

Technische Universität Dortmund
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet IT in Produktion und Logistik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Projektarbeit

Analyse unterschiedlicher Funkstandards des Smart Home Sektors für den Einsatz in vernetzten Einzelraumregelungen

Name: Felix Ralf Biallas
Matrikelnummer: 205526
Ausgegeben am: 01.11.2021
Eingereicht am: 24.01.2022
Betreuer: Dr.-Ing. Julian Eichhoff,
Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Anne Antonia Scheidler,
M. Sc. Sean Paul Christiansen-Lenger

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Einführung in die Einzelraumregelung und in das Smart Home	4
2.1 Einzelraumregelung und Smart Home	4
2.2 Technische Grundlagen zur Datenübertragung durch Funk	6
2.3 Smart Home Funkstandards	10
2.4 Stand der Forschung zu Funkreichweiten im Gebäude	13
3 Versuchsaufbau und -durchführung	15
3.1 Verwendete Geräte	15
3.2 Freifeldmessung	18
3.3 Reichweitenmessung im Gebäude	19
3.4 Langzeitmessung	24
3.5 Auswertungsmethoden	25
4 Auswertung der Funkstandarduntersuchung	27
4.1 Freifeldmessung	27
4.2 Gebäudemessungen	29
4.3 Temperaturmessung	36
4.4 Zusammenfassung	39
4.5 Fazit	42
5 Zusammenfassung und Ausblick	44
Literaturverzeichnis	45
Anhang	49
Anhang A	49
Anhang B	53
Anhang C	57
Anhang D	59
Anhang E	61

Abkürzungsverzeichnis

EZR	-	Einzelraumregelung
RT	-	Raumthermostat
FHKSa	-	Funk-Heizkörperstelantriebe
H.A.	-	Herstellerangaben
E.H.	-	Energy Harvesting
CEPT	-	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
IEEE	-	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CSA	-	Connectivity Standards Alliance
e.i.r.p.	-	equivalent isotropically radiated power

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Allgemeiner Aufbau eines Heizungssystems [9]	4
Abbildung 2.2: Netzwerktopologien im Smart Home in Anlehnung an [10]	6
Abbildung 2.3: Einordnung der Frequenzbereiche der drahtlosen Kommunikation	6
Abbildung 3.1: WiButler Zentrale (links) [58], Oventrop mote420 (Mitte) [59] und ViCare Heizkörper Thermostat (rechts) [52]	16
Abbildung 3.2: homee Brain Cube (links) [63], homee EnOcean Cube (Mitte) [64], homee Z-Wave Cube (rechts) [65]	16
Abbildung 3.3: Fritz!Box 7590 (oben) [61] und Fritz!DECT 301 (unten) [62].....	17
Abbildung 3.4: Afriso AVD 30 (oben) [50], Devolo Connect Heating Thermostat (unten) [51].....	17
Abbildung 3.5: Apple Home Pod mini (links) [66] und eve Thermo (rechts) [67]	18
Abbildung 3.6: Ort der Freifeld-Messungen	18
Abbildung 3.7: Beispielhafter Aufbau und Ablauf der Freifeld Funkreichweite.....	19
Abbildung 3.8: Schematischer Aufbau der Reichweitenmessung im Gebäude	20
Abbildung 3.9: Vereinfachte Darstellung der Grundrisse des Hauses bis 200 m ² Wohnfläche	21
Abbildung 3.10: Vereinfachte Darstellung der Grundrisse des Hauses bis 400 m ² Wohnfläche	22
Abbildung 3.11: Smart Home Zentralen im Haus bis 400 m ² Wohnfläche	23
Abbildung 3.12: Vereinfachte Darstellung der Grundrisse des Hauses bis 400 m ² Wohnfläche	24
Abbildung 3.13: Anordnung der Stellantriebe und des Referenzmessmittels.....	24
Abbildung 4.1: Ergebnis der Reichweitenmessung im Gebäude bis 200 m ² Wohnfläche.....	29
Abbildung 4.2: Messstellenabdeckung im Haus bis 200 m ² Wohnfläche.....	31
Abbildung 4.3: Messstellenabdeckung bei der ersten Messung im Haus bis 400 m ² Wohnfläche.....	32
Abbildung 4.4: Messstellenabdeckung bei der zweiten Messung im Haus bis 400 m ² Wohnfläche...	34
Abbildung 4.5: Zusammenfassung aller Ergebnisse der drei Reichweitenmessungen im Gebäude....	35
Abbildung 4.6: Zeitlich gemessener Raumtemperaturverlauf	37
Abbildung 4.7: Zeitliche Verläufe der Temperaturabweichungen der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren.....	37
Abbildung 4.8: Zeitlicher Raumtemperaturverlauf mit angepasstem Offset	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Dämpfungsgrade unterschiedlicher Wandmaterialien bei unterschiedlichen Frequenzen [14].....	8
Tabelle 2.2: Vergleichstabelle der Funkstandards auf Basis der vorgestellten Daten.....	12
Tabelle 3.1: Für die Versuche verwendete Komponenten [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55]	15
Tabelle 3.2: Vorstellung der Auswertungsmatrix (nicht ausgefüllt)	26
Tabelle 4.1: Ergebnisse der Freifeld-Reichweitenmessungen im Vergleich zu den Werten aus Tabelle 3.1 und Tabelle 2.2	27
Tabelle 4.2: Maximale positive und negative Abweichungen sowie zeitliche gemittelte Abweichungen der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren zur Referenzmessung	36
Tabelle 4.3: Zusammenfassende Platzierung der sechs untersuchten Geräte.....	39
Tabelle 4.4: Gesamt Auswertung der Messergebnisse mit der in Kapitel 3.5 beschriebenen Methode	41

1 Einleitung

Die Heizungsbranche befindet sich in einem sehr dynamischen Wandel, der eine Vielzahl an Herausforderungen mit sich bringt. Auf der einen Seite steigen die Energiepreise fossiler Energieträger [1]. Auf der anderen Seite ergibt sich mit dem 2019 durch die Europäische Union ausgerufenen „European Green Deal“, welcher Klimaneutralität aller Mitgliedsstaaten bis 2050 fordert, ein Zwang zur Dekarbonisierung von Heizungstechnologien und eine damit eng verbundene Elektrifizierung von neuen Heizungssystemen [2]. Darüber hinaus wächst die Zahl und damit der Markt der, unter dem Begriff Smart Home zusammengefassten, vernetzten Produkte in privaten Haushalten in der EU stark [3].

Die Raumwärme machte 2019 68,2 % des gesamten Energieverbrauchs in Wohngebäuden aus [4]. Eine Effizienzsteigerung im Bereich der Bereitstellung von Raumwärme hat dementsprechend einen großen Einfluss auf den Energiehaushalt und –verbrauch eines Wohngebäudes und unterstützt gleichzeitig die Dekarbonisierung der Heizungssysteme. Eine Möglichkeit für Hersteller von Heizungssystemen die Effizienzsteigerung der Raumwärmebereitstellung zu erreichen und gleichzeitig an der voranschreitenden Vernetzung des Haushaltes teilzunehmen, sind vernetzte Einzelraumregelungen (EZR). Diese Systeme können im Vergleich zu herkömmlichen Heizungssystemen bis zu 30% Energieeinsparungen erzielen [3]. Heizungssysteme werden durch Heizkreise strukturiert. An diese Heizkreise sind die Wärmeüberträger von mehreren Räumen eines Gebäudes angeschlossen. Dabei wird zwischen zwei Methoden der Wärmeübertragung unterschieden. Zum einen gibt es Flächenheizungen, wie Fußbodenheizungen oder Wandheizungen, und zum anderen gibt es Heizkörper, wie Radiatoren und Konvektoren [5]. Geregelt werden die Vorlauftemperaturen und der Wärmebedarf eines Heizkreises bei herkömmlichen Heizungssystemen über einen zentralen Umgebungstemperaturfühler. EZR hingegen verwenden Raumthermostate (RT) in jedem Raum. Diese RT sind mit Ventilstellantrieben an den Wärmeüberträgern vernetzt und regeln so bedarfsgerecht die Raumtemperatur in jedem Raum [7]. Des Weiteren können durch Nutzung einer zentralen Regelungseinheit zum Beispiel durch einen Algorithmus ein automatischer hydraulischer Abgleich durchgeführt werden [6] oder individuell angepasste Heizzeiten eingestellt werden, ohne dass diese durch den Nachtabsenkungsbetrieb der Heizung oder durch manuelles Einstellen am Raumthermostat begrenzt sind.

In Heizungssystemen werden, wie schon beschrieben, hauptsächlich zwei unterschiedliche Wärmeübertragungsarten verbaut. Vor allem die Einbindung von Heizkörpern in eine EZR stellt eine große Herausforderung dar, da anders als bei Flächenheizungen die Ventilsteuerköpfe frei im Raum stehen und deshalb ohne Kabel und dementsprechend per Funk betrieben werden sollen [7]. Hier bietet der Smart Home Sektor verschiedene Funkstandards, auf die Entwickler, einer über Funk kommunizierenden EZR für Heizkörper, zurückgreifen können [8]. Die Entscheidung, welcher dieser Funkstandards für eine Funklösung der EZR eingesetzt werden sollte, ist dabei von vielen Eigenschaften der Funkstandards abhängig. Eine wesentliche Eigenschaft dieser Funkstandards ist die tatsächliche Funkreichweite in Gebäuden, die den typischen Anwendungsfällen der Heizsysteme entsprechen. Hierbei ist eine hohe Reichweite trotz Hindernissen und nicht optimalen Umgebungsbedingungen gewünscht. Des Weiteren ist die Genauigkeit der in den Funk-Heizkörperstellantrieben (FHKSa) integrierten Temperatursensoren ein wichtiger Faktor bei der Raumtemperatur-Regelung sowie beim

Ziel der Energieeffizienzsteigerung durch die Kommunikation von EZR und Heizungsregelung. Ein mit Heizkörpern beheizter Raum kann abhängig von der Raum- und Heizkörpergröße schnell auf die Solltemperatur aufgeheizt werden. Zu große Abfragezyklen können dabei zu Ungenauigkeiten und einer zeitweise zu hohen Raumtemperatur und Heizkreisvorlauftemperatur führen. Aber auch Ungenauigkeiten des Sensors können zu überhöhten Raumtemperaturen mit daraus resultierenden überhöhten Energiekosten oder aber unterkühlten Räumen führen. Unabhängige Informationen über diese beiden Faktoren aus Feldversuchen oder Empfehlungen zu den Funkstandards für Entwickler einer EZR Funklösung existieren dabei nicht.

Mit dieser Arbeit wird eine Informationsbasis zu den beiden genannten Faktoren geschaffen und daraus eine Empfehlung für Entwickler einer EZR Funklösung bezüglich der Eignung einzelner Funkstandards für eine solche Lösung in Bezug auf die untersuchten Faktoren formuliert. Dafür werden im Verlauf dieser Arbeit Funk-Heizkörperperventilthermostate, welche mit den unterschiedlichen Funkstandards des Smart Home Sektors ausgestattet sind, zusammen mit etablierten Smart-Home-Zentralen in Experimenten auf die tatsächliche Funkreichweite in Gebäuden und die Messgenauigkeit der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren untersucht. Im Fokus stehen dabei die folgenden fünf im Smart Home Markt etablierten Funkstandards:

- WLAN/ DECT
- ZigBee
- Z-Wave
- Thread
- EnOcean

Der Funkstandard EnOcean wird auf Grund von zwei unterschiedlichen Möglichkeiten der Energieversorgung mit zwei Stellantrieben untersucht. Ein batteriebetriebener Antrieb und einer mit einem integrierten Modul, welches durch externe Energieeinwirkungen eine elektrische Leistung erzeugt, die für die Stromversorgung des Stellantriebs ausreicht. Diese batterielose Methode der Energieversorgung wird „Energy Harvesting“ (E.H.) genannt. Hier fokussiert sich die Untersuchung auf die Frage, ob diese beiden Energieversorgungsansätze die Funkreichweite oder die Messgenauigkeit beeinflussen.

