ist, kann bewertet werden, wie angemessen oder nicht die möglichen Protokolle sind. Dabei werden im Folgenden die Anforderungen der klassischen Raum- und Anlagenautomation einerseits und die von modernen „Smart Buildings“ andererseits aufgeführt.

In den folgenden Tabellen wird in einer weiteren Spalte die Art der Sensoren aufgeführt, die zur Umsetzung des Anwendungsfalls erforderlich sind.

Erforderliche Aktoren werden nicht aufgeführt, weil diese bei Nutzung eines funkbasierten Protokolls geringere Anforderungen an das Übertragungsprotokoll stellen. Auch ist es möglich, dass die Anbindung der Aktorik kabelgebunden durchgeführt wird, da die meisten Aktoren an eine kabelgebundene Spannungsversorgung angeschlossen werden müssen.

## 2.1 Klassische Automation

Im Bereich der klassischen Automation sind im Folgenden die wesentlichen Anwendungsfälle aufgeführt. Die Anwendungsfälle orientieren sich bei der Raumautomation am Fragebogen „Planungsprozess für Smart Home & Smart Office“ [IGT 2015] und bei der Anlagenautomation an der DIN EN 15232 [EN15232 2017].

### 2.1.1 Raumautomation

Anwendungsfall	Erforderliche Sensorik
Die Raumtemperatur wird raumindividuell unter Berücksichtigung von Präsenz sowie Fensterzuständen geregelt.	Raumtemperatursensoren bzw. Raumtemperaturregler, Präsenzmelder, Fensterkontakte, Drehgriffsensoren
Die Lüftung und Kühlung wird raumindividuell unter Berücksichtigung von Lufttemperatur, Luftqualität (CO <sub>2</sub> und/oder VOC) und Luftfeuchte geregelt. Gegebenenfalls wird auch Präsenz bzw. der Zustand der Fenster berücksichtigt.	Raumtemperatursensor, Luftqualitätssensor, Luftfeuchtesensor, Präsenzmelder, Fensterkontakte, Drehgriffsensoren
Die Beleuchtung wird raumindividuell gedimmt. Taster zur Bedienung steuern je nach Bedarf einzelne Leuchten oder komplette Lichtszenen für mehrere Leuchten. Zusätzlich kann für die Beleuchtungsstärke die Präsenz bzw. die vorhandene Tageslichthelligkeit berücksichtigt werden.	Taster, Helligkeitssensoren, Präsenzmelder
Jalousien/Rollläden von Terrassen- oder Balkontüren fahren nicht, solange die jeweilige Tür nicht ordnungsgemäß verschlossen ist (Ausperrschutz).	Taster, Drehgriffsensoren, (Fensterkontakte)
Die Rollläden/Jalousien fahren in Abhängigkeit der Raumtemperatur (sommerlicher Wärmeschutz). Dabei kann das bei Präsenz von Personen gesperrt werden.	Temperatursensoren, Präsenzmelder
Jalousien und Markisen werden im Falle von Sturm oder starkem Wind ein-/hochgefahren.	Wetterstation (Windsensor)
Fenster und Türen werden in Bezug auf Einbruch/unbefugtem Zutritt überwacht. Ebenso können Bewegungen im Außenbereich erfasst werden und zur Beleuchtung/Alarmierung führen.	Fensterkontakte, Außen-Bewegungsmelder
Die Position von Tastern für die Beleuchtung und Verschattung ist ortsveränderlich, um diese bei Veränderungen von z.B. Trennwänden oder Möbeln entsprechend anpassen zu können. Zudem sind einige Taster auch als Handsender verfügbar.	Taster, Handsender
Der Energiebedarf von einzelnen Verbrauchern (d.h. nicht nur des kompletten Stromkreises) wird erfasst.	Stromzähler

Tabelle 1: Anwendungsfälle im Bereich der Raumautomation

## 2.1.2 Anlagenautomation

Anwendungsfall	Erforderliche Sensorik
Die Raumtemperaturregelung bei sowohl Heizung als auch Kühlung erfolgt präsenzabhängig und raumindividuell.	Raumtemperatursensor bzw. Raumtemperaturregler, Präsenzmelder
Die Wärmeversorgung der Heizkreise bzw. Kälteversorgung der Kältekreise erfolgt bedarfsabhängig und unter Berücksichtigung zukünftiger Lasten (inklusive Aspekte für Vorlauftemperaturen und Drehzahlregelungen der Pumpen).	Temperatursensoren, Drucksensoren
Bei mehreren Wärme- bzw. Kälteerzeugern werden diese gemäß einer lastorientierten Prioritätensteuerung betrieben.	- (keine besondere Sensorik erforderlich)
Heizungs- und Kälteanlagen werden gegenseitig verriegelt (Vermeidung eines gleichzeitigen Betriebs).	- (keine besondere Sensorik erforderlich)
Die Lüftung wird bedarfsgeführt betrieben (basierend auf Luftqualität und Luftfeuchte).	Luftqualitätssensor, Luftfeuchtesensor,
In Bezug auf die Wärmerückgewinnung bei Lüftungsanlagen werden Vereisungen und Überhitzungen erkannt bzw. vermieden.	Drucksensoren, Temperatursensoren
Fehlermeldungen, Betriebsstunden und Energieverbräuche werden protokolliert und ausgewertet.	Diverse Analog-/ Binäreingangssensoren, Strom- und Wasserzähler
Im Falle von aufgeheizten Gebäuden im Sommer und nächtlicher kühler Außenluft wird eine Nachlüftung zur günstigen Gebäudekühlung verwendet.	Raumtemperatursensor, Außentemperatursensor (bzw. Wetterstation)

Tabelle 2: Anwendungsfälle im Bereich der Anlagenautomation

## 2.2 Weitere Mehrwertdienste im Smart Building

Wie zuvor erwähnt, entwickeln sich derzeit Anwendungsfälle, die deutlich über die bisher üblichen Anwendungen der Raum- und Anlagenautomation hinausgehen. Dies ist möglich, da die Verarbeitung der Sensorinformationen über IT-basierte BMS-Systeme erfolgt. Der Nutzen der entsprechenden Dienste gliedert sich in unterschiedliche Bereiche. Zum einen lassen sich Gebäude energieeffizienter betreiben und eine Investition amortisiert sich meist innerhalb von wenigen Jahren. Zum anderen stellen die Anwendungsfälle einen Mehrwert in Bezug auf die Attraktivität des Arbeitsplatzes dar und sind somit ein wichtiger Aspekt bei der Mitarbeitergewinnung bzw. –bindung. Aber auch beim existenten Personalbestand können diese Anwendungsfälle zu einer höheren Mitarbeiterproduktivität führen – ein Aspekt der monetär schwer zu bewerten ist, aber schnell eine höhere finanzielle Auswirkung als die des energetischen Einsparpotenzials haben kann.

Die im Folgenden erwähnten Anwendungsfälle orientieren sich an einer Checkliste des Instituts für Gebäudetechnologie [IGT 2019] sowie einer akademischen Abschlussarbeit von Dominik Hüttemann an der Technischen Hochschule Rosenheim [Hüttemann 2020]. Dabei wird an dieser Stelle betont, dass die folgenden Anwendungsfälle lediglich ein Extrakt der Möglichkeiten „intelligenter“ Gebäude sind. Viele Anwendungsfälle sind derzeit noch in der Entwicklung bzw. setzen sich erst langsam am Markt durch. Somit sind anschließend zumindest diejenigen Anwendungsfälle aufgeführt, deren Nutzen schon heute greifbar und deren einfache und stabile Umsetzung schon heute technisch möglich ist.

Anwendungsfall	Erforderliche Sensorik
Besprechungsräume können per Smartphone dynamisch gebucht und wieder freigegeben werden. Dabei kann ein vorzeitiges Ende von Besprechungen erkannt werden, welches wiederum einen noch gebuchten Raum wieder freigibt. Das gemäß Raumbuchung anstehende Ende eines Termins wird angezeigt.	Präsenzmelder (bzw. Aktivitätszähler)
In einem Großraumbüro können einzelne Arbeitsplätze gebucht werden; ebenso werden Nicht-Belegungen erkannt und führen zur Freigabe des gebuchten Arbeitsplatzes.	Tisch-/Stuhl-Belegungssensoren
Sensoren zur Erkennung von Anwesenheit von Personen ermöglichen Nutzungsanalysen von Besprechungsräumen, Erkennung von Ressourcenauslastung/ Nutzung, dem Aufzeichnen von No-shows in Besprechungsräumen, der Verwaltung von Raumauslastungen sowie der Verwaltung von z.B. Catering- Dienste.	Präsenzmelder bzw. Aktivitätszähler, Boden-Drucksensoren
Durch die Analyse von Auslastungsmustern können Mitarbeitern bestimmte Arbeitsplätze zugewiesen werden. Die ungenutzten Gebäudebereiche können anschließend in einen Energiesparmodus versetzt werden. Kosten für Heizung, Kühlung und Elektrizität werden dadurch verringert.	Präsenzmelder bzw. Aktivitätszähler, Boden-Drucksensoren, Tisch-/Stuhl-Belegungssensoren
Die Belegung im Gebäude kann graphisch über "Heat Maps" oder "Moving Trails" angezeigt werden. So kann ermittelt werden, wie viele Personen sich wo aufhalten. Das Verständnis dazu hilft bei der Flächenplanung (z.B. Raumgrößen, Position von Besprechungszonen etc.).	Präsenzmelder bzw. Aktivitätszähler, Boden-Drucksensoren

Tabelle 3: Weitere Anwendungsfälle im Bereich von Smart Buildings (Teil 1)

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

Anwendungsfall	Erforderliche Komponenten
Lichtfarben können tagesabhängig geregelt werden, um den Biorhythmus der Mitarbeiter zu unterstützen (Human Centric Lighting - HCL). Manuell kann dies jederzeit übersteuert werden - d.h. über Lichtszenentaster oder Smartphone können zu jeder Zeit Lichtintensität und -farbe verändert werden.	Taster, Helligkeitssensoren, Präsenzmelder
Mitarbeiter und Gäste können durch das Gebäude navigiert werden. Das kann genutzt werden, um schneller zu einem gewünschten Besprechungsraum etc. zu finden, was bei wechselnden Standorten hilfreich ist. Oder es können projektbezogene Teams zusammengeführt werden bzw. Stockwerke stückweise belegt werden (um andere Teile des Gebäudes ungenutzt zu lassen und diese nicht konditionieren zu müssen). Nutzer können Präferenzen eingeben (z.B. Nähe zu Treppenhaus, Kollegen, Besprechungsecken oder barrierefreier Zugang).	- (keine besondere Sensorik erforderlich; Nutzung von Smartphones der Nutzung zur Erfassung von gebäudeseitig installierten Beacon-Sender bzw. Empfangsfeldstärken von WLAN Access Points)
Die Kantinenauslastung (d.h. voraussichtliche Wartezeit bei der Essensausgabe) wird erfasst und kann vom Arbeitsplatz aus eingesehen werden.	Präsenzmelder bzw. Aktivitätszähler, Boden-Drucksensoren
Die Nutzungsintensität von Toiletten wird erfasst, um die Reinigungsintervalle anzupassen.	Türkontakte; alternativ Sensoren für Handtuch-/Seifenspender bzw. Wasserhahn
Aufzüge, Kaffeemaschinen etc. melden Ihre Nutzungsdaten bzw. Betriebszustände, um Serviceintervalle anzupassen.	Idealerweise Anbindung der geräteseitigen Informationen über Schnittstellen – ansonsten diverse Analog-/Binäreingangssensoren
Sensordaten in der Gebäudetechnik (wie Pumpen, Kehrmaschinen, Heizungsanlagen und Aufzüge) überwachen das Verhalten und melden Unregelmäßigkeiten. Dadurch wird die Genauigkeit bei der Fehlersuche verbessert und Störungswahrscheinlichkeiten können vorhergesagt werden.	Idealerweise Anbindung der geräteseitigen Informationen über Schnittstellen – ansonsten diverse Analog-/Binäreingangssensoren
Bewegliche Gegenstände werden überwacht und bei Änderung des Zustandes/der Lage erkannt. Im Falle von Diebstahl kann dies direkt an das Personal des Gebäudes gemeldet werden.	Erschütterungssensor (z.B. Versand von Informationen bei Bewegung); alternativ regelmäßige Übertragung eines Signals, dessen Position im Gebäude geortet werden kann.
Rettungskräfte erhalten im Fall von erforderlichen Evakuierungen (z.B. Brand) die Information, wo sich noch Personen im Gebäude aufhalten.	Präsenzmelder bzw. Aktivitätszähler, Boden-Drucksensoren

Tabelle 4: Weitere Anwendungsfälle im Bereich von Smart Buildings (Teil 2)

## 3 Anforderungen an funkbasierte Übertragungsprotokolle

Die Anforderungen an funkbasierte Übertragungsprotokolle ergeben sich zunächst aus den Anforderungen aufgrund der Smart-Building-Anwendungsfälle. Immerhin gilt es, diese umzusetzen. Zusätzlich ergeben sich weitere Anforderungen in Bezug auf den Aufbau nötiger Infrastruktur sowie dessen Betrieb bzw. Wartung. In diesem Kapitel werden alle diese Anforderungen zusammengefasst, um in folgenden Kapiteln die marktverfügbaren Protokolle gegenüber diesen Anforderungen zu bewerten.

### 3.1 Anforderungen aufgrund der für die Anwendungsfälle erforderlichen Sensoren

Im vorhergehenden Kapitel wurde von den Anwendungsfällen auf erforderliche Sensoren übergeleitet. Diese sind zusammengefasst in Tabelle 5 aufgeführt. Beim Vergleich zu den Tabellen 1 bis 4 fällt auf, dass die meisten Sensoren für unterschiedliche Anwendungsfälle erforderlich sind. Deshalb ergibt sich folgendes Bild: Sollte einer der aufgeführten Sensoren nicht verfügbar sein oder sich nicht hochwertig in die Gebäudeautomation integrieren lassen, sind unmittelbar mehrere Anwendungsfälle beeinträchtigt.

Im Umkehrschluss kann gefolgert werden, dass ein entsprechendes Übertragungsprotokoll alle diese Sensoren unterstützen muss und entsprechende Sensoren marktverfügbar sein müssen.

In drei weiteren Spalten von Tabelle 5 ist zusätzlich eine Einteilung bzgl. erforderlichem Datenvolumen, Sendehäufigkeit und Zeitkritikalität aufgeführt. Diese Informationen sind wichtig, da diese später bei den Anforderungen an die Übertragungsprotokolle berücksichtigt werden müssen.

Die Bewertung in Gering/Mittel/Hoch erfolgt nach dem folgenden Schema:

#### Datenvolumen

Wie groß ist die Datenmenge, die zur Übertragung gesendet werden muss?

- **Gering**            1 – 10 Byte
- **Mittel**            11 – 100 Byte
- **Hoch**              101 – 1000 Byte
- **Sehr hoch**        > 1000 Byte

#### Sendehäufigkeit

Wie oft muss realistisch ein Datenpaket im Durchschnitt gesendet werden?

- **Gering**            weniger als 1x pro Viertelstunde
- **Mittel**            mehr als 1x pro Viertelstunde
- **Hoch**              mehr als 1x pro Minute
- **Sehr hoch**        mehr als 10x pro Minute

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

## Zeitkritikalität

Wie schnell müssen die zu übermittelnden Informationen übertragen werden? Je höher die Anforderung desto geringer müssen die durch das Protokoll erzeugten Latenzzeiten sein.

- **Gering**            innerhalb von 1 – 60 Minuten
- **Mittel**            innerhalb von 1 – 60 Sekunden
- **Hoch**              schneller als 1 Sekunde
- **Sehr hoch**        schneller als 0,1 Sekunde

Sensor	Datenvolumen	Sendehäufigkeit	Zeitkritikalität
Aktivitätenzähler	Gering	Mittel	Mittel
Außen-Bewegungsmelder	Gering	Mittel	Hoch
Außentemperatursensor	Gering	Gering	Mittel
Boden-Drucksensor	Gering	Hoch	Hoch
Diverse Analog-/ Binäreingangssensor	Gering	Je nach zu erfassendem Sensorwert	Je nach zu erfassendem Sensorwert
Drehgriffsensor	Gering	Hoch	Hoch
Drucksensor	Gering	Mittel	Mittel
Erschütterungssensor	Gering	Mittel	Mittel
Helligkeitssensor	Gering	Mittel	Hoch
Luftfeuchtesensor	Gering	Mittel	Mittel
Luftqualitätssensor	Gering	Mittel	Mittel
Präsenzmelder	Gering	Mittel	Hoch
Raumtemperatursensor bzw. Raumtemperaturregler	Gering	Mittel	Mittel
Sensor für Handtuch-/ Seifenspender bzw. Wasserhahn	Gering	Mittel	Gering
Strom- und Wasserzähler	Mittel	Gering	Gering
Taster, Handsender	Gering	Hoch	Hoch (dabei an der Grenze zu „sehr hoch“)
Temperatursensor	Gering	Mittel	Mittel
Tür- und Fensterkontakt	Gering	Hoch	Hoch
Wetterstation (Wind, Temperatur)	Mittel	Mittel	Mittel

Tabelle 5: Zusammenfassung erforderlicher Sensoren

## 3.2 Entscheidungskriterien für die Eignungsbeurteilung

In Bezug auf funkbasierte Übertragungsprotokolle ergeben sich in Summe die folgenden, in alphabetischer Reihenfolge aufgeführten und erläuterten Kriterien.

Dabei erfolgt jegliche Betrachtung im Hinblick auf die in Kapitel 2 aufgeführten Anwendungsfälle – d.h. dem zu erwartenden Umfeld von Smart Buildings.

### **Eignung des Frequenzbandes (K.O. – Kriterium)**

In vorhergehenden Kapiteln wurden die Anforderungen an das Übertragungsprotokoll aufgrund der für die Anwendungsfälle erforderlichen Sensoren ermittelt (siehe Tabelle 5). D.h. die Darstellung in Kapitel 2 der Anforderungen der **Raum- und Anlagenautomation** einerseits der **Mehrwertdienste** andererseits hatte den Zweck, die dazu erforderlichen Sensoren zu bestimmen. Die Darstellung in Kapitel 3.1 hatte wiederum den Zweck, die Übertragungsanforderungen dieser Sensoren zusammenzufassen. In Summe war es damit möglich, die Übertragungsanforderungen festzustellen.

Dabei hat sich gezeigt, dass zur Einbindung von Sensoren keine hohe Datenübertragungsrate erforderlich ist. Zum einen ist das zu übermittelnde Datenvolumen (d.h. Paketgröße eines Datentelegrams) überwiegend sehr gering und selbst im Fall von „hoher Sendehäufigkeit“ handelt es sich um maximal 10 Datenpakete pro Minute. Somit sollten die vom Übermittlungsprotokoll verwendeten Paketgrößen entsprechend klein sein, da ungenutzte Übertragungskapazitäten zur Ineffizienz beitragen würden.

Die Übertragungsdauer ist in den meisten Fällen unkritisch. Lediglich dort, wo eine unmittelbare Ausführung vom Menschen erwartet wird (nach z.B. Betätigen eines Tasters, ein Raum betreten oder eine Tür bzw. ein Fenster geöffnet wird), muss die Latenzzeit für die Übertragung deutlich unter 1 Sekunde liegen; dabei nicht zwingenderweise unter 0,1 Sekunden.

In Bezug auf erforderliche Reichweiten muss beachtet werden, dass in vielen Fällen Sensordaten zunächst zu einem Controller oder Gateway geführt werden, da dort (Automationsebene) bzw. im übergeordneten BMS (Managementebene) die Signalverarbeitung stattfindet (siehe Abbildung 1). Da Sensoren verteilt im Gebäude positioniert werden, muss in den meisten Fällen eine entsprechende Infrastruktur an z.B. kabelbasierten Antennen installiert werden, um alle Sensorsignale in der Nähe dieser Antenne „einzufangen“. Je größer die funkbasierte Übertragungreichweite, desto größer ist diese „Catchment Area“ und desto geringer die Anzahl der erforderlichen Antennen und der damit verbundene Aufwand zum Aufbau der Infrastruktur.

Letztlich ist die erforderliche Sendeleistung ein weiteres Kriterium. Da für die meisten Sensoren eine kabelbasierte Spannungsversorgung hinderlich wäre, sind die üblichen Varianten Batteriebetrieb und Eigenenergieversorgung. Dazu ist es nötig, auf alle Übertragungsanforderungen zu verzichten, die für den konkreten Anwendungsfall nicht erforderlich ist. Das wiederholt die Anforderung nach kleinen Datenpaketen (gemäß dem vorigen Kapitel ca. 10 Bytes), Latenzzeiten im Bereich von 0,1 Sekunde bis 1 Sekunde und anwendungstypisch erforderlichen Reichweiten. Für letztere zeigt sich in der Praxis, dass Reichweiten nicht unter 10 m liegen sollten und bei Gebäude mit üblicher Sensordichte 100 m nicht überschreiten.

Für die Eignungsbewertung des Frequenzbands in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Gering** (0 Punkte): Hohe Datenrate (z.B. im Mbit/s-Bereich) oder zu geringe bzw. zu hohe Reichweiten (z.B. < 10 m bzw. > mehrere 100 m) und damit sich in Konsequenz ergebender hoher Energiebedarf; alternativ Latenzzeiten > 1 s.
- **Mittel** (1 Punkt): Geringe Datenrate und mögliche Paketgrößen bis maximal 100 Bytes und Latenzzeiten von maximal 1 s, besser im Bereich von 0,1 s, Reichweiten im Bereich von 10 m bis 100 m; dabei hoher Eigenenergieverbrauch.
- **Hoch** (2 Punkte): Geringe Datenrate und mögliche Paketgrößen bis maximal 100 Bytes und Latenzzeiten von maximal 1 s, besser im Bereich von 0,1 s, Reichweiten im Bereich von 10 m bis 100 m.

## Hinweis

Beim Kriterium „Eignung des Frequenzbandes“ handelt es sich um ein K.O.-Kriterium.

D.h. ein Übertragungsprotokoll wird später im Rahmen der ganzheitlichen Eignungsbewertung keine bessere Bewertung erhalten, als es in Bezug auf die Eignungsbewertung des Frequenzbandes erhalten hat.