Insgesamt werden drei Experimente durchgeführt. Zum einen wird die Funkreichweite in Gebäuden untersucht und anschließend mit den Herstellerangaben (H.A.) oder, bei nicht vorhandenen H.A., mit Literaturwerten verglichen. Dies findet in drei Häusern statt. In einem Mehrfamilienhaus mit drei Etagen und sechs Parteien und zwei Einfamilienhäuser, die der Größe nach aufgeteilt sind in ein Haus mit bis zu 200 m² Wohnfläche und in einem Haus mit bis zu 400 m² Wohnfläche. Vor allem Störungen durch andere Funkgeräte und unterschiedliche Hindernisse, wie Wände, Decken oder sich in einem Wohnraum befindliche Gegenstände sollen die Messungen beeinflussen und dadurch Aufschluss über die tatsächliche Funkabdeckung unter realen Bedingungen im Wohnraum geben. Zudem wird die tatsächliche Freifeldfunkreichweite der FHKSa mit den Smart Home Zentralen untersucht. Diese Untersuchung dient als Referenz der Abweichung der H.A. und ist somit gegebenenfalls ein Hinweis auf Abweichung der tatsächlichen Funkreichweite von den H.A. im jeweiligen Gebäude. Abschließend wird in einer Langzeitumgebungstemperaturmessung mit einem Referenztemperatursensor untersucht,

wie schnell die in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren auf Veränderungen der Umgebungstemperatur reagieren und wie genau diese die Umgebungstemperatur messen.

Damit die Empfänger dieser Arbeit ein Verständnis für die im Verlauf dieser Arbeit erzielten Ergebnisse und den daraus gefolgerten Empfehlungen haben, wird zunächst in dem Kapitel „Einführung in die Einzelraumregelung und in das Smart Home“ darauf eingegangen, wie eine EZR in das Heizsystem eingliedert ist und wie diese mit einem Smart Home und den Smart Home Funkstandards zusammenhängt. Daraufhin werden die Grundlagen der Funktechnologie erläutert und häufige mit Smart Home Funkstandards verwendete Begriffe definiert. Anschließend werden die Eigenschaften der untersuchten Smart Home Funkstandards erläutert und tabellarisch zusammengefasst. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Überblick über bisherige Untersuchungen von Funktechnologien in Gebäuden. Darauf aufbauend wird in Kapitel „Versuchsaufbau und -durchführung“ darauf eingegangen, wie die Untersuchungen durchgeführt werden, welche FHKSa und welche Smart Home Zentralen genutzt werden, wo die Untersuchungen durchgeführt werden, wie die Gebäude, in denen die Untersuchungen durchgeführt werden, aufgebaut sind und wie die Ergebnisse am Ende zusammengefasst und ausgewertet werden. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt abschließend im Kapitel „Auswertung der Funkstandarduntersuchung“, in dem das Fazit gezogen wird. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung der Experimente und Ergebnisse sowie mit einem Ausblick auf weitere Experimente.

in Abbildung 2.1 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass das heiße Wärmeübertragungsmedium in mehrere Abnehmer fließt, die sogenannten Heizkreise. Mit einem Heizkreis wird dann meist eine Wärmeüberträgerart mit Wärme versorgt. Hier wird unterschieden zwischen Flächenheizung und Heizkörpern, die eine höhere Vorlauftemperatur benötigen. Die EZR greift dann bei den Durchlassventilen eines jeden Wärmeüberträgers in einem Heizkreis an und regelt hier je nach Regelungskonzept die Raumtemperatur in Bezug auf die voreingestellte Sollraumtemperatur. Grundsätzlich lassen sich EZR in drei üblicherweise eingesetzte Regelungskonzepte unterteilen. Zum einen existiert die EZR über die schon beschriebenen Thermostatventile. Diese steuern über das Heizkörperventil den Durchfluss in Abhängigkeit der Raumtemperatur und der Solltemperatur in binärer Form (An / Aus) über ein Bimetall im Ventilthermostat. Da sich die Thermostatventile direkt neben der Wärmequelle im Raum befinden, ist diese Art der Regelung nicht sehr genau. Eine genauere Alternative bieten Zweipunktregler mit elektrothermischen Antrieben sowie digitale Mikrorechnerregler mit Kleingetriebemotoren. Diese arbeiten jeweils in Verbindung mit einem RT, welches sich im Raum und nicht direkt bei der Wärmequelle befindet und regeln dadurch genauer die Raumtemperatur [7]. Verbindet man jede dieser drei EZR Konzepte über Kabel- oder Funkanbindung mit einer zentralen Steuerungseinheit, so wird diese Art der EZR im Folgenden als eine vernetzte EZR definiert. Weiter bietet diese vernetzte EZR neben der genauen Raumtemperaturregelung die Möglichkeit auf einen automatischen, hydraulischen Abgleich, die Vernetzung mit weiteren, auf die Raumtemperatur einflussnehmenden Geräten, wie der Verschattung, und eine weitere Komfort- und Effizienzsteigerung sowie eine Kostensenkung. Vor allem die Vernetzung der EZR mit weiteren Geräten, wie der schon erwähnten Verschattung und weiteren Geräten, findet durch eine sogenannte Smart Home Zentrale statt. Unter einem Smart Home ist dabei die Vernetzung von Sensoren und Aktoren mit einer zentralen Steuereinheit zu verstehen. Diese Smart-Home-Zentrale oder Smart-Home-Hub genannte Steuereinheit regelt dabei Prozesse im Haus, durch vorher einprogrammierte Automationen. Das Ziel der Installation eines Smart-Home-Systems ist die Reduktion des Energieverbrauchs sowie die Steigerung des Komforts im Wohnbereich. Die Vernetzung im Gebäude der mit Sensoren und Aktoren ausgestatteten Geräte findet entweder über Kabel oder über Funk statt. Der Funkkommunikation kommt dabei vor allem in Bestandsgebäuden, in denen keine Kabel verlegt werden sollen oder können eine große Bedeutung zu. Bei der Funkkommunikation haben sich, wie auch bei der kabelgebundenen Kommunikation, unterschiedliche Kommunikationsstandards etabliert, die auch Funkstandards genannt werden und für die Kommunikation der Geräte unterschiedlicher Hersteller wichtig ist.

Bei der Vernetzung der Geräte in einem Smart Home kann zwischen vier Netzwerktopologien unterschieden werden:

- Stern-Topologie
- Baum-Topologie
- Mesh-Topologie
- Selbstorganisierte Mesh-Topologie

Bei der Klassifizierung der Geräte in den Netzwerken wird zwischen Koordinatoren, Routern und Endgeräten unterschieden. Bei den meisten Smart Home Anwendungen ist der Koordinator in der Regel die Smart-Home-Zentrale, wird in der allgemeinen Betrachtung jedoch als ein Router erachtet, der das Netzwerk verwaltet. Bei einem Sternnetzwerk entfallen neben dem Koordinator weitere Router und der

Koordinator kommuniziert mit jedem Endgerät. Netzwerke mit Baum-Topologie bestehen in der Regel aus einem Koordinator, wenigen Routern und aus Endgeräten. Jedes Endgerät kommuniziert dabei mit einem Router, der mit dem Koordinator vernetzt ist. In der Mesh-Topologie sind die Router außerdem untereinander vernetzt und es ergibt sich somit die Möglichkeit, einen höheren Datentransfer durch die Nutzung alternativer Pfade zu erreichen [10]. Selbstorganisierte Mesh-Netzwerke sind außerdem unabhängig von einem spezifischen Koordinator. Sollte ein Koordinator ausfallen, so übernimmt ein anderer Router diese Aufgabe. Des Weiteren kommunizieren die Geräte untereinander und spannen somit ein möglichst effizientes Netzwerk auf [11]. Abbildung 2.2 bietet einen Überblick zu den unterschiedlichen Netzwerktopologien und zu den vorhandenen Geräten.

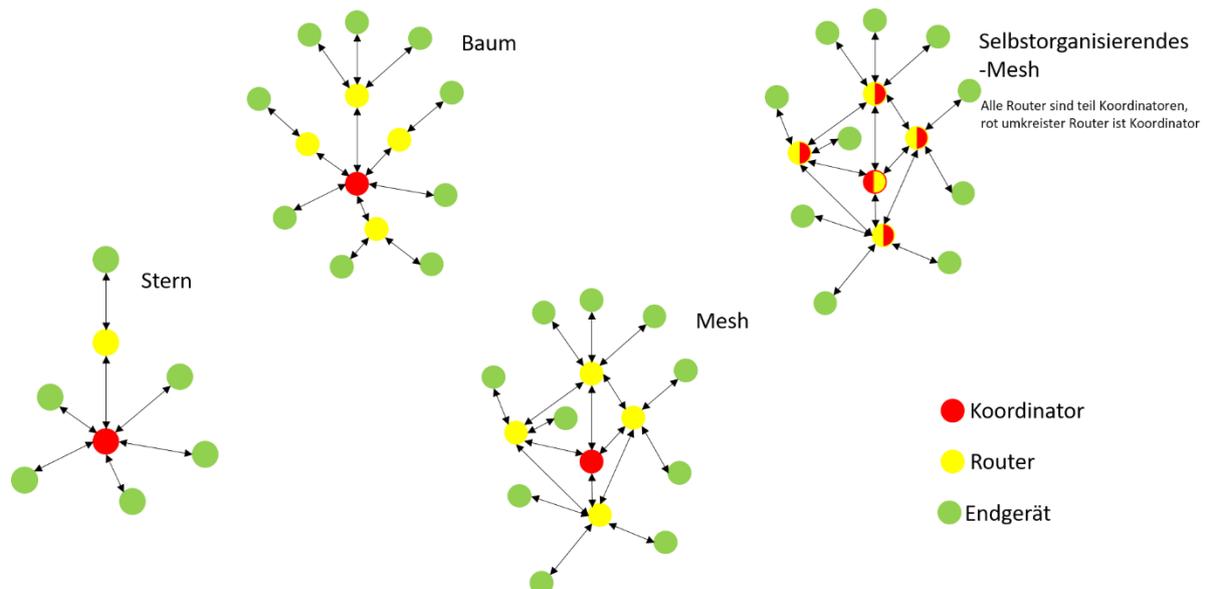


Abbildung 2.2: Netzwerktopologien im Smart Home in Anlehnung an [10]. Gegenüberstellung der Stern-, Baum-, Mesh- und selbstorganisierten Mesh-Netzwerktopologie

2.2 Technische Grundlagen zur Datenübertragung per Funk

Die Signalausbreitung im Bereich der Funkübertragung erfolgt durch elektromagnetische Wellen, wobei f die Frequenz, die zentrale Größe der Funkübertragung ist. c , die Lichtgeschwindigkeit ist dabei die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen und in einem Vakuum als $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ definiert. Des Weiteren gibt es λ , die Wellenlänge [12]. Die Frequenzen von elektromagnetischen Wellen können dabei von Größen wie 3 Hz in der Niederfrequenztechnik bis zu

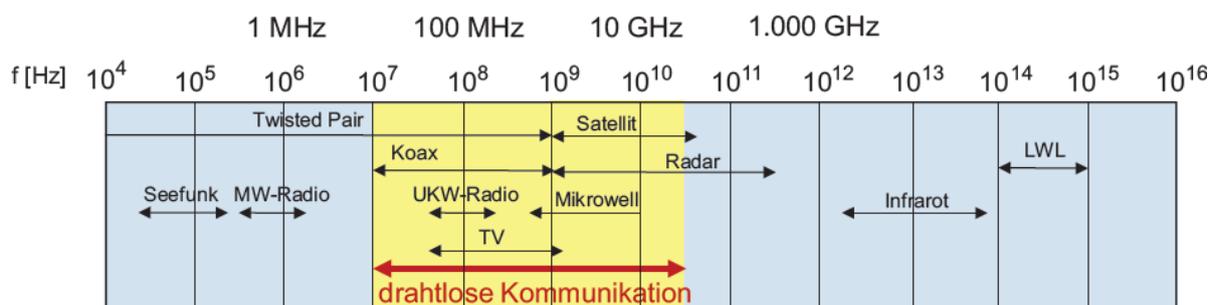


Abbildung 2.3: Einordnung der Frequenzbereiche der drahtlosen Kommunikation in der allgemein Darstellung des Frequenzbereichs von 10^4 bis 10^{16} Hz mit der Angabe von Anwendungsgebieten in unterschiedlichen Bereichen [12]

10^{22} Hz bei Gammastrahlungen reichen, wobei man bei letzterem üblicherweise die Umrechnung auf die Einheit Elektronen Volt [eV] vornimmt [13]. Da sich unterschiedliche Frequenzen für unterschiedliche Anwendungsbereiche eignen, werden diese üblicherweise in entsprechende Abschnitte eingeteilt. Entsprechend Abbildung 2.3 liegen die Frequenzen für die drahtlose Kommunikation zwischen 10 MHz und 10 GHz [12], wobei sich die Funkfrequenzen der Smart Home Funkstandards in den Bereich der Mikrowellentechnik eingliedern.