Denn wenn bereits die grundlegenden Übertragungskriterien nicht oder nur eingeschränkt erfüllt werden, kann sich kein positiveres Gesamtbild ergeben.

## Herstellerabhängigkeit

Im Interesse des Nutzers sollte möglichst keine Herstellerabhängigkeit bei gleichzeitiger Verwendung von Produkten unterschiedlicher Hersteller gegeben sein.

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Gering** (2 Punkte): Das Übertragungsprotokoll ist standardisiert und alle zur Produktion von Sensoren erforderlichen Komponenten sind von unterschiedlichen Herstellern verfügbar. Einsatzfertige Sensoren werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten und sind untereinander interoperabel.
- **Mittel** (1 Punkt): Das Übertragungsprotokoll ist standardisiert, aber zumindest einige zur Produktion von Sensoren erforderliche Komponenten müssen von einem Hersteller bezogen werden. Einsatzfertige Sensoren werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten und sind untereinander interoperabel. Alternativ: Abhängigkeit von kostenpflichtigen Betreiberdiensten.
- **Hoch** (0 Punkte): Das Übertragungsprotokoll ist nicht standardisiert bzw. einsatzfertige Sensoren sind nur von einem Hersteller verfügbar. Eine Interoperabilität ist nicht oder nur eingeschränkt vorhanden.

## Infrastruktur

In Smart Buildings ist es üblich, dass die zu steuernden Geräte bzw. Aktoren in eine übergeordnete Steuerung eingebunden werden – sei es ein Controller oder eine Anbindung über Gateways an IP-basierte Steuerungen (siehe auch Abbildung 1). Da die Reichweite von funkbasierten Sensoren begrenzt ist, bestehen unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf die Infrastruktur.

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Infrastruktur** und/oder **Mesh** (jeweils 1 Punkt): Das Gebäude muss über eine Infrastruktur wie z.B. kabelseitig vernetzten Antennen bzw. Gateways verfügen. Über diese Antennen/Gateways werden die Datenpakete auf ein kabelgebundenes Protokoll umgewandelt und so gebäudeübergreifend zusammengeführt bzw. weitergeleitet. Alternativ erlaubt das Funkprotokoll die Bildung einer vermaschten Kommunikation zwischen den Komponenten unter sich – d.h. Weiterreichung von Datentelegrammen über Zwischenknoten (Zwischenkomponenten). Dabei ist zu beachten, dass diese Zwischenknoten einen erhöhten Energiebedarf haben und somit an eine Spannungsversorgung angeschlossen sein sollten.
- **Keine eigene Infrastruktur** (2 Punkte): Die Übertragungs-Reichweite des Funksignals ist sehr hoch und erfordert keine aufwendige gebäudeseitige Infrastruktur. Diese Variante hat insbesondere dann Vorteile, wenn eine geringe Dichte an Sensoren installiert wird, für die der Aufbau einer Infrastruktur einen verhältnismäßig hohen Aufwand erzeugen würde.

## Integrationsfähigkeit

Im Umfeld von Smart Buildings ist es üblicherweise erforderlich, die Sensoren in übergeordnete Systeme (Controller, DDC etc.) einzubinden oder über Gateways in andere Protokolle zu überführen. Dies schließt explizit die Überführung auf IP-basierte Protokolle ein, sofern die Sensoren nicht direkt IP-fähig sind.

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Gering** (0 Punkte): Keine bzw. kaum Schnittstellen von marktüblichen Controller-Herstellern bzw. keine/kaum Gateways.
- **Mittel** (1 Punkt): Einige wenige Schnittstellen von marktüblichen Controller-Herstellern bzw. einige wenige Gateways. Einige wenige Kopplungen in der Praxis vorhanden. Alternativ: IP-basierter „Umweg“ zur Kopplung nötig (d.h. auch erhöhte Latenzzeiten).
- **Hoch** (2 Punkte): Breite Unterstützung des Protokolls von marktüblichen Controller-Herstellern sowie Verfügbarkeit entsprechender Gateways von mehreren Herstellern. Nachweisliche Referenzprojekte in der Praxis vorhanden.

## Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten

Aufgrund der Anwendungsfälle des Smart Buildings wurden in Tabelle 5 die erforderlichen Sensoren zusammengefasst. In dieser Beziehung ist nun zu unterscheiden, ob diese Sensoren verfügbar sind (d.h. als kommerzielle Komponente bestellbar und über Datenblatt/Artikelnummer von einem Hersteller hinsichtlich Gewährleistung/Reparatur unterstützt).

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Gering** (0 Punkte): Die für ein Smart Building erforderlichen Sensoren sind nur rudimentär als bestellbare Komponente verfügbar.
- **Mittel** (1 Punkt): Von den für ein Smart Building erforderlichen Sensoren zumindest ein großer Teil als bestellbare Komponente verfügbar.
- **Hoch** (2 Punkte): Von den für ein Smart Building erforderlichen Sensoren sind alle (bzw. fast alle) als bestellbare Komponente verfügbar.

## Mess- und Prüfmöglichkeiten

Die Praxis zeigt, dass es im Fall von Fehlverhalten der Automation wichtig ist, die per Funk übertragenen Daten analysieren zu können. Dazu sind Mess- und Prüfgeräte samt Dokumentation zur Anwendung/Bedienung erforderlich.

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Gering** (0 Punkte): Es sind keine Messungen und Überprüfungen möglich (Mangel an Mess- und Prüfgeräten bzw. fehlender Dokumentation zur Anwendung).
- **Mittel** (1 Punkt): Messungen und Überprüfungen sind möglich. Die dazu erforderlichen Mess- und Prüfgeräte sind dabei entweder teuer oder kompliziert zu bedienen. Ein einfacher, unkomplizierter Einsatz ist nicht gegeben.
- **Hoch** (2 Punkte): Es stehen einfache Mess- und Prüfgeräte sowie anwendbare Tutorials zum Umgang den Geräten zur Verfügung.

## Spannungsversorgung

Der Vorteil funkbasierter Sensoren liegt darin, diese ortsveränderlich positionieren zu können. Dazu ist eine externe kabelgebundene Spannungsversorgung hinderlich. Wenn eine geringe Sensordichte im Gebäude zu erwarten ist, können batteriebetriebene Sensoren eingesetzt werden, sofern der Zyklus zum Tausch von Batterien im Bereich von mehreren Jahren liegt (da ansonsten der Wartungs-/Pflegeaufwand sehr hoch werden kann). Von Vorteil ist eine Eigenenergie-Versorgung (z.B. über Fotzellen). In allen Fällen ist ein geringer Eigenenergieverbrauch der Sensoren wichtig.

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Externe Spannungsversorgung** (0 Punkte)
- **Batteriebetrieb** (1 Punkt)
- **Eigenenergieversorgung** (2 Punkte)

## **Verschlüsselung**

Datensicherheit und Integrität gewinnen zunehmend an Bedeutung und ergeben Anforderungen an die vertrauliche und manipulationssichere Datenübertragung. Dabei gilt dies insbesondere bei der funkbasierten Ansteuerung von Aktoren. Bei der Übertragung von reinen Sensorwerten hält sich ein möglicher Schaden in Grenzen. Trotzdem ist auch hier die Möglichkeit von Verschlüsselung nicht außer Acht zu lassen.

Für die spätere Verwendung in Kapitel 5 wird vorab die folgende Unterteilung festgelegt:

- **Gering** (0 Punkte): Keinerlei Unterstützung für verschlüsselte Datenübertragung
- **Mittel** (1 Punkt): Unterstützung für verschlüsselte Datenübertragung mit mittlerem Sicherheitsniveau
- **Hoch** (2 Punkte): Unterstützung für verschlüsselte Datenübertragung mit hohem Sicherheitsniveau

## 4 Übersicht über verfügbare, funkbasierte Protokolle

In diesem Kapitel werden die grundsätzlich üblichen bzw. womöglich in naher Zukunft in Frage kommenden funkbasierten Übertragungsprotokolle vorgestellt. Zu jedem Protokoll erfolgt eine kurze strukturierte Beschreibung. Einleitend werden die relevanten Frequenzbänder aufgeführt.

### 4.1 Frequenzbänder

Zur funkbasierten Datenübertragung wird als Basis ein hochfrequenter Übertragungsträger verwendet. Dessen Sendefrequenz muss in einem dafür zugelassenen Frequenzband liegen.

Die zur Datenübertragung von Smart Building Sensorik verwendeten Frequenzbänder sind das UHF-Band (Ultra High Frequency; 0,3 GHz – 3 GHz) sowie das SHF-Band (Super High Frequency; 3 GHz – 30 GHz).

Eine Übersicht über die darin enthaltenen Sub-Bänder ist in den folgenden beiden Tabellen abgebildet. Dabei bezieht sich die Darstellung auf die übliche Nutzung in Europa – in Amerika oder Asien liegt zum Teil eine andere Frequenznutzung vor.

Frequenz	Bezeichnung	Kommentar
433 MHz, 868 MHz	SRD (Short Range Devices)	Lizenzfreie Nutzung; Beschränkung der zeitlichen Belastung des Übertragungsmediums (bei 868,3 MHz z.B. 1%), maximale Sendeleistung bei den Frequenzen 863 MHz – 869 MHz: 25 mW
2,4 GHz	WLAN, Bluetooth, Thread, ZigBee	Lizenzfreie Nutzung; maximale Sendeleistung 100 mW.
0,7 GHz – 2,1 GHz; 2,6 GHz – 3,6 GHz	Mobilfunk (2G, 3G, 4G)	Diverse Frequenzbänder für GSM (2G), UMTS (3G) sowie LTE (4G). Zur Nutzung müssen Lizenzen erworben werden, sodass sich eine kostenpflichtige Nutzung über einen entsprechenden Betreiber ergibt. Die maximalen Sendeleistungen variieren von 2 W (2G) bis 0,2 W (4G).

Tabelle 6: UHF-Frequenzband und ausgewählte Sub-Bänder

Frequenz	Bezeichnung	Kommentar
5,1 - 5,7 GHz	WLAN	Lizenzfreie Nutzung; maximale Sendeleistung 1000 mW.
ab 3,4 GHz	Mobilfunk (5G)	Die 5G-Mobilfunktechnologie ist für die Nutzung unterschiedlicher Trägerfrequenzen ausgelegt. Erste Implementierungen erfolgen im sogenannten C-Band (3,4 GHz – 3,7 GHz). Die spätere Nutzung hochfrequenterer Bänder ist bereits vorgesehen. Zur Nutzung müssen Lizenzen erworben werden, sodass sich eine kostenpflichtige Nutzung über einen entsprechenden Betreiber ergibt.

Tabelle 7: SHF-Frequenzband und ausgewählte Sub-Bänder

## 4.2 Übersicht möglicher Übertragungsprotokolle

Die im Folgenden beschriebenen funkbasierten Übertragungsprotokolle sind die, die für die Einbindung von Sensorik bzw. Anwendungen im gebäudespezifischen Umfeld von IoT (Internet of Things), somit Building-IoT, in Frage kommen bzw. in der Praxis immer wieder erwähnt werden.

Die Beschreibung erfolgt gemäß der folgenden Struktur:

- Allg. Beschreibung (Ziel/Eignung)
- Eignung des Frequenzband  
(Datenvolumen, Latenzzeit, Paketgröße, Reichweite, Sendeleistung/Energiebedarf)
- Herstellerabhängigkeit (auch: Standardisierung)
- Infrastruktur (auch Lizenz, Ad-hoc, Mesh etc.)
- Integrationsfähigkeit
- Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten
- Mess- und Prüfmöglichkeiten
- Spannungsversorgung
- Verschlüsselung

## 4.2.1 5G

Das Mobilfunknetz 5G (5. Generation) wurde geschaffen, um eine im Vergleich zu LTE (4G) bessere bzw. leistungsfähigere Infrastruktur für die flächendeckende Datenübertragung im öffentlichen Raum zu gewährleisten. Die Nutzung ist besonders interessant, wenn Sensoren dort eingebunden werden müssen, an denen keine eigene Infrastruktur ausgebaut werden kann oder sich dies aufgrund einer sehr geringen Sensordichte nicht rentiert.

In Bezug auf die Datenrate ist zu erwarten, dass diese im Bereich von über 1 GBit/s liegt – so zumindest der aktuelle Informationsstand. Die Latenzzeit kann im Bereich von wenigen Millisekunden liegen. Die Reichweite von Endgeräten hängt von der konkret genutzten Frequenz ab und kann sich im Bereich von wenigen 100 m bewegen – dazu ist ein entsprechender (flächendeckender) Ausbau der Infrastruktur durch den Betreiber erforderlich.

Das Übertragungsprotokoll ist standardisiert und in Bezug auf die Produktion bzw. das Angebot von Endgeräten besteht keine Herstellerabhängigkeit. Die Interoperabilität von Endgeräten unterschiedlicher Hersteller ist gegeben. Allerdings müssen für den Betrieb der Geräte die kostenpflichtigen Dienste der entsprechenden Betreiber genutzt werden. Eine Datenübertragung zwischen den Geräten ist nicht vorgesehen – d.h. entsprechende Endgeräte müssen immer mit der öffentlichen Infrastruktur kommunizieren.

Die Integration von Endgeräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) erfolgt ausschließlich über die Anbindung der DDC-Systeme an die Plattform des 5G-Betreibers.

Sensoren für die Gebäudeautomation, wie z.B. Taster, Präsenzsensoren, Fensterkontakte etc. (siehe Tabelle 5) sind derzeit nicht kommerziell am Markt verfügbar. Ob dies in absehbarer Zeit der Fall ist, bleibt abzuwarten.

Mess- und Prüfgeräte für die 5G-Technologie sind grundsätzlich vorhanden, aber sehr hochpreisig und ohne eine versierte Einführung/Schulung nicht zu bedienen. Somit ist nicht davon auszugehen, dass diese von einem durchschnittlichen Systemintegrator für Gebäudeautomation besessen bzw. beherrscht werden.

In Bezug auf die Spannungsversorgung ist bei den Endgeräten davon auszugehen, dass diese entweder an eine kabelgebundene Spannungsquelle angeschlossen oder im Falle von Batteriebetrieb regelmäßig geladen (alternativ einem Batterietausch ausgesetzt) werden müssen.

Genauere Aussagen sind derzeit nicht möglich, da sich die Auswahl an Endgeräten derzeit erst noch entwickelt.

Diverse sehr sichere Verschlüsselungsverfahren zur Datensicherheit werden unterstützt.

## 4.2.2 Bluetooth / BLE (Bluetooth Low Energy)

Bluetooth und BLE wurden für eine Kommunikation mit mittlerer Datenrate über kurze Distanzen (Personal Area Networks = PAN) geschaffen. Bluetooth wird insbesondere für die Audioübertragung zwischen Smartphones / Tablets und Peripheriegeräten (Lautsprechern, Headsets, Freisprecheinrichtungen) verwendet und hat in diesem Bereich eine beinahe universelle Unterstützung in Smartphones und Tablets erreicht. Die energieoptimierte Version Bluetooth Low Power (BLE) wurde ursprünglich für die Übertragung kleinerer Datenmengen zwischen Sensoren (insbesondere im Sportbereich) und Smartphones entwickelt. BLE ist ebenfalls für den Einsatz im Bereich von Smart Buildings von Interesse.

BLE unterstützt Datenraten von bis zu 2 Mbit/s bei sehr geringen Latenzzeiten von deutlich unter 100 ms. Die möglichen Paketgrößen sind variabel zwischen 10 Bytes und 255 Bytes. Die maximale Reichweite beträgt bei Sichtverbindung ca. 50 m; bei Anwendungen in Gebäuden ist mit einer Reichweite von 10 m – 15 m auszugehen. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation auf maximal 100 mW beschränkt, wobei einige Substandards eine maximale Sendeleistung von 10 mW erlauben.

Das Bluetooth Protokoll wird über die Bluetooth Special Interest Group (SIG) als ein hierarchisches Set von Standards spezifiziert. Während einige Anwendungen – wie zum Beispiel die Audioübertragung – eine praktisch durchgehende Interoperabilität erreicht haben, ist eine hersteller- und anwendungsübergreifende Interoperabilität im Bereich der Gebäudeautomation noch nicht gegeben.

Bluetooth-Geräte können sowohl untereinander als auch mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren. Ebenso wird die Bildung eines Maschennetzes unterstützt (Bluetooth Mesh), bei der Informationen über zwischengelagerte Bluetooth-Geräte weitergeben werden können. Dabei muss beachtet werden, dass sich diese in Reichweite (d.h. weniger als 10 m Abstand) befinden müssen und einen höheren Energiebedarf haben.

Die Einbindung von Bluetooth Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist dadurch gegeben, dass einige Hersteller Bluetooth-Schnittstellen anbieten; alternativ kann eine Einbindung über Bluetooth IP-Gateways erfolgen, welches aber die Gesamt-Latenzzeit deutlich erhöht.

Sensoren für die Gebäudeautomation werden zunehmend angeboten – ein komplettes erforderliches Spektrum gemäß Tabelle 5 ist derzeit nicht kommerziell verfügbar, aber vorstellbar.

Mess- und Prüfgeräte für Bluetooth sowie Anleitungen zur Bedienung sind in ausreichender Vielfalt und zu überschaubaren Preisen vorhanden.

In Bezug auf den Energiebedarf werden die aktuell verfügbaren Bluetooth Sensoren über Batterien oder kabelgebundene Spannungsversorgungen gespeist. Eine Nutzung von Eigenenergieversorgung scheint sich abzuzeichnen, aber ist derzeit am Markt noch nicht kommerziell üblich.

Diverse Verschlüsselungsverfahren werden angeboten und können bei sachgerechter Einrichtung eine hohe Datensicherheit gewährleisten.

## 4.2.3 EnOcean

Das EnOcean-Protokoll wurde zur Datenübertragung mit dem Fokus der Eigenenergieversorgung („Energy Harvesting“) eingeführt. Hauptanwendungsgebiet für das EnOcean-Protokoll ist die Gebäudeautomation.

EnOcean nutzt in Europa eine Übertragungsfrequenz von 868,3 MHz und liegt damit im für die Übertragung von kurzen Informationen geschaffenen SRD-Frequenzband (siehe Kapitel 4.1). Die übertragbare Datenrate liegt bei 125 kbit/s. Die Latenzzeiten sind so gering, dass sie auch beim Einsatz von relativ zeitkritischen Sensoren wie Tastern vom Menschen nicht wahrgenommen werden. Die Paketgröße liegt im Bereich von 7 Byte – 16 Byte. Die maximale Reichweite in Gebäuden liegt bei ca. 30 m. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten SRD-Frequenzbandes auf maximal 25 mW beschränkt.

Das EnOcean-Protokoll ist als internationaler ISO/IEC-Standard anerkannt und für die Produkte sind unterschiedliche Hersteller mit hoher Interoperabilität vorhanden.

EnOcean-Geräte können sowohl untereinander als auch mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren.

Die Einbindung von EnOcean-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist dadurch gegeben, dass viele Hersteller EnOcean-Schnittstellen anbieten; alternativ sind vielfältige Gateways (z.B. EnOcean- IP; EnOcean- KNX, EnOcean- DALI etc.) verfügbar.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind in hoher Auswahl von vielen unterschiedlichen Herstellern kommerziell verfügbar.

Mess- und Prüfgeräte für EnOcean sowie Anleitungen zur Bedienung sind in ausreichender Vielfalt vorhanden.

In Bezug auf den Energiebedarf werden die meisten verfügbaren EnOcean-Sensoren über Eigenenergieversorgung (z.B. Energiewandler, Fozelle etc.) gespeist.

Diverse Verschlüsselungsverfahren werden angeboten und gewährleisten bei sachgerechter Einrichtung eine hohe Datensicherheit.

## 4.2.4 KNX RF

KNX RF (KNX Radio Frequency) wurde von der KNX-Association als Ergänzung zum klassischen kabelbasierten KNX-Übertragungsprotokoll festgelegt. Hauptanwendungsgebiet für das KNX RF-Protokoll ist die Gebäudeautomation.

KNX RF nutzt in Europa eine Übertragungsfrequenz von 868,3 MHz und liegt damit im für die Übertragung von kurzen Informationen geschaffenen SRD-Frequenzband (siehe Kapitel 4.1). Die übertragbare Datenrate liegt bei 16 kbit/s. Die Paketgröße liegt im Bereich von 8 Byte – 23 Byte. Die Latenzzeiten sind so gering, dass sie auch beim Einsatz von relativ zeitkritischen Sensoren wie Tastern vom Menschen nicht wahrgenommen werden. Die maximale Reichweite in Gebäuden liegt bei ca. 30 m. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten SRD-Frequenzbandes auf maximal 25 mW beschränkt.

Das KNX RF-Protokoll ist als internationaler ISO/IEC-Standard anerkannt und für die Produkte sind unterschiedliche Hersteller mit hoher Interoperabilität vorhanden. Hersteller müssen Mitglied in der KNX-Association sein und Produkte vor einer kommerziellen Markteinführung zertifizieren lassen.

KNX-RF-Geräte können sowohl untereinander als mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren.

Die Einbindung von KNX RF-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist dadurch möglich, dass zunächst ein Medienwechsel von KNX RF auf KNX TP (Twisted Pair, kabelgebundenes Übertragungsprotokoll) stattfindet. Aufgrund der begrenzten Reichweite werden in größeren Gebäuden mehrere dieser Medienkoppler eingesetzt, die selber wiederum alle an einem KNX TP-Buskabel angeschlossen sind. An dieses Buskabel kann dann ein KNX-Controller bzw. beliebiger Controller mit KNX-Schnittstelle bzw. KNX-Gateway angeschlossen werden.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind in überschaubarer Auswahl von einigen Herstellern kommerziell verfügbar.

Die Analyse des KNX RF-Protokolls erfolgt über die einheitliche KNX-Inbetriebnahme-Software– dazu muss allerdings die entsprechende Infrastruktur vorhanden sein. Eigenständige Mess- und Prüfgeräte für KNX RF sind derzeit nicht am Markt verfügbar.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen die üblichen KNX RF-Sensoren Batteriebetrieb.

KNX RF unterstützt grundsätzlich ein Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit. Dabei muss dieses sowohl von den Geräten unterstützt werden als auch bei der Inbetriebnahme entsprechend eingerichtet werden.