Im freien Raum kann die Ausbreitung von Funkwellen vergleichbar mit der Ausbreitung von Licht als gerade Linie zwischen zwei Antennen betrachtet werden. Gestört werden kann diese geradlinige Verbindung durch Objekte, welche das Funksignal schwächen. Bei der Störung von Funksignalen unterscheidet man grundlegend zwischen vier Kategorien [12]:

- Abschattung / Absorption: Unter diesem Störeffekt versteht man dabei das Abschwächen von Funksignalen beim Durchdringen der Funkwellen von Hindernissen. Häufig tritt dieser Effekt in Gebäuden auf Grund vieler Wände auf.
- Reflexion: Reflexion von Funkwellen findet hauptsächlich an relativ großen Oberflächen statt. Reflektierte Funkwellen erreichen den Empfänger deutlich schwächer als Funkwellen, die auf gerader Linie den Empfänger erreichen.
- Streuung: Bei Hindernissen, die relativ klein sind, werden die Funkwellen hinter diesen gestreut und pflanzen sich in verschiedene Richtungen fort. Damit erreicht nur ein Teil der Funkwellen den Empfänger und das empfangene Signal ist abgeschwächt.
- Beugung: An scharfen Kanten oder Ecken tritt der Effekt der Beugung auf. Das bedeutet, dass das Signal nach dem Hindernis abgelenkt wird.

Vor allem die Abschattung durch Gebäudematerialien wird in der Literatur berücksichtigt und es werden Anhaltswerte für die Höhe der Dämpfung unterschiedlicher Baumaterialien bei unterschiedlichen Frequenzen gegeben, wie zum Beispiel in Tabelle 2.1 zu sehen ist.

Wie in Tabelle 2.1 dargestellt, wird die Dämpfung in der Literatur häufig mit der Kenngröße dBm angegeben. Dies ist eine Kenngröße der Sendeleistung und bezieht sich auf die logarithmisch skalierte Signalstärke Dezibel [dB] in Bezug auf ein Milliwatt [mW] Sendeleistung. Vor allem bei hohen Sendeleistungen bietet diese Kenngröße eine übersichtliche Darstellung; aber auch in den technischen Datenblättern von Smart Home Produkten wird diese häufig verwendet. Die Umrechnung der Sendeleistung von mW in dBm erfolgt wie in Gleichung 2.1 dargestellt.

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{mW}}{1 \text{ mW}} \right) \quad \text{Gl. 2.1}$$

Häufig wird die Funkleistung außerdem mit E.I.R.P. gekennzeichnet. Diese Abkürzung steht für „equivalent isotropically radiated power“ und ist ein Produkt aus der tatsächlichen Sendeleistung P_{mW} und einem Gewinnfaktor, der sich auf den Signalstärkenzuwachs durch Bündelung der Funkwellen in eine Richtung bezieht. Hauptsächlich wird diese Bezeichnung entweder bei der Funkreichweitenangabe oder Sendeleistungsangabe in Produktdatenblättern verwendet. Die Reichweite wird dabei über einen Zusammenhang aus E.I.R.P., Wellenlänge und Empfangsleistung bestimmt. Unter der Empfangsleistung versteht man dabei die Restleistung, die eine Funkwelle bei der Empfängerantenne besitzen muss, damit das Funksignal verarbeitet werden kann, da auch die Ausbreitung der Funkwelle

durch den freien Raum zu einem Leistungsverlust führt. Auf Basis bekannter Empfangs- und Sendeleistungen sowie zum Beispiel den Anhaltswerten aus Tabelle 2.1 könnte so über eine Energiebilanz ermittelt werden, wie groß die maximale Anzahl durchdringbarer Wände in einem Gebäude wäre. Dieser Ansatz wäre jedoch sehr ungenau, da die anderen Störfaktoren nicht berücksichtigt sind [12].

Tabelle 2.1: Dämpfungsgrade unterschiedlicher Wandmaterialien bei unterschiedlichen Frequenzen [14]

Material	Dämpfung bei 2,4 GHz [dB]	Dämpfung bei 5GHz [dB]
Hochlochziegel (11,5 cm)	7	10
Leichtbeton (11,5 cm)	12	19
Lehmstein (11,5 cm)	22	36
Kalksandstein (24 cm)	9,5	23
Leichtbeton (30 cm)	26	35
Stahlbeton (16 cm)	20	32
Hochlochziegel (36 cm)	26	50
Tondachziegel (1,3 cm)	3	8
Zweifache Wärmeschutzverglasung (11,5 cm)	33	27

Die Datenübertragung durch Funkwellen findet auf Basis der sogenannten Bandbreite statt. Dabei handelt es sich um ein Frequenzspektrum, um eine Basisfrequenz f herum, welches durch eine Sendeantenne für das gleichzeitige Senden von mehreren Informationen genutzt wird und als Δf gekennzeichnet ist. Ist dieses bekannt und eine Codierung für die Signalverarbeitung festgelegt, wie zum Beispiel 8 Bit, so kann aus dem Produkt aus Bandbreite und Codierung die Datenübertragungsrate in der Einheit $[Bit/Hz]$ ermittelt werden. Diese ist vor allem bei der Übertragung von hohen Datenmengen, wie der Videoübertragung wichtig [12]. Denn aus der Datenübertragungsrate lässt sich ein weiterer, bei Smart Home Produkten häufig angegebener Wert, ableiten, der Sendezyklus. Dabei handelt es sich um das zeitliche Intervall, in dem ein Gerät Informationen an die Zentrale schickt. So können Geräte, wie im weiteren Verlauf der Arbeit dargestellt sein wird, sehr unterschiedliche Sendezyklen besitzen. Einfluss auf den Sendezyklus haben zwei Faktoren, zum einen der Energieverbrauch und zum anderen die Größe der pro Sendung übertragenen Datenmenge. Der Energieverbrauch ist dabei relevant, da eine Vielzahl von Smart Home Produkten mit Batterien betrieben werden. Da jedes Funksignal die volle Sendungsleistung beansprucht, entladen sich Batterien umso schneller, je häufiger ein Signal gesendet wird und desto stärker dieses ist. Wird also eine lange Batterielaufzeit angestrebt, so muss der Sendezyklus entsprechend hoch ausfallen. Des Weiteren beeinflusst die zu übertragende Datenmenge den Sendezyklus, da behördliche Regularien und Normen

in einigen Frequenzbereichen - auch Frequenzbänder genannt - die sogenannte aktive Antennennutzungsdauer bestimmen. Die aktive Antennennutzungsdauer beschreibt dabei, wie viel Zeit innerhalb einer vollen Stunde in Prozent eine Antenne auf einem bestimmten Frequenzband senden darf. Die Regulierungen geschehen in Deutschland durch die Bundesnetzagentur, wie zum Beispiel in der „Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen geringer Reichweite (SRD)“, die dabei die Europäischen Regulierungen der „European Conference of Postal and Telecommunications Administrations“ (CEPT) übernimmt [15], [16]. Diese beschreibt neben der maximalen Sendeleistung den für ein jeweiliges Frequenzband bestimmten Anwendungsbereich, die aktive Antennennutzungsdauer sowie weitere zu treffende technische Maßnahmen. Liegt die aktive Antennennutzungsdauer, wie beim häufig im Smart Home genutzten Frequenzband 868,0 – 868,6 MHz, bei 1%, so darf innerhalb einer Stunde nur 36 Sekunden lang ein Funksignal gesendet werden. Vor allem bei hohen zu übermittelnden Datenmengen kann dies zu sehr großen Sendezyklen führen, die dem Anwendungsfall nicht gerecht werden. Hersteller umgehen diese Regulierung bzw. verlängern die aktive Antennennutzungsdauer, indem sie mehrere sogenannte Kanäle verwenden. Kanäle sind dabei in einem Frequenzband ganz bestimmte Frequenzen, auf denen gefunkt wird. Dabei gilt die Ein-Prozent-Einschränkung je Kanal, wodurch sich die aktive Antennennutzungsdauer bei zum Beispiel sechs benutzten Kanälen auf insgesamt 216 Sekunden verlängert [15]. Neben der Bundesnetzagentur gibt es noch weitere Institutionen, wie beispielsweise das „Institute of Electrical and Electronics Engineers“ (IEEE). Dieses ist der weltgrößte Berufsverband von Ingenieuren, Technikern und Wissenschaftlern, der sich unter anderem in Gremien um die Standardisierung von Technologien kümmert, wie auch der in Smart Home Funkstandards genutzten Technologien [17].

2.3 Smart Home Funkstandards

In dem Smart Home Sektor haben sich einige Kommunikationsstandards etabliert, da es im Smart Home Kabel- sowie Funkdatenübertragung gibt, wird zwischen diesen beiden unterschieden. Wird wie in dieser Arbeit die Datenübertragung mittels Funk betrachtet, so ist bei diesen Kommunikationsstandards auch von Funkstandards die Rede. Anbieter von Smart Home Zentralen, wie die Connectivity Solutions GmbH mit dem „WiButler“ oder die homee GmbH mit dem „homee“, integrieren dabei meist einige dieser etablierten Standards in den eigenen Produkten und können somit auf bestehende Produkte von anderen Herstellern für unterschiedliche Anwendungsbereiche zurückgreifen [18], [19]. Diese Anbieter können somit ohne eigene Produkte einen sehr breiten Funktionsumfang anbieten. Andere Hersteller, wie die Firma eQ3 mit dem Homematic-IP-System, greifen dagegen auf proprietäre Kommunikationsstandards zurück, wodurch der Funktionsumfang des Smart Home sehr stark vom eigenen Produktportfolio abhängt [20].