## 4.2.5 LoRa

Die LoRa Technologie (Long Range) wurde zur Anbindung von energiearmen Komponenten (üblicherweise Sensoren) über große Distanzen geschaffen. Das im Detail verwendete Protokoll wird als LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) bezeichnet. Hauptanwendungsgebiet ist der IoT-Bereich (Internet of Things) im Allgemeinen.

Die überwiegenden Einsatzgebiete charakterisieren sich über eine geringe Sensordichte und somit Verbindung zwischen Gebäuden bzw. innerhalb von Stadtteilen bzw. in ländlichen Regionen (siehe auch Eigenverständnis der LoRa Alliance: „für große öffentliche Netzwerke“). LoRa bietet unterschiedliche Modulationsarten an, die Informationen zu übertragen – im Detail unterscheidet LoRa in unterschiedliche Spreadingfaktoren (SF). Diese liegen im Bereich von SF7 und SF12 und beeinflussen maßgeblich Reichweite, Paketgröße, Energiebedarf und Latenzzeit. Für die Long-Range-Anwendungen wird ein höherer Spreadingfaktor (z.B. SF12) verwendet; dabei können Latenzzeiten im Bereich mehrerer Sekunden bis Minuten liegen und wäre für die in diesem Dokument ermittelten Anforderungen (siehe Kapitel 2) nicht geeignet. Allerdings wird LoRa auch zunehmend im Bereich der Gebäudeautomation eingesetzt. In diesen Fällen wird ein kleinerer Spreadingfaktor verwendet. Im Folgenden wird diese Variante (exemplarisch SF7) betrachtet, da nur die erwähnten Anforderungen grundsätzlich erfüllt werden können.

LoRaWAN nutzt in Europa als Übertragungsfrequenz das zur Übertragung von kurzen Informationen geschaffene SRD-Frequenzband (siehe Kapitel 4.1). Die übertragbare Datenrate liegt beim SF7 bei ca. 5 kbit/s; die Paketgröße bei 235 Byte. Bei diesem Spreadingfaktor werden Latenzzeiten von unter 400 ms erreicht [Pötsch 2019]. Die maximale Reichweite bei diesem SF ist aus den einschlägigen Informationsquellen nicht belastbar ermittelbar; scheint aber bei wenigen hundert Metern zu liegen. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten SRD-Frequenzbandes auf maximal 25 mW beschränkt.

LoRaWAN ist nicht standardisiert und in allen Sendern und Empfängern kommen ausschließlich die Chips der Firma Semtech Corporation zum Einsatz. LoRa-Geräte können nicht untereinander, sondern nur mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren. Diese übergeordnete Infrastruktur kann Komponenten mit unterschiedlichen Spreadingfaktoren einbinden (d.h. es ist bei der Nutzung unterschiedlicher Spreadingfaktoren nicht nötig, mehrere übergeordnete Sende-/Empfangs-Infrastrukturen aufzubauen) [Seungku 2020]. Diese Flexibilität mag grundsätzlich ein interessanter Aspekt sein – für die diesem Dokument zugrundeliegenden Anforderungen ist das jedoch kein Vorteil. Denn wie erwähnt werden für diese Anforderungen Komponenten mit einem geringen Spreadingfaktor benötigt. Wenn diese gleichmäßig im Gebäude verteilt sind, ist deren Reichweite die Grundlage für die Planung der übergeordneten Infrastruktur. Ansonsten müsste bei einem Mix an Sendern mit unterschiedlichen Spreadingfaktoren die jeweils unterschiedliche Reichweite bei der Planung berücksichtigt werden und die Komplexität des Planungsprozesses würde sich entsprechend erhöhen.

Die Einbindung von LoRa-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist nur über eine IP-basierte Verbindung möglich. D.h. LoRa-Sensorinformationen werden zunächst im LoRa-Netzwerk zentral an einen Application Server gesendet. Dieser muss eine Umsetzung auf ein IP-basiertes Netzwerk durchführen, über das die Informationen zum DDC-System gesandt werden. Zusätzlich zu dieser grundsätzlichen Kopplung müssen sowohl LoRa-Application-Server als auch DDC-

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

System die Informationen auch inhaltlich verarbeiten (z.B. durch beidseitige Nutzung eines Protokolls wie MQTT). Belastbare Projekterfolge im Umfeld der Gebäudeautomation größerer Liegenschaften sind derzeit nicht nachweisbar.

In Bezug auf Sensoren nimmt das marktverfügbare Angebot derzeit zu – bewegt sich aber noch auf überschaubarem Niveau; Akteure für die Gebäudeautomation sind derzeit kaum kommerziell verfügbar.

Die Analyse des Protokolls LoRaWAN über Mess- und Prüfgeräte ist grundsätzlich möglich, aber noch nicht in einem Status, wie sie für eine schnelle und pragmatische Inbetriebnahme bzw. Fehlerlokalisierung und –behebung erforderlich wären.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen LoRa-Sensoren Batteriebetrieb.

LoRaWAN unterstützt ein Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit.

## 4.2.6 NB-IoT

NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) ist ein Dienst von 4G-Mobilfunkbetreibern. Dieser zielt darauf ab, die aufgebaute Infrastruktur auch für IoT-Dienste zu nutzen. Ähnlich LoRa und 5G ist dabei der Fokus auf Kommunikationsdienste über einen zentralen Betreiber im öffentlichen Bereich.

Als Übertragungsfrequenz wird die des 4G-Mobilfunkstandards (LTE) verwendet; zur Nutzung müssen entsprechende Lizenzen erworben worden sein. Die übertragbare Datenrate liegt zwischen 16 kbit/s und 127 kbit/s. Die Paketgröße liegt im Bereich von 20 Byte – 200 Byte. Die Latenzzeiten liegen im Bereich von 1,6 Sekunden bis 10 Sekunden.

Das Protokoll wurde von der 3GPP (einer Kooperation von Standardisierungsgremien) vorgestellt, aber seit Mitte 2016 nicht mehr weiterentwickelt. Vermutlich auch deshalb, weil entsprechende Dienste im Umfeld von 5G angeboten werden.

NB-IoT-Geräte können ausschließlich mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren.

Die Integration von Endgeräte in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) erfolgt ausschließlich über die Anbindung der DDC-Systeme an die Plattform des 4G-Betreibers.

Sensoren für die Gebäudeautomation, wie z.B. Taster, Präsenzsensoren, Fensterkontakte etc. (siehe Tabelle 5) sind derzeit nicht kommerziell am Markt verfügbar und eine Markteinführung ist in Anbetracht der parallelen Entwicklung von 5G-Diensten unwahrscheinlich.

Mess- und Prüfgeräte für die 4G-Technologie und NB-IoT sind grundsätzlich vorhanden, aber sehr hochpreisig und ohne eine versierte Einführung/Schulung nicht zu bedienen. Somit ist nicht davon auszugehen, dass diese von einem durchschnittlichen Systemintegrator für Gebäudeautomation besessen bzw. beherrscht werden.

In Bezug auf die Spannungsversorgung ist bei den Endgeräten davon auszugehen, dass diese entweder an eine kabelgebundene Spannungsquelle angeschlossen oder im Falle von Batteriebetrieb regelmäßig geladen (alternativ einem Batterietausch ausgesetzt) werden müssen. Genauere Aussagen sind nicht möglich, da wie erwähnt keine für die Gebäudeautomation erforderlichen Sensoren am Markt verfügbar sind.

Diverse, sehr sichere Verschlüsselungsverfahren zur Datensicherheit werden unterstützt.

## 4.2.7 Sigfox

Die Sigfox Technologie wurde ähnlich LoRa zur Anbindung von Geräten über große Distanzen geschaffen. Dabei wird die Technologie direkt über die Firma Sigfox S.A. betrieben; d.h. diese agiert auch gleichzeitig als Betreiber. Hauptanwendungsgebiet ist der IoT-Bereich (Internet of Things) im Allgemeinen. Grundsätzlich schließt das auch Anwendungen der Gebäudeautomation mit ein – die üblichen Einsatzgebiete charakterisieren sich derzeit über eine geringe Sensordichte und somit Verbindung zwischen Gebäuden bzw. innerhalb von Stadtteilen bzw. in ländlichen Regionen (somit für große öffentliche Netzwerke).

Sigfox nutzt in Europa als Übertragungsfrequenz das zur Übertragung von kurzen Informationen geschaffene SRD-Frequenzband (siehe Kapitel 4.1). Die übertragbare Datenrate liegt bei 100 Bit/s. Die Pakete können Nachrichten von 12 Byte übertragen. Zu kurzen Latenzzeiten sind keine belastbaren Informationen verfügbar – im Hinblick auf maximal 140 Nachrichten pro Tag kann allerdings nicht von einer unmittelbaren Übertragung ausgegangen werden. Dies spricht für die Erfassung von zeitlich unkritischen Vorgängen, aber nicht für die typischen Anwendungsfälle in der Gebäudeautomation. Die maximale Reichweite im Stadtgebiet soll bei ca. 3 km – 30 km bei Sichtverbindung liegen. Für Anwendungen in Gebäude liegen keine belastbaren Angaben vor; entsprechende Reichweiten werden deutlich unter 3 km liegen. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten SRD-Frequenzbandes auf maximal 25 mW beschränkt.

Das Sigfox-Protokoll ist nicht standardisiert und in allen Sendern und Empfängern kommen ausschließlich Module der Firma Sigfox S.A. zum Einsatz. Sigfox -Geräte können nicht untereinander, sondern nur mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren.

Die Einbindung von Sigfox-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist nur über eine IP-basierte Verbindung möglich. D.h. Sigfox-Sensorinformationen werden zunächst im Sigfox-Netzwerk zentral an einen Application Server gesendet. Dieser muss eine Umsetzung auf ein IP-basiertes Netzwerk durchführen, über das die Informationen zum DDC-System gesandt werden. Zusätzlich zu dieser grundsätzlichen Kopplung müssen sowohl Sigfox-Application-Server als auch DDC-System die Informationen auch inhaltlich verarbeiten (z.B. durch beidseitige Nutzung eines Protokolls wie MQTT). Belastbare Projekterfolge im Umfeld der Gebäudeautomation größerer Liegenschaften sind derzeit nicht nachweisbar.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind nicht kommerziell verfügbar.

Die Analyse des Sigfox-Protokolls über Mess- und Prüfgeräte ist grundsätzlich möglich, aber noch nicht in einem Status, wie sie für eine schnelle und pragmatische Inbetriebnahme bzw. Fehlerlokalisierung und –behebung erforderlich wären.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen Sigfox-Sensoren Batteriebetrieb.

Sigfox unterstützt ein Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit.

## 4.2.8 Thread

Das Thread Protokoll wurde mit dem Ziel der funkbasierten Vernetzung von Komponenten in Gebäuden geschaffen. Hauptanwendungsgebiet für das Thread-Protokoll ist die Vernetzung von Anwendungsgegenständen in Gebäuden bzw. die Gebäudeautomation.

Das Thread-Protokoll nutzt eine Übertragungsfrequenz von 2,4 GHz. Die übertragbare Datenrate liegt bei 250 kbit/s. Die Paketgröße liegt bei 127 Byte. Die Latenzzeiten liegen bei einer einzelnen Übertragungsstrecke bei unter 100 ms. Da das Thread Protokoll Mesh-fähig ist, kann die End-to-End-Übertragung über eine Vielzahl von Zwischenverbindungen erfolgen, bei der sich dann die Gesamtlatenzzeit entsprechend erhöht. Die maximale Reichweite für eine Übertragungsstrecke in Gebäuden liegt bei ca. 10 m bis 15 m. Durch die Mesh-Topologie kann sich das Netzwerk deutlich vergrößern. Dabei muss beachtet werden, dass vermittelnde Knoten einen höheren Energiebedarf haben. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten Frequenzbandes auf maximal 100 mW beschränkt.

Das Thread-Protokoll nutzt auf den unteren Übertragungsebenen den internationalen IEEE 802.15.4-Standard. Auf den höheren Ebenen rühmt sich Thread damit, eine IPv6-Adressierung zu unterstützen. Die Spezifikation von Thread ist als „Open Thread“ von Google veröffentlicht. Zwischen Produkten, die dieser Spezifikation entsprechen, ist auszugehen, dass diese ausreichend interoperabel sind.

In Bezug auf die Struktur muss beachtet werden, dass Thread-Geräte zunächst mit sogenannten Thread-Routern kommunizieren. Diese müssen in entsprechender Dichte im Gebäude verfügbar sein. Diese Thread-Router sind maschenförmig miteinander verbunden. Zum Übergang auf andere Netze (z.B. LAN oder WLAN) ist ein sogenannter Edge-Router erforderlich.

Auf diese Weise kann auch die Einbindung von Thread-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) erfolgen. Zusätzlich zu dieser grundsätzlichen Kopplung müssen sowohl Thread Edge-Router als auch DDC-System die Informationen auch inhaltlich verarbeiten (z.B. durch beidseitige Nutzung eines Protokolls wie MQTT). Belastbare Projekterfolge im Umfeld der Gebäudeautomation größerer Liegenschaften sind derzeit nicht nachweisbar.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind aktuell in sehr geringer Auswahl von einigen Herstellern kommerziell verfügbar.

Die Analyse des Thread-Protokolls kann über kabelbasierte Netzwerk-Protokolltester erfolgen - dazu muss allerdings die entsprechende Infrastruktur und eine IP-basierter Zugang vorhanden sein. Eigenständige Mess- und Prüfgeräte für die funkbasierte Übertragung sind derzeit nicht am Markt verfügbar, wie sie für eine einfache und pragmatische Inbetriebnahme bzw. Fehleranalyse erforderlich wären.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen die üblichen Thread-Sensoren Batteriebetrieb.

Thread unterstützt ein Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit.

## 4.2.9 WLAN

WLAN wurde als Alternative zur kabelbasierten Ethernet-Anbindung geschaffen und ist deshalb im Rahmen der IEEE 802.11-Familie standardisiert. Der Schwerpunkt liegt auf der möglichst schnellen Datenübertragung von leistungsfähigen Endgeräten.

Die übertragbare Datenrate liegt je nach verwendetem WLAN-Standard bei mehreren hundert Mbit/s. Die typische Paketgröße liegt bei 2.312 Byte – diese kann angepasst werden, aber damit verschlechtert sich aufgrund des gleich groß bleibenden Paket-Headers die Übertragungseffizienz. Da WLAN-Netzwerke quasi von „Jedermann“ frei in Betrieb genommen werden können, kommt es in der Praxis oft zu „Wildwuchs“ und in Konsequenz zu gegenseitigen Störungen. Das wiederum wirkt sich negativ auf tatsächliche Übertragungsraten aus. Eine solche Überlastung wird nicht dazu führen, dass einzelne Pakete gar nicht übertragen werden, aber es kommt zu einer entsprechenden zeitlichen Verzögerung. Eine Gewährleistung von geringen Latenzzeiten kann somit nicht gewährleistet werden. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten Frequenzbandes auf maximal 100 mW beschränkt.

Aufgrund der Standardisierung sind Produkte unterschiedlicher Hersteller mit hoher Interoperabilität vorhanden.

WLAN-Geräte können theoretisch direkt untereinander kommunizieren – üblich ist allerdings die Einbindung einer übergeordneten IP-basierten Infrastruktur (z.B. WLAN Access Points).

Bei Bedarf der Integration der WLAN-Komponenten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) sind diese ebenso an die IP-basierte Infrastruktur anzuschließen. Zusätzlich zu dieser grundsätzlichen Kopplung müssen beide Kommunikationspartner, also WLAN-Komponente und DDC-System, die Informationen auch inhaltlich verarbeiten. Dazu ist die beidseitige Nutzung eines höherwertigen Protokolls erforderlich. Diesbezüglich gibt es noch keine verbindlichen Vorgaben oder Standards. Belastbare Projekterfolge im Umfeld der Gebäudeautomation größerer Liegenschaften sind derzeit nicht nachweisbar.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind nur als vereinzelte Komponenten von wenigen Herstellern kommerziell verfügbar.

Zur Analyse des WLAN-Protokolls steht eine Vielzahl von üblichen Mess- und Prüfgeräten bzw. entsprechende Software für z.B. Notebooks etc. zur Verfügung.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen die wenigen verfügbaren WLAN-Sensoren Batteriebetrieb.

WLAN unterstützt unterschiedliche Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit.

## 4.2.10 ZigBee / ZGP (ZigBee Green Power)

Das ZigBee-Protokoll wurde mit dem Ziel der funkbasierten Vernetzung von Komponenten in Gebäuden geschaffen. Hauptanwendungsgebiet für das ZigBee-Protokoll ist die Gebäudeautomation.

ZigBee nutzt in Europa überwiegend das 2,4 GHz-Frequenzband – insbesondere ab der Version 3.0. Parallel gibt es auch Geräte, die das SRD-Frequenzband (868,3 MHz) nutzen. Die übertragbare Datenrate liegt bei der Verwendung des 2,4 GHz-Frequenzbands bei 250 kbit/s. Die Paketgröße liegt bei 127 Byte. Die Latenzzeiten für einen einzelnen funkbasierten Übertragungsweg sind so gering, dass sie auch beim Einsatz von relativ zeitkritischen Sensoren wie Tastern vom Menschen nicht wahrgenommen werden. Da das ZigBee Protokoll Mesh-fähig ist, kann die End-to-End-Übertragung über eine Vielzahl von Zwischenverbindungen erfolgen, bei der sich dann die Gesamtlatenzzeit entsprechend erhöht. Die maximale Reichweite in Gebäuden liegt bei ca. 10 m bis 15 m. Durch die Mesh-Topologie kann sich das Netzwerk deutlich vergrößern. Dabei muss beachtet werden, dass vermittelnde Knoten einen höheren Energiebedarf haben. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten Frequenzbandes auf maximal 100 mW beschränkt.

Das ZigBee-Protokoll nutzt auf den unteren Übertragungsebenen den internationalen IEEE 802.15.4-Standard. Auf den höheren Ebenen wurden bisher sehr herstellerspezifische Implementierungen genutzt, so dass Geräte unterschiedlicher Hersteller nicht interoperabel waren. Mit der Version 3.0 wird angestrebt, die Interoperabilität zu erhöhen.

ZigBee-Geräte können sowohl untereinander als auch mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren.

Die Einbindung von ZigBee-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist theoretisch nur über die zusätzliche Verwendung eines ZigBee-IP-Gateways möglich. D.h. ZigBee-Pakete werden an ein LAN übertragen, an welches dann auch das DDC-System angeschlossen ist. Zusätzlich zu dieser grundsätzlichen Kopplung müssen sowohl ZigBee-Geräte/Gateway als auch DDC-System die Informationen auch inhaltlich verarbeiten (z.B. durch beidseitige Nutzung eines Protokolls wie MQTT). Belastbare Projekterfolge im Umfeld der Gebäudeautomation größerer Liegenschaften sind derzeit nicht nachweisbar.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind in überschaubarer Auswahl von einigen Herstellern kommerziell verfügbar.

Eigenständige Mess- und Prüfgeräte für ZigBee sind verfügbar.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen die üblichen ZigBee-Sensoren Batteriebetrieb. ZigBee 3.0 unterstützt dabei auch Energy Harvesting Module zur Eigenenergieerzeugung und wird am Markt als ZigBee Green Power (ZGP) angeboten.

ZigBee unterstützt grundsätzlich ein Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit – allerdings wurden in der Vergangenheit entsprechende Sicherheitsmängel entdeckt. Mit der Version 3.0 wird angestrebt, die Datensicherheit zu erhöhen.

## 4.2.11 Z-Wave

Das Z-Wave-Protokoll wurde mit dem Ziel der funkbasierten Vernetzung von Komponenten in Gebäuden geschaffen. Hauptanwendungsgebiet für das Z-Wave-Protokoll ist die Gebäudeautomation.

Z-Wave nutzt in Europa eine Übertragungsfrequenz von 868,3 MHz und liegt damit im für die Übertragung von kurzen Informationen geschaffenen SRD-Frequenzband (siehe Kapitel 4.1). Die übertragbare Datenrate liegt bis 100 kbit/s. Die Paketgröße liegt bis zu 64 Byte. Die Latenzzeiten für einen einzelnen funkbasierten Übertragungsweg sind so gering, dass sie auch beim Einsatz von relativ zeitkritischen Sensoren wie Tastern vom Menschen nicht wahrgenommen werden. Da das Z-Wave Protokoll Mesh-fähig ist, kann die End-to-End-Übertragung über eine Vielzahl von Zwischenverbindungen erfolgen, bei der sich dann die Gesamtlatenzzeit entsprechend erhöht. Die maximale Reichweite in Gebäuden liegt bei ca. 30 m. Durch die Mesh-Topologie kann sich das Netzwerk deutlich vergrößern. Dabei muss beachtet werden, dass vermittelnde Knoten einen höheren Energiebedarf haben. Die Sendeleistung ist gemäß der Spezifikation des genutzten Frequenzbandes auf maximal 25 mW beschränkt.

Das Z-Wave-Protokoll ist spezifiziert, wobei nur Mitgliedsfirmen der Z-Wave Alliance die Dokumentation erhalten.

Z-Wave-Geräte können sowohl untereinander als mit einer übergeordneten Infrastruktur kommunizieren.

Die Einbindung von Z-Wave-Geräten in Controller der Gebäudeautomation (DDC-Systeme) ist theoretisch nur über die zusätzliche Verwendung eines Z-Wave-IP-Gateways möglich. D.h. ZigBee-Pakete werden an ein LAN übertragen, in welches dann auch das DDC-System angeschlossen ist. Zusätzlich zu dieser grundsätzlichen Kopplung müssen sowohl Z-Wave-Geräte/Gateway als auch DDC-System die Informationen auch inhaltlich verarbeiten (z.B. durch beidseitige Nutzung eines Protokolls wie MQTT). Belastbare Projekterfolge im Umfeld der Gebäudeautomation größerer Liegenschaften sind derzeit nicht nachweisbar.

Sensoren für die Gebäudeautomation sind in großer Auswahl von vielen Herstellern kommerziell verfügbar. Dabei müssen in allen Produkten sogenannte Transceiver-Chips von Silicon Labs eingesetzt werden.