Die marktüblichen Smart Home Funkstandards sind laut einer Statista Marktforschung die folgenden [21]:

- ZigBee
- Thread
- Z-Wave
- WLAN/ DECT

Die Funkstandards ZigBee und Thread basieren beide auf der Norm IEEE 802.15.4. Das führt dazu, dass zwar die Verschlüsselung und das dahinterliegende Protokoll unterschiedlich sind, beide aber auf dem 2,400 - 2,4835 GHz Frequenzband basieren und in Deutschland damit durch die Bundesnetzagentur auf maximal 100 mW Sendeleistung beschränkt sind [22]. Die erste Version des Funkstandards ZigBee existiert schon seit 2004 auf dem Markt und wird durch die Connectivity Standard Alliance (CSA) verwaltet [23]. Geräte in einem ZigBee-Netzwerk sind entweder in einer Stern-, Baum-, oder Mesh-Topologie und seit einer Neuerung des Funkstandards auch durch eine selbstorganisierte Mesh-Topologie vernetzt. Dies ist abhängig von der Anzahl und der Verteilung der Geräte in einem Smart-Home-System. Die für den Funkstandard ZigBee durch die CSA häufig angegebene Funkreichweite im freien Raum beläuft sich auf 10 – 100 m [24]. Im Vergleich zu ZigBee ist der Funkstandard Thread relativ neu und wird durch die im Jahr 2014 gegründete Thread Group verwaltet [25]. Auf Grund der gleichen zugrundeliegenden IEEE Norm für die Datenübertragung können Thread und ZigBee über dieselbe Antenne verwendet werden. Davon ausgehend können die Reichweiten von Thread mit den ZigBee Reichweiten gleichgesetzt werden. Die Bereiche, in denen sich Thread von ZigBee unterscheiden sind unter anderem das Einlernen von Geräten, das ohne extra Software funktioniert, und dem Energiebedarf, da Thread Geräte nur bei Bedarf und nicht dauerhaft Funksignale aussenden. Des Weiteren ist Thread anders als ZigBee ein IP-basierter Funkstandard, der es Thread-Geräten ermöglicht, sich mit der „Cloud“ zu verbinden und somit über das Internet Protokoll mit Geräten zu kommunizieren [26]. Sich in einem Thread Netzwerk befindende Geräte sind dabei in einem sich selbstorganisierenden-Mesh-Netzwerk miteinander verbunden [27]. Thread wird weiter in einem neuen Smart Home Protokoll, dem Matter Protokoll verwendet. Dieses wird wie auch ZigBee durch die CSA verwaltet und hat das Ziel einer Vereinheitlichung des Smart Home Sektors sowie einer uneingeschränkten Interoperabilität

zwischen Matter Geräten [28]. Da Thread und ZigBee wie bereits erwähnt mit denselben Antennen operieren, können ZigBee Geräte ohne hardwareseitige Veränderungen auf den Funkstandard Thread umgestellt werden, was anders herum genauso funktioniert. Dadurch können theoretisch jegliche ZigBee-Geräte nach einem Softwareupdate auch Matter kompatibel sein. Diese Möglichkeit wurde bereits durch mitentwickelnde Unternehmen des Matter Protokolls, wie Amazon, angekündigt, könnte jedoch auf die bestehenden Bridges beschränkt sein [29]. Insgesamt wird Matter unter Herstellern von Smart Home Produkten als einer der zukunftsweisenden Smart Home Standards angesehen und die Entwicklung wird von einem Großteil dieser unterstützt [30].

Der Funkstandard Z-Wave verwendet in ganz Europa die Frequenzen 868,40 MHz und 868,42 MHz und fällt damit in den SDR-Frequenzbereiche 868-868,6 MHz [15]. In diesem Frequenzbereich ist Z-Wave dabei auf 25 mW maximale Sendeleistung begrenzt und hat eine maximale aktive Antennennutzungsdauer von 1 % [15]. Die maximale Sendeleistung von Z-Wave Geräten ist jedoch durch die Z-Wave Alliance, die den Z-Wave Funkstandard verwaltet, auf -1 dBm und somit auf 0,794 mW begrenzt. Die maximale Reichweite wird durch die Entwickler mit 100 m im freien Feld angegeben [31]. Die Entwicklung des Z-Wave Funkstandards begann im Jahr 2001. Im Jahr 2004 kamen anschließend die ersten Z-Wave zertifizierten Produkte auf den Markt [32]. Auch der Z-Wave Funkstandard kann in einer Mesh-Netzwerk-Topologie operieren [33].

Die Funkstandards WLAN und DECT befinden sich dabei in einer Zeile, da in den folgenden Untersuchungen der Funkstandard DECT untersucht wird, dieser jedoch vom Hersteller des Smart Home Systems, wie viele andere Geräte auch, als WLAN Geräte eingeordnet wird [34]. Entwickelt wurde der DECT Funkstandard im Jahr 1992 und wird durch das DECT Forum verwaltet. Der Name DECT steht für „Digital Enhanced Cordless Telecommunications“, was auf Deutsch wortwörtlich „digital verbesserte schnurlose Telekommunikation“ bedeutet. In seinem ursprünglichen Einsatz war der DECT Funkstandard, wie in dem Namen schon zu erkennen ist, für die Verbesserung der Datenübertragung von schnurlosen Telefonen gedacht. Dieses Anwendungsfeld hat sich zwar erhalten aber es wurde für den Einsatz in Smart-Home-Systemen und weiteren Anwendungen erweitert. Für das Heim Netz und das Smart Home wurde außerdem die Erweiterung DECT ULE entwickelt, wobei ULE für „Ultra Low Energy“ steht und einen vergleichsweise niedrigen Energieverbrauch für die Anwendung in batteriebetriebenen Geräten hat [35]. In einem Smart-Home sind DECT ULE Geräte ausschließlich in einem Stern-Netzwerk mit einander verbunden, was jedoch auf Grund der hohen angegebenen Reichweite von 300 m auf dem freien Feld und 50 m in Gebäuden bei Smart-Home-Anwendungen unproblematisch ist. DECT wird in Deutschland durch die Bundesnetzagentur reguliert [36]. So ist das Frequenzband auf 1880 MHz bis 1900 MHz definiert und die maximale Sendeleistung auf 250 mW beschränkt [37].

Über die genannte Liste hinaus wird in der Fachliteratur regelmäßig der Funkstandard EnOcean im Zusammenhang mit dem Smart Home betrachtet [8], [38]. Dieser funkt auf der Frequenz 868.3 MHz, die in dem SRD-Band 868 – 868,6 MHz liegt und dadurch auch auf 10 mW maximale Sendeleistung und eine aktive Antennennutzungsdauer von maximal 1% beschränkt ist [15]. Das Vernetzungsprinzip ist dabei auf der Stern-Topologie basierend, wobei Reichweitenerweiterungen durch Repeater möglich sind. Dies entspricht den Angaben der EnOcean GmbH, die den Funkstandard im Jahr 2001 entwickelt und auf den Markt gebracht hat. Verwaltet wird die Benutzung, Zertifizierung und vieles mehr seit 2008

durch die EnOcean Alliance [39]. Entsprechend der Angaben der EnOcean GmbH beläuft sich die Funkreichweite des Funkstandards auf 30 m im Gebäude und auf bis zu 300 m auf dem freien Feld [40]. Das Ziel des EnOcean Funkstandards liegt dabei auf einem möglichst geringen Energieverbrauch. Darauf aufbauend verwenden viele Produkte den E.H. Ansatz zur Energieversorgung. Dies ist eine Eigenschaft, die es den Smart Home Geräten, die mit EnOcean ausgestattet sind, ermöglichen durch externe Energieeinwirkungen, wie die Sonneneinstrahlung, einen Tastendruck oder eine Temperaturdifferenz, eine elektrische Leistung zu erzeugen, die ausreicht, um ein Funksignal zu senden und den im Gerät integrierten Energiespeicher zu laden. Dadurch können diese Geräte gänzlich ohne externe Batterie oder mit einer externen Batterie als Backup operieren, die durch den Besitzer auszutauschen wäre. EnOcean Geräte, die mit einer E.H. Funktion ausgestattet sind, haben dementsprechend eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Batterielaufzeit und sind deswegen im Vergleich zu anderen Funkstandards wartungsarm [41]. Verwendung findet EnOcean im Smart Home unter anderem in den schon genannten Smart Home Zentralen homee und WiButler [18], [19].

Eine Zusammenfassung der Eigenschaften der unterschiedlichen Funkstandards ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Vergleichstabelle der Funkstandards auf Basis der vorgestellten Daten

Funkstandard	Verwaltende Organisation	Frequenz /- band	Max. Sendeleistung [mW]	Max. Reichweite (Freies Feld/ Gebäude) [m]	Max. Antennennutzungsdauer
Z-Wave	Z-Wave Alliance	868,40, 868,42 MHz	0,794	100/ -	1 %
ZigBee	Connectivity Standards Alliance	2,400 - 2,4835 GHz	100	10-100	-
EnOcean	EnOcean Alliance	868.3 MHz	25	300/ 30	1 %
Thread	Thread-Group	2,400 - 2,4835 GHz	100	10-100	-
DECT	dect forum	1880 - 1900 MHz	250	300/ 50	-

2.4 Stand der Forschung zu Funkreichweiten in Gebäuden

In Gebäuden überwiegt der Störeinfluss von Wänden auf die Signalstärke, dem entsprechend wurden dieser Thematik schon einige Arbeiten gewidmet. Diese lassen sich dabei grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen. Die erste Kategorie beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung von Funkdurchdringung in Gebäuden oder von Gebäudematerialien, wobei diese sich meist auf einen bestimmten Frequenzbereich beziehen wie zum Beispiel in [42], in dem das Autorenteam die Dämpfung und Ankunftsverzögerung von Funkwellen mit einer Frequenz von 8 GHz bei unterschiedlichen Baumaterialien untersucht. Die maximale Anzahl von in den folgenden Arbeiten vorgestellten unterschiedlichen Frequenzbereichen liegt bei vier [43]. Die zweite Kategorie von Arbeiten befasst sich mit dem Erstellen und Anwenden von Modellen, die die Funkdurchdringung in Gebäuden abbilden sollen und dabei auf die Ergebnisse der ersten Kategorie als Referenz zurückgreift.

In Bezug auf die im Smart Home üblicherweise verwendeten Frequenzen 2,4 GHz und 868 MHz wurden in [44] die Baumaterialien Glas, Spanholz, Vollholz, Tür, wobei nicht weiter spezifiziert ist aus welchem Material die Türen bestehen, und Beton auf den Funksignalstärkenverlust bei einer Frequenz von 2,45 GHz untersucht. Die Untersuchung fand dabei mit horizontal- und vertikalpolarisierten Funkwellen und unterschiedlichen Materialstärken statt. Die Ergebnisse der Untersuchungen gibt das Autorenteam in tabellarischer Form an. Dabei hat Spanholz bei einer untersuchten Materialstärke von 8 mm die geringste Dämpfungswirkung auf Funkwellen. Dem entgegen haben die untersuchten Betonwände bei einer Materialstärke von 250mm die größte Dämpfungswirkung. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen weiter, dass bei allen Materialien, außer den Betonwänden, horizontal polarisierte Funkwellen stärker abgeschwächt werden als vertikal polarisierte Funkwellen.

In der Veröffentlichung „Indoor propagation measurement for wireless operating systems in 2.45 GHz ISM band“ untersucht das Autorenteam die tatsächliche Funkdurchdringung von 2,45 GHz Funkwellen in einem Institutsgebäude in Prag. Dafür führt es zwei Untersuchungen durch. Als erstes untersucht es die Funkdurchdringung im Gebäude mit eigenentwickelten sogenannten narrowband Funksendern und –Empfängern und als zweites führt es die selbe Untersuchung mit in Laptops integrierten sogenannten Breitband WLAN-Antennen durch. Dabei prüft das Team die Genauigkeit eines erarbeiteten Modells zur Abbildung der Funkdurchdringung und kommt zu dem Schluss, dass die durch die Untersuchungsergebnisse vorgenommenen Parameteranpassungen einen Fortschritt der Modellierungsgenauigkeit bringen, dass jedoch weitere Daten notwendig sind [45].