Eigenständige Mess- und Prüfgeräte für Z-Wave sind verfügbar.

In Bezug auf den Energiebedarf nutzen die üblichen Z-Wave-Sensoren Batteriebetrieb.

Z-Wave unterstützt grundsätzlich ein Verschlüsselungsverfahren zur Gewährleistung der Datensicherheit.

## 5 Eignungsvergleich der funkbasierten Übertragungsprotokolle

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 4.2 aufgeführten Protokolle gemäß den in Kapitel 3.2 ermittelten Anforderungen gegenübergestellt und bewertet. Dies erfolgt für jedes Protokoll in Form eines kurzen „Steckbriefs“. Die Erklärungen in den Steckbriefen werden bewusst knapp ausgeführt, aber lassen sich mit den ausführlicheren Beschreibungen zu jedem Protokoll in Kapitel 4.2 nachvollziehen. Im Anschluss erfolgt eine Gesamtübersicht der Ergebnisse.

### 5.1 Protokoll-Steckbriefe

Zu jedem Protokoll erfolgt eine ganzheitliche Eignungsbewertung. Diese erfolgt nach folgendem Schema:

- Zu jedem aufgeführten Kriterium wird die gemäß 3.2 zugeordnete Punktzahl notiert (z.B. bei „Herstellerabhängigkeit“ 0 Punkte bei „Gering“, 1 Punkt bei „Mittel“ und 2 Punkte bei „Hoch“)
- Die Gesamtpunktzahl pro Protokoll wird erfasst und durch die Anzahl der Kriterien geteilt. Damit ergibt sich die ganzheitliche Eignung wie folgt:

Ø Punktzahl	Ganzheitliche Eignung
0,0 bis $\leq$ 0,5	Gering
0,5 bis $\leq$ 1,5	Mittel
1,5 bis 2,0	Hoch

- Dabei wird die ganzheitliche Eignung auf den Eignungswert des K.O.-Kriteriums „Eignung des Frequenzbandes“ herabgestuft. D.h. ein Übertragungsprotokoll kann keine bessere Bewertung erhalten, als es in Bezug auf die Eignungsbewertung des Frequenzbandes erhalten hat.

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>5G</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Unnötig hohe Datenrate sowie unnötig hohe Reichweite; damit in Konsequenz unnötig hoher Energiebedarf von Sensoren.	Gering (0 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Grundsätzlich geringe Herstellerabhängigkeit; dabei Abhängigkeit von Betreiber und kostenpflichtigen Diensten.	Mittel (1 Punkt)
<b>Infrastruktur</b> Keine eigene Infrastruktur erforderlich, da diese über einen Betreiber zur Verfügung gestellt wird.	Keine eigene Infrastruktur (2 Punkte)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Sensoren für die Gebäudeautomation derzeit kommerziell nicht verfügbar.	Gering (0 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar, aber hochpreisig und kompliziert in der Anwendung.	Mittel (1 Punkt)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batteriebetrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Derzeit als grundlegendes funkbasiertes Protokoll für die Gebäudeautomation nicht sinnvoll aufgrund mangelnder Eignung des Frequenzbandes.	<b>Gering (wg. K.O.-Kriterium)</b>

<b>BLE (Bluetooth Low Energy)</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate, Reichweite und Latenzzeit im erforderlichen Bereich.	Hoch (2 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Grundsätzlich standardisiertes Protokoll. Dabei sind Komponenten untereinander nicht komplett kompatibel/interoperabel.	Mittel (1 Punkt)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine eigene Infrastruktur aufzubauen. Dabei kann der Aufwand durch Nutzung von Mesh-Technologie reduziert werden.	Infrastruktur/ Mesh (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme sowohl direkt als auch über ein IP-basiertes Netzwerk möglich. Dabei Vielzahl von Substandards und somit realistischere Einschränkungen bei einer herstellerübergreifenden Integration	Mittel (1 Punkte)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Ein eingeschränktes Angebot an Sensoren für die Gebäudeautomation ist kommerziell verfügbar.	Mittel (1 Punkt)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar und einfach zu bedienen.	Hoch (2 Punkte)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batterie- betrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Grundlegende Eignung gegeben. Derzeit sind die eingeschränkte Interoperabilität, die fehlende direkte Integrationsfähigkeit, das geringe marktverfügbare Angebot an Komponenten für die Gebäudeautomation sowie der fehlende energieautarke Betrieb die größten Defizite.	<b>Mittel</b> (Ø 1,4 Punkte)

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>EnOcean</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate, Reichweite und Latenzzeit im erforderlichen Bereich.	Mittel (2 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Standardisiertes Protokoll.	Gering (2 Punkte)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine Backbone-Infrastruktur aufzubauen.	Infrastruktur (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme sowohl direkt als auch über ein IP-basiertes Netzwerk möglich.	Hoch (2 Punkte)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Ein ausgesprochen hohes Angebot an Sensoren für die Gebäudeautomation ist kommerziell verfügbar.	Hoch (2 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar und einfach zu bedienen.	Hoch (2 Punkte)
<b>Spannungsversorgung</b> Für Sensoren wird grundsätzlich eine Eigenenergieversorgung (Energy Harvesting) genutzt.	Eigenenergieversorgung (2 Punkte)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Durchgehend hohe Eignung.	<b>Hoch</b> (Ø 1,9 Punkte)

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>KNX RF</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate, Reichweite und Latenzzeit im erforderlichen Bereich.	Hoch (2 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Standardisiertes Protokoll.	Gering (2 Punkte)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine Backbone-Infrastruktur aufzubauen.	Infrastruktur (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein KNX-TP- basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Ein eingeschränktes Angebot an Sensoren für die Gebäudeautomation ist kommerziell verfügbar.	Mittel (1 Punkt)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind nicht verfügbar bzw. üblich. Zu Messungen und Prüfungen muss eine kabelbasierte Verbindung zu den funkbasierten Schnittstellen aufgebaut werden.	Mittel (1 Punkt)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batterie- betrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Grundlegende Eignung gegeben. Derzeit sind die fehlende direkte Integrationsfähigkeit, das eingeschränkte marktverfügbare Angebot an Komponenten für die Gebäudeautomation, das eingeschränkte Angebot an Mess-/Prüfgeräten sowie der fehlende energieautarke Betrieb die größten Defizite.	<b>Mittel</b> (Ø 1,4 Punkte)

<b>LoRa</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate und Latenzzeit im erforderlichen Bereich; Paketgröße unnötig groß und Reichweite unnötig hoch. (Bezug auf LoRa mit Spreadingfaktor 7)	Mittel (1 Punkt)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Kein standardisiertes Protokoll. Zusätzlich müssen für die Produktion der Komponenten Module eines Herstellers verwendet werden.	Hoch (0 Punkte)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine Backbone-Infrastruktur aufzubauen. Alternativ werden in manchen Ballungszentren LoRa-Netzwerke betrieben, aber damit besteht dann die Abhängigkeit zu einem Betreiber.	Infrastruktur (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Marktverfügbares Angebot zunehmend aber Auswahl noch auf geringem Niveau; Akteure für die Gebäudeautomation derzeit kommerziell nicht verfügbar.	Mittel (1 Punkt)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar, aber kompliziert in der Anwendung.	Mittel (1 Punkt)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batteriebetrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Grundlegende Eignung gegeben. Derzeit sind Herstellerabhängigkeit, die fehlende direkte Integrationsfähigkeit, das geringe marktverfügbare Angebot an Komponenten für die Gebäudeautomation, das eingeschränkte Angebot an Mess-/Prüfgeräten sowie der fehlende energieautarke Betrieb die größten Defizite.	<b>Mittel</b> (Ø 1,0 Punkte)

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>NB-IoT</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Unnötig hohe Datenrate sowie unnötig hohe Reichweite; damit in Konsequenz unnötig hoher Energiebedarf von Sensoren; hohe Latenzzeiten.	Gering (0 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Grundsätzlich geringe Herstellerabhängigkeit; dabei Abhängigkeit von Betreiber und kostenpflichtigen Diensten.	Mittel (1 Punkt)
<b>Infrastruktur</b> Keine eigene Infrastruktur erforderlich, da diese über einen Betreiber zur Verfügung gestellt wird.	Keine eigene Infrastruktur (2 Punkte)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Sensoren für die Gebäudeautomation derzeit kommerziell nicht verfügbar.	Gering (0 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar, aber hochpreisig und kompliziert in der Anwendung.	Mittel (1 Punkt)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batteriebetrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Derzeit als grundlegendes funkbasiertes Protokoll für die Gebäudeautomation nicht sinnvoll aufgrund mangelnder Eignung des Frequenzbandes.	<b>Gering (wg. K.O.-Kriterium)</b>

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>Sigfox</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Unnötig hohe Datenrate sowie unnötig hohe Reichweite; damit in Konsequenz unnötig hoher Energiebedarf von Sensoren; hohe Latenzzeiten; Beschränkung der möglichen Sendehäufigkeit.	Gering (0 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Kein standardisiertes Protokoll. Zusätzlich müssen für die Produktion der Komponenten Module eines Herstellers verwendet werden; ebenso besteht eine Abhängigkeit aufgrund von nur einem Betreiber der Infrastruktur.	Hoch (0 Punkte)
<b>Infrastruktur</b> Keine eigene Infrastruktur erforderlich, da diese über einen Betreiber zur Verfügung gestellt wird.	Keine eigene Infrastruktur (2 Punkte)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Sensoren für die Gebäudeautomation derzeit kommerziell nicht verfügbar.	Gering (0 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar aber kompliziert in der Anwendung.	Mittel (1 Punkt)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batteriebetrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Derzeit als grundlegendes funkbasiertes Protokoll für die Gebäudeautomation nicht sinnvoll aufgrund mangelnder Eignung des Frequenzbandes.	<b>Gering (wg. K.O.-Kriterium)</b>

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>Thread</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate, Reichweite und Latenzzeit im erforderlichen Bereich.	Hoch (2 Punkt)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Standardisiertes Protokoll.	Gering (2 Punkte)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine eigene Infrastruktur aufzubauen. Dabei kann der Aufwand durch Nutzung von Mesh-Technologie reduziert werden.	Infrastruktur/ Mesh (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Derzeit ist nur ein stark eingeschränktes Angebot an Sensoren für die Gebäudeautomation kommerziell verfügbar.	Gering (0 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind nicht verfügbar bzw. üblich. Zu Messungen und Prüfungen muss eine kabelbasierte Verbindung zu den funkbasierten Schnittstellen aufgebaut werden.	Mittel (1 Punkt)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batterie- betrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Grundlegende Eignung gegeben. Derzeit sind die fehlende direkte Integrationsfähigkeit, das geringe marktverfügbare Angebot an Komponenten für die Gebäudeautomation, das eingeschränkte Angebot an Mess-/Prüfgeräten sowie der fehlende energieautarke Betrieb die größten Defizite.	<b>Mittel</b> (Ø 1,3 Punkte)