In [46] untersucht das Autorenteam den 433 MHz und 868 MHz fähigen Funkstandard LoRa, der nicht wie die Smart Home Funkstandards zu den sogenannten Local Area Networks gehört, also zu den Funknetzen mit relativ kleiner Reichweite, sondern zu den Wide Area Networks gehört. Die Untersuchung zeigt, wie groß der, beim LoRa Funkstandard charakteristische Spreadingfaktor sein muss, damit im gesamten Gebäude eine stabile Verbindung hergestellt werden kann. Durchgeführt wird die Untersuchung in einem achtgeschossigen Gebäude. Bei Betrachtung der Ergebnisse des für diese Arbeit relevanten 868 MHz Versuchs, zeigt diese Publikation die durchschnittlich empfangene Signalstärke je Geschoss und je Spreadingfaktor, wobei zu sehen ist, dass bis zu einer bestimmten Geschossanzahl die Dämpfung des Signals sehr stark ist und danach abnimmt und die Empfangene Signalstärke in etwa konstant bleibt.

Eine Modellierung der Signal Abschattung unterschiedlicher Wandmaterialien bietet [47]. In diesem wird mit einem einfachen Computermodell die Signalstärke von Funkwellen bei den Frequenzen 433 MHz, 868 MHz, 2,4 GHz und 5 GHz nach der Durchdringung von ein, zwei, drei und vier Wänden modelliert, die aus Beton, Rigips oder Holz bestanden und dabei jeweils eine Dicke von 0,15 m, 0,2 m, 0,25 m, 0,3 m oder 0,4 m aufwiesen. Eine Feststellung der Arbeit ist, dass die Signalabschwächung durch Holz unabhängig von der Materialdicke ist und nur von der Frequenz abhängt. Dies ist dabei auf die geringe Leitfähigkeit von Holz zurückzuführen. Anders verhalten sich die Baustoffe Beton und Rigips. Beide Materialien sind nicht nur von der Frequenz abhängig, sondern auch von der Materialstärke.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

In diesem Kapitel wird vorgestellt, welche FHKSa und welche dazugehörige Smart Home Zentralen in Zusammenhang mit den in Kapitel 2.3 vorgestellten Smart Home Funkstandards in den im Folgenden vorgestellten Versuchen verwendet werden. Dazu wird zunächst detailliert auf die technischen Daten der einzelnen FHKSa und die Smart Home Zentralen eingegangen. Anschließend werden die Vorgehensweise und der Aufbau der Freifeldreichweitenmessung, der drei Reichweitenmessungen im Gebäude und der Langzeittemperaturmessung erläutert. Abgeschlossen wird das Kapitel daraufhin mit einer Vorstellung der Auswertungsmethode, mit dessen Hilfe die Ergebnisse der einzelnen Versuche zusammengefasst werden sollen und anschließend zu einer Empfehlung führen sollen.

3.1 Verwendete Geräte

Viele der in Deutschland etablierten Smart Home Systeme verfügen über proprietäre Funksysteme und benutzen nicht offiziell die genannten Funkstandards. Viele der offenen Systeme, welche die Funkstandards unterstützen, sind jedoch auf dem Markt nicht weit verbreitet und bieten somit wenig Aussagekraft über marktübliche Systeme. Drei Smart-Home Zentralen, die auf dem Markt etabliert sind und ein oder mehrere Funkstandards unterstützen, sind der WiButler Pro, kurz WiButler, der Connectivity Solutions GmbH, die modular aufgebaute homee Zentrale der homee GmbH und der Apple Home Pod mini der Apple Inc. Die in dieser Arbeit verwendeten und mit den genannten Smart Home Zentralen Kompatiblen FHKSa sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Für die Versuche verwendete Komponenten [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55]

Geräte	Hersteller	Funk- standard	Max. Signal- stärke [dBm]	H.A. (Stellantrieb) Reichweite Draußen/ Draußen [m]	Sende- zyklus [min]	Kompatible Zentrale	Max. Signal- stärke [dBm]	H.A. / <i>Literaturangaben</i> (Zentrale) Reichweite Draußen/ Draußen [m]
Fritz!DECT 301	AVM	DECT	24	-	15	Fritz!Box 7590	24	300/50
AVD 30	Afriso	EnOcean (E.H.)	3	-	10	homee	-	300/30
Devolto Connect Heating Thermostat ViCare	Devolto	Z-Wave	7	-	1	homee	-	100/-
Heizkörper- Thermostat	Viessmann	ZigBee	20 (e.i.r.p.)	-	0,125	WiButler Pro	-	10/50
mote 420	Oventrop	EnOcean (Batterie)	10	-	10	WiButler Pro	-	30/100
Thermo	Eve	Thread	20	-	0,0833	Home Pod mini	-	300/75-100



Abbildung 3.1: WiButler Zentrale (links) [58], Oventrop mote420 (Mitte) [59] und ViCare Heizkörper Thermostat (rechts) [52]

Der WiButler (Abbildung 3.1, links) ist dabei laut H.A. kompatibel mit den Produkten der Firmen, die in der sogenannten WiButler Alliance sind [56]. Wobei in der Internet Community des WiButlers auch weitere Produkte als kompatibel ausgewiesen werden [57]. Durch den WiButler werden die Funkstandards WLAN, ZigBee, Z-Wave und EnOcean unterstützt [53]. In den Versuchen werden zwei FHKSa mit dem WiButler untersucht (siehe Tabelle 3.1), zum einen der „mote 420“ des Herstellers Oventrop (Abbildung 3.1, Mitte), der mit dem EnOcean Funkstandard ausgestattet ist. Dieser Stellantrieb wird durch Batterien mit Strom versorgt und hat eine maximale Signalstärke in der Kenn-Einheit dBm von 10 dBm. Entsprechend der technischen Daten des WiButler ist somit in Gebäuden eine Reichweite von 30 m und auf dem freien Feld eine Reichweite von 100 m erreichbar. Der Sendezyklus bei dieser Gerätekombination liegt bei 10 Minuten und lässt sich in dem sogenannten Sommermodus auf 30 Minuten erhöhen. Zum anderen wird das ViCare Heizkörper-Thermostat (Abbildung 3.1, rechts) von dem Heizungssystemhersteller Viessmann in Kombination mit dem WiButler untersucht. Dieser Funk-Heizkörperstellantrieb ist mit dem Funkstandard ZigBee ausgestattet, hat eine Funkstärke von 20 dBm und laut den technischen Daten des WiButler eine maximale Reichweite im Gebäude von 10 m sowie eine maximale Reichweite auf dem Freifeld von 50 m (Tabelle 3.1).

Die homee Zentrale ist ein mit Würfeln, den sogenannten Cubes, modular aufgebautes System. Für die Steuerung benötigt wird der sogenannte Brain-Cube (Abbildung 3.2, links), dieser ist die Zentraleinheit des Systems. Auf den Brain-Cube können weitere Module gestapelt werden, welche mit den Funkstandards EnOcean, ZigBee und Z-Wave ausgestattet sein können oder mit Kommunikationsmodulen, die die Konnektivität mit Partnerfirmen der homee GmbH herstellen. Kompatibilität bietet die homee Zentrale dabei mit allen auf der homee Website aufgeführten Produkten [19]. Darüber hinaus zeigt die homee Community immer wieder noch weitere Produkte auf, mit denen Kompatibilität hergestellt werden kann [60]. Im Rahmen dieser Untersuchung wird der homee Brain-Cube zusammen mit dem EnOcean-Cube (Abbildung 3.2, Mitte) und Z-Wave Cube (Abbildung 3.2, rechts) verwendet. Der Brain-Cube ist mit WLAN ausgestattet, wobei dieser sich nicht unbedingt mit



Abbildung 3.2: homee Brain Cube (links) [63], homee EnOcean Cube (Mitte) [64], homee Z-Wave Cube (rechts) [65]

WLAN funkenden Komponenten verbindet, sondern sich über WLAN mit dem Heimnetzwerk verbindet und sich so mit anderen Systemen verbinden kann. Über diesen Weg wird der mit DECT ausgestattete Fritz!DECT 301 Funk-Heizkörperstellantrieb vom Hersteller AVM (Abbildung 3.3, unten) in das homee System integriert. Dieser Stellantrieb ist in den Experimenten über den Funkstandard DECT mit der Fritz!Box 7590 (Abbildung 3.3, oben) verbunden. In dem Heimnetz, das die Fritz!Box 7590 aufbaut, ist das homee System eingebunden. Dem homee System kann dann der Zugriff auf die Fritz!Box 7590 gestattet werden, wodurch der Stellantrieb im homee System angezeigt wird. Die Funkstärke des Stellantriebs liegt genauso wie die der Fritz!Box 7590 bei 24 dBm. Der Sendezyklus des Fritz!DECT 301 liegt bei 15 Minuten. Da in der technischen



Abbildung 3.3:
Fritz!Box 7590
(oben) [61] und
Fritz!DECT 301
(unten) [62]

Dokumentation der Fritz!Box 7590 und des Fritz!DECT 301 keine Angaben bezüglich der Reichweiten vermerkt sind werden an dieser Stelle die Literaturwerte aus Tabelle 2.2 mit 300 m Freifeldreichweite und 50 m Gebäudereichweite angenommen. Mit dem EnOcean-Cube wird der AVD 30 Funk-Heizkörperstellantrieb des Herstellers Afriso (Abbildung 3.4, oben) in das System eingebunden. Dieser Stellantrieb wird über einen E.H. Ansatz mit Energie versorgt. Für die Aufladung des internen Energiespeichers über eine externe Energiequelle verfügt der Stellantrieb über einen Mico-USB Anschluss. Die Funkstärke des AVD 30 liegt bei 3 dBm und der Sendezyklus ist, wie auch beim mote420 von Oventrop 10 Minuten lang wobei auch beim AVD 30 ein Sommermodus aktiviert werden



Abbildung 3.4:
Afriso
AVD 30 (oben) [50],
Devolo Connect
Heating Thermostat
(unten) [51]

kann, der das Sendeintervall auf 30 Minuten erhöht. Da die technischen Dokumentationen des homee EnOcean-Cube nicht einsehbar sind, liegen keine Informationen über die Funkreichweite oder die Funkstärke des Funkmoduls im Cube vor, weshalb auch an dieser Stelle die Literaturwerte aus Tabelle 2.2 mit 300 m Freifeldreichweite und 30 m Gebäudereichweite angenommen werden. Dasselbe Problem ergibt sich für den Z-Wave-Cube des homee Systems. Mit diesem wird das Devolo Connect Heating Thermostat des Herstellers Devolo (Abbildung 3.4, unten) verbunden. Das Devolo Connect Heating Thermostat hat eine maximale Funkstärke von 7 dBm und sendet in den Werkseinstellungen des Gerätes jede Minute die Messdaten an das homee System. Den Sendezyklus des Gerätes kann man dabei beliebig im ein Minuten Intervall verändern. Anhand der Literaturangaben in Tabelle 2.2 beläuft sich die Freifeldreichweite der Z-Wave Gerätekombination auf 100 m Freifeldreichweite, wobei keine Gebäudereichweite vermerkt ist.

Der Apple Home Pod mini (Abbildung 3.5, links) ist eine Smart Home Zentrale mit dem integrierten Apple Sprachassistenten „Siri“. Dieser nutzt unterschiedliche Funkstandards für die Kommunikation mit Geräten. So unterstützt der Home Pod mini unter anderem WLAN für den Zugang ins Heimnetz der Besitzer und darüber den Zugriff aufs Internet. Des Weiteren wird für das Einlernen und Koppeln von Geräten Bluetooth oder ein von Apple für die sogenannte AirPlay Funktion verwendeter proprietärer Funkstandard verwendet. Außerdem ist in dem Home Pod mini ein Ultrabreitband-Chip für in der Nähe befindliche Geräte sowie der Funkstandard Thread für die Verbindung mit Smart Home Komponenten integriert. Technische Daten zu Funkstärke, Funkreichweite oder Ähnlichem des Funkstandard Thread veröffentlicht Apple nicht. Die Smart Home Funktionalitäten des Home Pod mini

werden durch ein von Apple eigens entwickeltes Smart Home System, Home Kit genannt, bereitgestellt. Kompatibel mit diesem System sind dabei nur Produkte, die Apple für dieses System zertifiziert. Ein Funk-Heizkörperstellantrieb, der diese Zertifizierung besitzt und mit dem Funkstandard Thread ausgestattet ist, ist der Stellantrieb Thermo vom Hersteller eve (Abbildung 3.5, rechts). Dieser hat eine Funkstärke von 20 dBm. Weitere technische Daten über die Gerätekombination aus Home Pod mini und eve Thermo lassen sich auf Grund nicht einsehbarer Datenblätter nicht ermitteln. Deshalb werden an dieser Stelle erneut die Werte aus Tabelle 2.2 mit einer Freifeldfunkreichweite von 300 m und einer Gebäudereichweite von 75-100 m angenommen.



Abbildung 3.5::Apple Home Pod mini (links) [66] und eve Thermo (rechts) [67]

3.2 Freifeldmessung

Die Messung der Freifeld-Reichweite findet auf dem Gehweg neben einer Straße im Phönix-West Gewerbegebiet in Dortmund Hörde statt (Abbildung 3.6). Die Straße ist umgeben von einer alten Industrieanlage und von Bürogebäuden. Mögliche Störquellen, welche die Funksignale beeinflussen können, sind zum einen der sich in der Nähe befindliche Fernsehturm sowie unbekannte Störquellen in den Gebäuden des Gewerbegebiets. Damit keine Störungen durch Reflexion vom Boden auftritt, werden die Komponenten auf circa 1,5m Höhe aufgestellt. Anschließend wird immer eine der Zentralen in Betrieb genommen. Die Stromversorgung der Zentralen und weiterer Geräte wie zum Beispiel einem Computer zum Aufnehmen der Messwerte erfolgt dabei durch einen 230V Netzanschluss mit einer

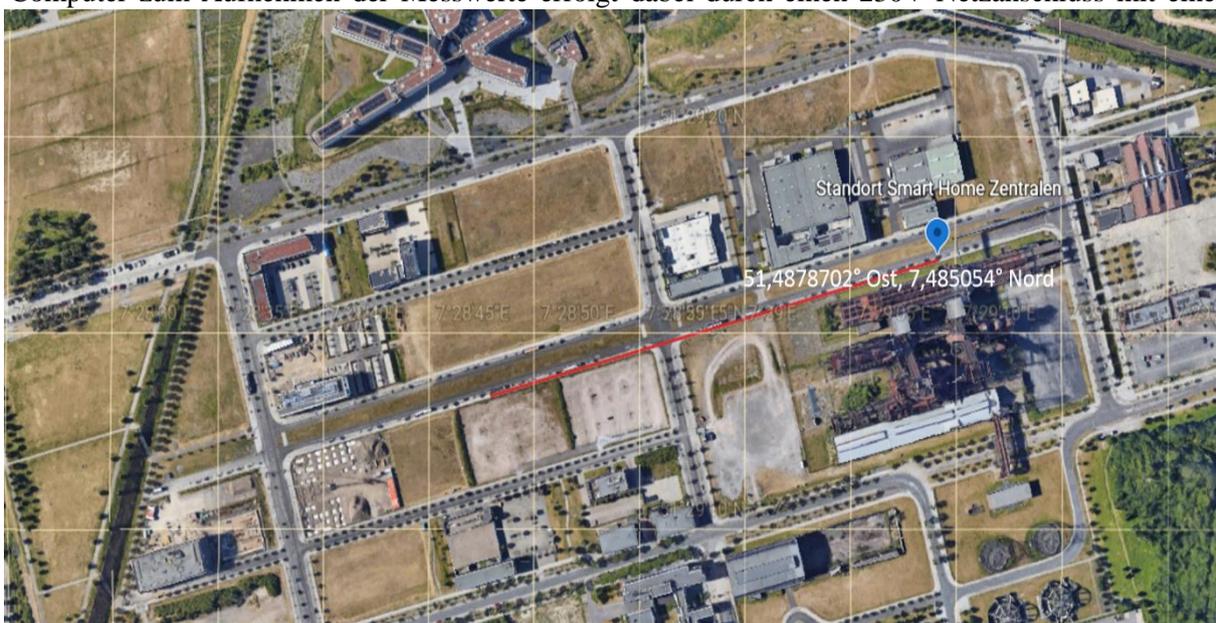


Abbildung 3.6: Ort der Freifeld-Messungen. Die rote Linie stellt die Strecke dar, auf der gemessen wurde

maximal abzugebenden Leistung von 150 Watt in einem VW Touareg. Mit den Zentralen zusammen wird dann nacheinander, damit keine Interferenzen auftreten, jeder Stellantrieb einzeln auf die tatsächliche Freifeldreichweite getestet. Dafür wird der Stellantrieb, zunächst im Abstand zu der Smart Home Zentrale platziert, der laut H.A. erreichbar ist. Gibt es keine H.A. bezüglich der Freifeldreichweite, so werden die in Tabelle 2.2 genannten Freifeldfunkreichweiten als Startwerte gewählt.

Anschließend wird der Stellantrieb, je nachdem ob eine Verbindung hergestellt werden konnte oder nicht, 10 Meter in Richtung Smart Home Zentrale vor oder zurück platziert und erneut auf eine Verbindung getestet. Das wird mit jedem Stellantrieb solange wiederholt, bis die Verbindung zwischen Stellantrieb und Smart Home Zentrale unterbrochen oder hergestellt wird. Sobald die Änderung des Verbindungsstatus passiert, wird nach dem Bi-Sektionsverfahren mit zwei Intervallen die Untersuchung verfeinert. Dadurch kann die Freifeldreichweite auf 2,5 Meter genau bestimmt werden. Im Folgenden wird dieses Vorgehen beispielhaft anhand der WiButler Zentrale in Kombination mit dem Oventrop mote420 EnOcean-Heizkörperstellantrieb erläutert (Abbildung 3.7). Die Freifeldfunkreichweite der WiButler Zentrale ist nach Tabelle 3.1 100 m. Anschließend wird das beschriebene Vorgehen durchlaufen. Der Stellantrieb hat im Beispiel nach Abschluss des Versuchs eine ermittelte Reichweite im Freifeld von 82,5 m und liegt damit 17,5 m unter den H.A.



Abbildung 3.7: Beispielhafter Aufbau und Ablauf der Freifeld Funkreichweite. Am Beispiel der H.A. des mote420 von Oventrop

3.3 Reichweitenmessung im Gebäude

Die Untersuchungen der tatsächlichen Reichweite in Gebäuden findet in drei unterschiedlichen Häusern statt: in zwei Einfamilienhäusern, die der Größe nach unterteilt sind, und in einem Mehrfamilienhaus mit drei Etagen und sechs Parteien. Das erste Einfamilienhaus hat eine bewohnbare Fläche von bis zu 200 m² und das andere Einfamilienhaus hat eine Wohnfläche von bis zu 400 m². Die Aufteilung der Häuser hat das Ziel, unterschiedliche Wand- und Deckenmaterialien, -anzahlen und -stärken untersuchen zu können und außerdem unterschiedliche Wohnsituationen abzubilden.

Die Untersuchungen in den Häusern läuft dabei wie folgt ab. Zuerst wird mit den Bewohnern abgesprochen, an welchen Orten eine Smart Home Zentrale üblicherweise installiert werden würde. Anschließend werden die Geräte an diesen Stellen aufgestellt und in Betrieb genommen. Die Smart Home Zentralen sind dabei gleichzeitig in Betrieb und können unter Umständen während der Messung nahe beieinander oder in der Nähe weiterer Funksender stehen. Dies wird toleriert, da bei den Versuchen reale Umstände untersucht werden sollen, in denen es zu Störungen durch andere Funkgeräte kommen kann. Nachdem die Geräte in Betrieb genommen, die Batterien in den Stellantrieben erneuert oder im Falle des Afriso AVD 30 wieder aufgeladen und mit den FHKSa's verbunden wurden, können die Messungen beginnen. Dafür werden die FHKSa zusammen auf einer Unterlage platziert. Auf dieser werden sie in den Häusern an den einzelnen Messpunkten auf einer Erhöhung von mindestens 15 cm platziert, auf einer Höhe, auf der Heizkörperventilthermostatanschlüsse üblicherweise angebracht sind. Die Anzahl der Messpunkte bestimmt sich durch die Größe der einzelnen Räume. In Räumen mit einer Fläche von weniger als 25 m² wird ein Messpunkt in der Mitte des Raumes betrachtet. In Räumen mit einer Fläche von mehr als 25 m² werde insgesamt fünf Messpunkte in den vier äußersten Ecken und in der Mitte des Raumes, betrachtet. Am Ende der Messung soll ein, wie in Abbildung 3.8 schematisch skizziertes Ergebnis resultieren. Mit diesem kann anschließend für jeden Stellantrieb festgestellt werden, wie groß die Raum- und Messpunktabdeckung, die maximale Entfernung zwischen Smart Home Zentrale und dem jeweiligem Stellantrieb, bei der noch eine stabile Verbindung zwischen den beiden Komponenten besteht, und wie viele Wände und Decken maximal durchdrungen werden.

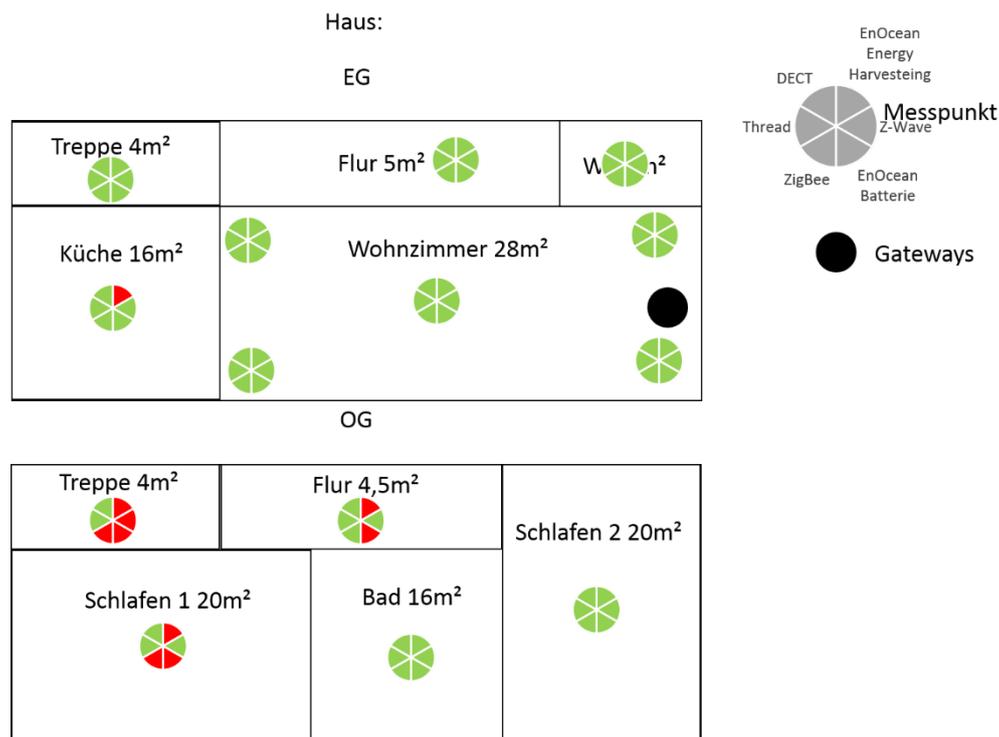


Abbildung 3.8: Schematischer Aufbau der Reichweitenmessung im Gebäude

Die Reichweitenmessung im Einfamilienhaus bis 200m² wird in einem Haus in Hannover mit 183 m² Wohnfläche durchgeführt. Der Grundriss des Hauses ist in Anhang A. Das Haus hat vier Etagen: Keller, Erdgeschoss (EG), erstes Obergeschoss (1.OG) und einen ausgebauten Dachboden (2.OG). Die Decken im Haus sind allesamt aus Stahlbeton. Die Wände sind aus unterschiedlichen Materialien. Die nicht tragenden Wände sind Trockenbauwände und tragende Wände bestehen aus Ziegelsteinen. Das Haus ist

über vier Etagen in 19 Räume aufgeteilt, wobei die Küche und das Esszimmer trotz nicht vorhandener Wände auf Grund der unterschiedlichen Nutzung vom Wohnzimmer separat betrachtet werden. Dementsprechend werden bei der Untersuchung 23 Messpunkte betrachtet, da das Wohnzimmer größer als 25 m² ist und somit fünf Messstellen in diesem Raum betrachtet werden. Abbildung 3.9 zeigt die Positionen und die Verteilung der einzelnen Messpunkte in einer vereinfachten Skizzierung der Grundrisse des Hauses. In Abbildung 3.9 ist außerdem die Position der Smart Home Zentralen im Versuchsaufbau zu erkennen. In Abbildung 3.9 nicht berücksichtigt ist der Fritz!DECT 301 Stellantrieb. Beim Versuch des Verbindungsaufbaus zwischen dem Fritz-Router und dem Gerät traten technische Probleme auf, die sich am Tag der Messung nicht lösen ließen, weshalb dieser Stellantrieb für die Untersuchung in diesem Gebäude nicht weiter betrachtet wird.