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>WLAN</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Unnötig hohe Datenrate; damit in Konsequenz unnötig hoher Energiebedarf von Sensoren; Energieverbrauch aufgrund der relativ hohen Sendeleistung im 2,4 GHz-Frequenzband kritisch.	Gering (0 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Standardisiertes Protokoll.	Gering (2 Punkte)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine Backbone-Infrastruktur aufzubauen.	Infrastruktur/ Mesh (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Sensoren für die Gebäudeautomation derzeit kommerziell kaum verfügbar.	Gering (0 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar und einfach zu bedienen.	Hoch (2 Punkte)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batterie- betrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Derzeit als grundlegendes funkbasiertes Protokoll für die Gebäudeautomation nicht sinnvoll aufgrund mangelnder Eignung des Frequenzbandes.	<b>Gering (wg. K.O.- Kriterium)</b>

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>ZigBee / ZGP</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate, Reichweite und Latenzzeit im erforderlichen Bereich.	Hoch (2 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Teilweise standardisiertes Protokoll; dabei firmenspezifische Implementierungen; geringe Interoperabilität zwischen Komponenten unterschiedlicher Hersteller.	Mittel (1 Punkt)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine eigene Infrastruktur aufzubauen. Dabei kann der Aufwand durch Nutzung von Mesh-Technologie reduziert werden.	Infrastruktur/ Mesh (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Ein eingeschränktes Angebot an Sensoren für die Gebäudeautomation ist kommerziell verfügbar.	Mittel (1 Punkt)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar und einfach zu bedienen.	Hoch (2 Punkte)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb. Nur teilweise ist eine Eigenenergieversorgung möglich.	Batterie- betrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung. Dabei bestanden in früheren Versionen Sicherheitslücken, die mit der aktuellen Version 3.0 behoben werden sollen.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Grundlegende Eignung gegeben. Derzeit sind die nicht einheitliche Implementierung (d.h. Herstellerabhängigkeit), die fehlende direkte Integrationsfähigkeit sowie das eingeschränkte marktverfügbare Angebot an Komponenten für die Gebäudeautomation die größten Defizite.	<b>Mittel</b> (Ø 1,4 Punkte)

# „Smart Buildings“ sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

<b>Z-Wave</b>	
<b>Entscheidungskriterium</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Eignung des Frequenzbandes (K.O.-Kriterium)</b> Datenrate, Reichweite und Latenzzeit im erforderlichen Bereich.	Hoch (2 Punkte)
<b>Herstellerabhängigkeit</b> Firmenspezifische standardisiertes Protokoll; dabei nicht einheitliche Implementierungen; eingeschränkte Interoperabilität zwischen Komponenten unterschiedlicher Hersteller.	Mittel (1 Punkt)
<b>Infrastruktur</b> Zur Einbindung von Sensordaten ist eine eigene Infrastruktur aufzubauen. Dabei kann der Aufwand durch Nutzung von Mesh-Technologie reduziert werden.	Infrastruktur/ Mesh (1 Punkt)
<b>Integrationsfähigkeit</b> Einbindung von Sensordaten an DDC-Systeme nur über den Umweg über ein IP-basiertes Netzwerk (d.h. keine direkte Anbindung üblich).	Mittel (1 Punkt)
<b>Markverfügbares Angebot von konkreten Komponenten</b> Ein hohes Angebot an Sensoren für die Gebäudeautomation ist kommerziell verfügbar.	Hoch (2 Punkte)
<b>Mess- und Prüfmöglichkeiten</b> Eigenständige funkbasierte Mess- und Prüfgeräte sind verfügbar und einfach zu bedienen.	Hoch (2 Punkte)
<b>Spannungsversorgung</b> Sofern Sensoren nicht an einer festen Spannungsquelle angeschlossen sind, erfolgt die Energieversorgung über Batteriebetrieb.	Batterie- betrieb (1 Punkt)
<b>Verschlüsselung</b> Unterstützung von verschlüsselter Informationsübertragung.	Hoch (2 Punkte)
<b>Ganzheitliche Bewertung der Eignung</b> Grundlegende Eignung gegeben. Derzeit sind die nicht einheitliche Implementierung (d.h. Herstellerabhängigkeit), die fehlende direkte Integrationsfähigkeit sowie der fehlende energieautarke Betrieb die größten Defizite.	<b>Hoch</b> (Ø 1,5 Punkte)

# Smart Buildings' sowie Vergleich funkbasierter Übertragungsprotokolle

## 5.2 Ergebnisübersicht

Kriterium	5G	BLE	EnOcean	KNX RF	LoRa	NB-IoT	Sigfox	Thread	WLAN	ZigBee	Z-Wave
Eignung des Frequenz-bandens (K.O.-Krit.)	Gering	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Gering	Gering	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Hersteller-abhängigkeit	Mittel	Mittel	Gering	Gering	Hoch	Mittel	Hoch	Gering	Gering	Mittel	Mittel
Infrastruktur	Keine eigene Infrastruktur	Infrastruktur/ Mesh	Infrastruktur	Infrastruktur	Infrastruktur	Keine eigene Infrastruktur	Keine eigene Infrastruktur	Infrastruktur/ Mesh	Infrastruktur/ Mesh	Infrastruktur/ Mesh	Infrastruktur/ Mesh
Integrations-fähigkeit	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel						
Markt-verfügbares Angebot	Gering	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel	Gering	Gering	Gering	Gering	Mittel	Hoch
Mess- und Prüfmöglich-keiten	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Spannungs-versorgung	Batterie-betrieb	Batterie-betrieb	Eigen-energie-versorgung	Batterie-betrieb	Batterie-betrieb						
Ver-schlüsselung	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Ganzheitliche Eignung	<b>Gering</b> (KO-Krit.)	<b>Mittel</b> (Ø 1,4 Pt)	<b>Hoch</b> (Ø 1,9 Pt)	<b>Mittel</b> (Ø 1,4 Pt)	<b>Mittel</b> (Ø 1,0 Pt)	<b>Gering</b> (KO-Krit.)	<b>Gering</b> (KO-Krit.)	<b>Mittel</b> (Ø 1,3 Pt)	<b>Gering</b> (KO-Krit.)	<b>Mittel</b> (Ø 1,4 Pt)	<b>Hoch</b> (Ø 1,5 Pt)

## 6 Fazit

Für Anwendungen im Umfeld der Gebäudeautomation stehen viele funkbasierte Protokolle zur Verfügung. Welche davon mehr oder weniger geeignet sind, lässt sich nur im Vergleich mit den erforderlichen Anwendungsfällen (den „use cases“) ermitteln.

In dieser Beziehung hat sich ergeben, dass die sogenannten „Wide Area Networks“ für die aktuellen und zukünftigen Anwendungen in Smart Buildings ungeeignet sind. Diese Protokolle haben dann Vorteile, wenn es um die Anbindung von Komponenten im öffentlichen Bereich geht - also dort, wo keine eigene Infrastruktur aufgebaut werden kann. In modernen Gebäuden hingegen ist der Aufbau von eigener Infrastruktur bzw. Einführung von Mesh-Netzwerken kein großes Problem und hinsichtlich der Sensordichte auch sinnvoll.

Unter den damit noch verbleibenden verfügbaren Protokollen ergeben sich weitere Abstufungen. Eine besondere Bedeutung erhält das Kriterium, Komponenten (insbesondere Sensoren) in die Systeme der Gebäudeautomation (d.h. Controller bzw. DDC-Systeme) einbinden zu können. Eine entsprechende Unterstützung für das jeweilige Protokoll durch Hersteller von Controllern hat damit eine hohe Priorität. Parallel ist es zwingend erforderlich, eine hohe Auswahl an Komponenten kommerziell beziehen zu können. Letztlich hat ein eigenenergieversorgender Betrieb, d.h. der Betrieb von Komponenten ohne externe Spannungsversorgung bzw. Batterie, deutliche Vorteile.

Unter diesen Gesichtspunkten konnte für die Protokolle EnOcean und Z-Wave eine jeweils hohe Eignung für die Anwendung in „Smart Buildings“ ermittelt werden. Innerhalb dieser beiden Protokolle erreichte dabei EnOcean einen Mittelwert von 1,9 Punkten gefolgt von Z-Wave mit 1,5 Punkten.

## 7 Quellen

Kürzel	Quelle
[AN1141]	AN1141: Thread Mesh Network Performance; Silicon Labs; 2019
[Becker 2007]	Energieeffizienz durch Einsatz von Raum- und Gebäudeautomation mit Bezug zur DIN V 18599 und EN 15232, Martin Becker; Vortrag zur GLT Anwendertagung; 2007
[de 2012]	Aufbau, Test und Optimierung einer Funkverbindung; dresden elektronik; 2012
[EN15232 2017]	DIN EN 15232-1 Energieeffizienz von Gebäuden; Beuth Verlag GmbH; 2017
[EnO 2019]	EnOcean Serial Protocol 3 (ESP3); EnOcean GmbH; 2019
[EnO 2020]	<a href="https://www.enocean-alliance.org/de/">https://www.enocean-alliance.org/de/</a> ; EnOcean Alliance; 2020
[Hüttemann 2020]	Trends von Raumautomation und Building Management Systemen in modernen Bürogebäuden; Dominik Hüttemann; 2020
[IGT 2015]	Fragebogen „Planungsprozess Smart Home & Smart Office“; Institut für Gebäudetechnologie; 2015
[IGT 2019]	Planungsprozess(BMS-IoT)-Checkliste, Institut für Gebäudetechnologie; 2019
[InfoTip 2020]	Bluetooth Kompendium; InfoTip Service GmbH ( <a href="https://kompendium.infotip.de/bluetooth.html">https://kompendium.infotip.de/bluetooth.html</a> ); 2020
[Kabitzsch 2015]	Drahtlose und Drahtgebundene Sensor-Aktor-Netzwerke; Prof. Klaus Kabitzsch; TU Dresden; 2015
[KNX 2013]	Grundlagen zum KNX Standard; KNX Organisation; 2013
[KNX 2015]	Systemdokumentation KNX RF; Giersiepen GmbH & Co. KG; 2015
[LoRa 2020]	<a href="https://loro-alliance.org/">https://loro-alliance.org/</a> ; LoRa Alliance; 2020
[Pötsch 2019]	Towards End-to-End Latency of LoRaWAN: Experimental Analysis and IoT Applicability; Albert Pötsch, Florian Hammer; IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS) 2019
[Pätz 2017]	Dr. Christian Pätz; Z-Wave: Die Funktechnologie für das Smart Home; 2017
[Rick 2017]	Analyse bestehender Smart Home Systeme mit dem besonderen Fokus auf das Schlüsselmanagement; Thorsten Rick; Hochschule Bonn-Rhein-Sieg; 2017
[Seungku 2020]	An Adaptive Spreading Factor Selection Scheme for a Single Channel LoRa Modem; Kim Seungku, Lee Heonkook, Jeon Sungho; 2020
[Spörk et al 2019]	Improving the Timeliness of Bluetooth Low Energy in Noisy RF Environments; Michael Spörk, Carlo Alberto Boano, Kay Römer (Graz University of Technology); 2019
[Thread 2015]	Thread Usage of 6LoWPAN, Silicon Labs; 2015
[ZigBee 2020]	<a href="https://zigbeealliance.org/de/">https://zigbeealliance.org/de/</a> ; ZigBee Alliance; 2020
[Z-Wave 2020]	<a href="https://z-wavealliance.org/">https://z-wavealliance.org/</a> ; Z-Wave Alliance; 2020