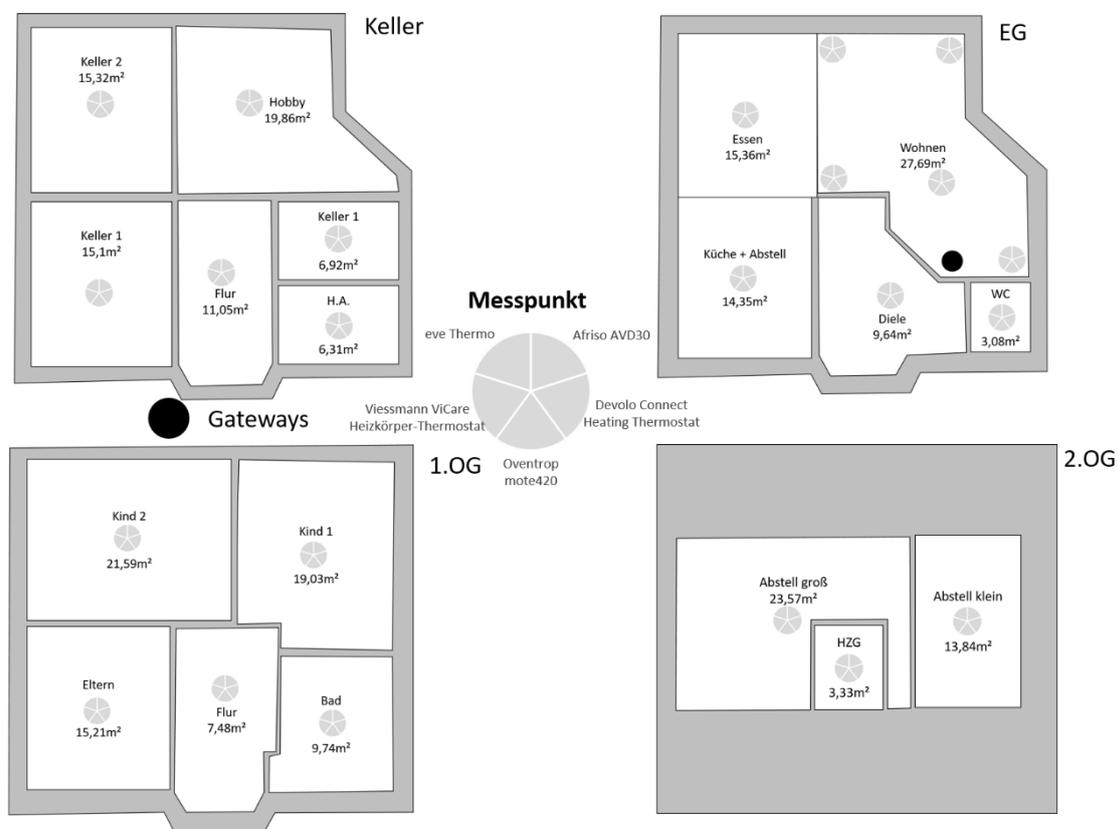


Abbildung 3.9: Vereinfachte Darstellung der Grundrisse des Hauses bis 200 m² Wohnfläche mit eingetragenen Messpunkten und eingetragener Position der Smart Home Zentralen

Als Haus bis 400 m² wird ein kombiniertes Wohn- und Firmengebäude in Dortmund mit einer gesamten Fläche von 496,05 m² und einer Nutz- /Wohnfläche von 314,16 m² zur Verfügung gestellt. Das Haus ist ein Fachwerkhaus mit angegliedertem Neubau. Den genauen Aufbau des Hauses zeigt der in Anhang B angehängte Grundriss. Einen vereinfachten Überblick über die Grundrisse mit eingetragenen Messstellen und den Aufstellorten der Smart Home Zentralen zeigt Abbildung 3.10. Die Wände im Fachwerkhaus sind hauptsächlich die ursprünglichen Lehmputzwände mit Ziegeln. Einige Wände wurden bei baulichen Maßnahmen zu Trockenbauwänden mit Glaswolle-Dämmstoff umgebaut, im Erdgeschoss die Wand von Flur 1 zum HWR und die Wand zwischen der Treppe vom EG zum 1.OG und Flur 3. Im ersten Obergeschoss sind die Wände von Kind 1 zum Flur 4, vom Bad zum Flur 4 und zwischen Treppe vom 1.OG zum 2.OG und Flur 5 baulich wie beschrieben verändert. Die Decken

zwischen dem EG und dem 1. OG sowie dem 1.OG und dem 2.OG sind in diesem Gebäudeteil Holzbalkendecken. Im 1. OG ist auf der Holzkonstruktion eine Fußbodenheizung mit einer dünn überzogenen Estrichschicht aufgetragen. Die Decke zwischen Keller und Erdgeschoss ist eine Stahlbetondecke, anders als die anderen beiden.

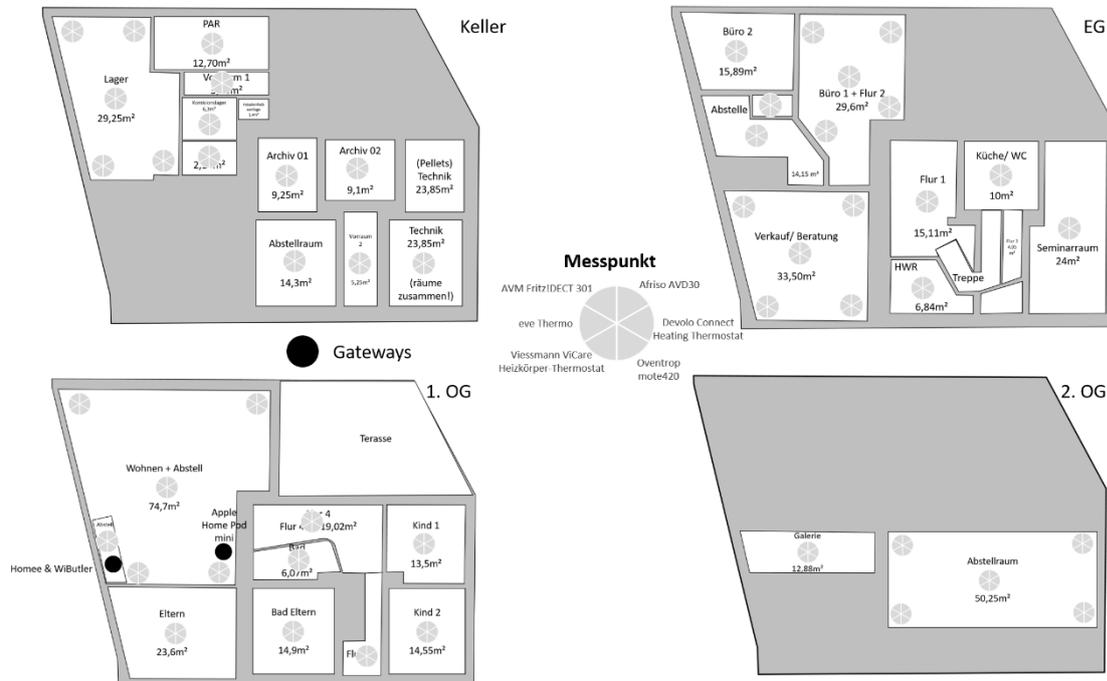


Abbildung 3.10: Vereinfachte Darstellung der Grundrisse des Hauses bis 400 m² Wohnfläche mit eingetragenen Messpunkten und eingetragener Position der Smart Home Zentralen

Im Neubau gibt es zwei Hohlziegelwände. Zum einen die Wand im Erdgeschoss zwischen Verkauf/ Beratung und Büro 1 + Flur 2 sowie Abstelle und eine weitere Wand im 1.OG zwischen Eltern und Wohnen. Alle weiteren Wände im Erdgeschoss und 1.OG dieses Gebäudeabschnitts sind Trockenbauwände ohne Dämmstoff. Die Wände im Keller sind Mauerwerk aus Altbestand, bei denen das Material nicht genau spezifiziert werden kann. Die Decken in diesem Gebäudeabschnitt sind allesamt Stahlbetondecken. Auf den Böden des Erdgeschosses und des ersten Obergeschosses sind Fußbodenheizungen mit einer dünnen Estrichschicht aufgebracht.

Die Wohnfläche beziehungsweise benutzte Fläche des Hauses ist dabei in drei Teile aufgeteilt: einen durch die Eigentümer des Hauses bewohnter Teil und zwei durch Unternehmen angemietete Teile. Die Wohnfläche der Hauseigentümer umfasst das gesamte 1. und 2. Obergeschoss, sowie den Flur 1 und den Hauswirtschaftsraum (HWR) im Erdgeschoss und damit 251,42 m². Ein Unternehmen benutzt den Seminarraum und den Raum Küche/ WC im Erdgeschoss (34 m²). Die andere Firma mietet im Erdgeschoss die Räume Büro 1, Büro 2, Flur 2, WC, Abstelle und Verkauf/Beratung und im Keller die Räume Lager, PAR, Vorraum 2, Kommissionslager, Fäkalienhebeanlage, WC, Archiv 01, Archiv 02 an (172,48 m²). Das gesamte Haus verfügt demnach mit den weiteren Räumen Abstellraum, Vorraum 2 und Technikraum im Keller über 30 Räume mit insgesamt 50 Messpunkte.

Die Smart Home Zentralen werden in diesem Gebäude an unterschiedlichen Stellen positioniert. Die beiden Smart Home Zentralen, homee und WiButler sowie die Fritz!Box 7590 werden im Abstellraum



Abbildung 3.11: Smart Home Zentralen im Haus bis 400 m² Wohnfläche

neben dem Wohnraum im 1. Obergeschoss aufgestellt. In diesem Raum befinden sich die weiteren technischen Geräte des Hauses, wie zum Beispiel die Klingelanlage. Der Apple Home Pod mini hingegen wird aufgrund der Sprachassistentenfunktion nicht in der abgeschlossenen Position im Abstellraum positioniert, sondern im Wohnbereich an einer Stelle, an der die Funktion der Sprachassistenten erfüllt werden kann (Abbildung 3.11). Anschließend werden die drei Smart Home Zentralen in Betrieb genommen und mit den Heizkörperstellantrieben verbunden.

Die Messung in einem Mehrfamilienhaus konnte auf Grund der Corona Pandemie nicht stattfinden. Viele Bewohner der angefragten Häuser hatten Bedenken bezüglich des Kontaktes oder waren unaufgeschlossen bezüglich der Versuche. Damit trotzdem eine größere Datenlage geschaffen werden konnte, wird ein weiterer Versuch im Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche bis 400 m² in Dortmund durchgeführt. Dabei steht nun die Durchdringung der Funkwellen durch die Holzbalkendecken im Altbauteil des Gebäudes im Vordergrund. Aus diesem Grund werden die Smart Home Zentralen in dem Dachgeschoss des Altbaus aufgestellt. Auch hier werden die homee und WiButler Zentrale und die Fritz!Box 7590 in der „Technikecke“ des Raumes aufgestellt und der Home Pod mini mittig im Raum (Abbildung 3.12). Mit dem Fokus auf die Funkreichweiten bei Holzbalkendecken und Lehmziegelwänden in direkter Nähe zu den Smart Home Zentralen wird in diesem Versuch lediglich der Fachwerkhaupteil des Hauses betrachtet.



Abbildung 3.12: Vereinfachte Darstellung der Grundrisse des Hauses bis 400 m² Wohnfläche mit eingetragenen Messpunkten und eingetragener Position der Smart Home Zentralen bei der zweiten Messung

3.4 Langzeitmessung

Für die Langzeitmessung der Umgebungstemperatur mit den in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren werden die Stellantriebe auf einer Ablage an einem Fenster in der Abstelle im Dachgeschoss des Hauses bis zu 400 m² in Dortmund, wie in Abbildung 3.13 dargestellt, platziert. Als Referenztemperatursensor wird dabei ein Testo 147 H verwendet. Die Lage repräsentiert dabei einen häufigen Montageort von Heizkörpern im Wohnbereich und bietet darüber hinaus die Möglichkeit zur schnellen Abkühlung der Umgebungstemperatur durch Öffnen des Fensters, da die Außentemperatur zum Zeitpunkt der Messung am 29.11.2021 um 12 Uhr 2°C beträgt.



Abbildung 3.13: Anordnung der Stellantriebe und des Referenzmessmittels

Während der Temperaturmessung wird ein Programm durchlaufen, mit dem die Messgenauigkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit der Stellantriebe untersucht wird. Zunächst wird für eine Stunde die Umgebungstemperatur, bei geschlossenem Fenster und normal (auf circa 20°C) eingestellten Heizkörpern gemessen. Anschließend wird das Fenster für eine halbe Stunde geöffnet. Dabei soll vor allem festgestellt werden, wie schnell die FHKSA auf die Temperaturveränderung reagieren und wie genau die in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren diese Veränderung messen.

Anschließend wird das Fenster geschlossen und die Stellantriebe sollen sich für eine halbe Stunde an die Raumtemperatur anpassen. Anschließend werden die Heizkörperventile im Raum für zwei Stunden voll geöffnet, um einen schnellen Anstieg der Raumtemperatur zu forcieren.

Die bei der Ergebnisbetrachtung wichtigsten Größen sind zum einen die mit Gl. 3.1 definierte Temperaturabweichung eines Stellantriebs zu einem beliebigen Zeitpunkt im Vergleich zur Referenz.

$$\Delta T_j = T_{\text{ref},j} - T_{i,j} \quad j \in [1:240] \quad \text{Gl. 3.1}$$

Wobei der Index i für einen beliebigen Stellantrieb und der Index j einen beliebigen Zeitpunkt innerhalb der 4 Stunden Messzeitraum steht. Die nächste im Ergebnis zu betrachtende Größe ist der zeitliche Mittelwert der Abweichungen. Dieser ergibt sich für einen Stellantrieb i zu:

$$\Delta T_{m,i} = \frac{\sum_{j=1}^{240} \Delta T_{j,i}}{240} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Da viele der Systeme die Einstellung eines Offsets also eines Korrekturwertes auf den gemessenen Wert zulassen, wird diese Betrachtung auch mit den gemessenen Daten durchgeführt. So wird der Wert der mittleren Abweichungen als Offset für den Temperaturverlauf gewählt. Das bedeutet für den mit einem Offset hinzugerechneten Temperaturwert zu einem beliebigen Zeitpunkt:

$$T_{\text{Offset},j} = T_{i,j} - \Delta T_{m,i} \quad \text{Gl. 3.3}$$

3.5 Auswertungsmethoden

Für die abschließende Auswertung werden die Ergebnisse in der in Tabelle 3.2 dargestellten Matrix zusammengefasst und bewertet. In dieser Matrix sind die einzeln zu untersuchenden Faktoren in den Spalten aufgelistet. Waagrecht dazu sind die Funkstandards beziehungsweise die Stellantriebe in den einzelnen Zeilen aufgestellt. Für jeden der untersuchten Faktoren werden die untersuchten Geräte in einem Ranking gegenübergestellt und nach der Platzierung entgegengesetzt mit den Punkten eins bis sechs bewertet. Der Stellantrieb mit dem besten Ergebnis erhält dementsprechend sechs Punkte, der Stellantrieb mit dem zweitbesten Ergebnis erhält fünf Punkt und so weiter bis zum sechst, platzierten, der einen Punkt erhält. Sollten zwei Stellantriebe in einer Kategorie dasselbe Ergebnis haben, so bekommen beide die höhere Punktzahl und die anschließende Punktzahl wird ausgelassen. Sollten zum Beispiel zwei Stellantriebe das beste Ergebniserzielen, so bekommen beide sechs Punkte. Der Stellantrieb mit dem nächstbesten Ergebnis erhält dann vier Punkte.

Tabelle 3.2: Vorstellung der Auswertungsmatrix (nicht ausgefüllt)

FHKSa	Gemessene Freifeld Reichweite	Vollständig abgedeckte Räume (l)	Erreicht Messpunkte (l)	Maximale Gebäude Reichweite (gemessen) [m]	Max. # Wände zwischen Messstelle und Zentrale bei der noch eine Verbindung hergestellt werden kann	Betragsmäßig höchste Messabweichung	Zeitlich gemittelte Messabweichung	Punktesumme
Viessmann ViCare Heizkörperthermostat	- m	- / 63	- / 91	- m	-	- K	- K	-
Punkte	-	-	-	-	-	-	-	-
Afriso AVD 30	- m	- / 63	- / 91	- m	-	- K	- K	-
Punkte	-	-	-	-	-	-	-	-
Oventrop mote420	- m	- / 63	- / 91	- m	-	- K	- K	-
Punkte	-	-	-	-	-	-	-	-
eve Thermo	- m	- / 63	- / 91	- m	-	- K	- K	-
Punkte	-	-	-	-	-	-	-	-
Devollo Connect Heating Thermostat	- m	- / 63	- / 91	- m	-	- K	- K	-
Punkte	-	-	-	-	-	-	-	-
AVM Fritz!DECT 301	- m	- / 44	- / 68	- m	-	- K	- K	-
Punkte	-	-	-	-	-	-	-	-

4 Auswertung der Funkstandarduntersuchung

Die resultierenden Ergebnisse aus den im vorherigen Kapitel vorgestellten Versuchen werden in diesem Kapitel vorgestellt. Dafür werden in derselben Reihenfolge wie in Kapitel 3 die Ergebnisse der einzelnen Versuche behandelt. Bei der Reichweitenmessung im Gebäude wird dabei zunächst jeweils auf die einzelnen Versuche eingegangen, bevor diese anschließend zu einem Gesamtergebnis der Gebäudereichweitenmessung zusammengefasst werden. Nach der Vorstellung der Messergebnisse werden diese in zusammengefasster Form in die in Kapitel 3.5 vorgestellte Auswertungsmatrix eingetragen. Auf dieser Basis werden abschließend allgemeine Erkenntnisse aus den Versuchen geschlussfolgert und daraufhin eine Empfehlung für Entwickler von vernetzten EZR formuliert.

4.1 Freifeldmessung

Bei den Freifeldmessungen wurde untersucht, wie weit die betrachteten Geräte auf einer Strecke ohne Hindernisse Funkwellen empfangen und senden können. Ziel dieser Messungen ist es, auf Basis dieser Ergebnisse einen Trend abzuschätzen für die Reichweiten im Gebäude mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Frequenzen. Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen und vergleicht diese darüber hinaus mit den Herstellerangaben bzgl. der Freifeldreichweite aus Tabelle 3.1.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Freifeld-Reichweitenmessungen im Vergleich zu den Werten aus Tabelle 3.1 und Tabelle 2.2 [24], [31], [36], [40], [52], [54]. Mit einer Auflösung der Messgenauigkeit von 2,5 m

Geräte/ Zentrale/ Funkstandard	Herstellerangaben/ Literaturangaben	Gemessene Reichweite
Viessmann ViCare Heizkörper-Thermostat/ WiButler/ ZigBee	30 m	190 m
DevoLo Connect Heating Thermostat/ homee/ Z-Wave	100 m	50 m
Oventrop mote420/ WiButler/ EnOcean	100 m	30 m
Afriso AVD30/ homee/ EnOcean	300 m	75 m
eve Thermo/ Home Pod mini/ Thread	100 m	175 m
AVM Fritz!DECT 301/ Fritz!Box 7590/ DECT	300 m	347,5 m

Der Funkstandard DECT in der Zentrale Fritz!Box 7590 und dem FHKSa Fritz!DECT 301 erreichen dabei mit 347,5 m die mit Abstand höchste gemessene Reichweite und erreichen dabei einen 47,5 m über den Literaturangaben liegenden Wert, was circa 115% der Literaturangabe sind. Wird der vom DECT Funkstandard erreichte Wert als Referenz betrachtet, so erreicht der Funkstandard ZigBee, in der Gerätekombination WiButler Pro und ViCare Heizkörperthermostat mit einer gemessenen Freifeldfunkreichweite von 190 m circa 55% der Referenzreichweite, jedoch das 6,3-fache der Herstellerangaben und das 1,9-fache der Literaturwerte aus Tabelle 2.2. Mit 15 m weniger Reichweite

als das ViCare Heizkörperthermostat erreicht der Funkstandard Thread im Home Pod mini und im FHKSa Thermo eine Reichweite von 175 m. Dies entspricht circa 50% der Referenzreichweite und einem 1,75-fachen der Literaturangaben. Damit liegen die drei FHKSa mit Funkstandards, die eine Funkfrequenz von über einem Gigahertz verwenden, allesamt bei einer Freifeldreichweite von über 100 m. Im Vergleich dazu liegen die drei FHKSa, die Funkstandards mit einer Funkfrequenz von unter einem Gigahertz aufweisen, allesamt unter diesem Bereich. So erreicht der Funkstandard EnOcean im mit dem E.H.-Prinzip ausgestatteten FHKSa AVD30 von Afriso in Kombination mit dem homee EnOcean-Cube die maximale Freifeldreichweite der Sub ein Gigahertz Funkstandards von 75 m. Dies entspricht dabei circa 22% der Referenzfreifeldfunkreichweite des Funkstandards DECT und 25% der in der Literatur für den Funkstandard EnOcean angegebenen Freifeldreichweite von 300 m. Die nächst größte Freifeldreichweite weist der Funkstandard Z-Wave mit dem Devolo Connect Heating Thermostat und dem homee Z-Wave-Cube auf. Dieser erreicht mit 50 m gemessener Reichweite circa 14% der DECT Referenzreichweite und circa 67% der maximal gemessenen Reichweite der unter ein Gigahertz Funkstandards. Im Vergleich mit den Literaturangaben erreicht die Z-Wave Gerätekombination die Hälfte der angegebenen 100 m. Die geringste Reichweite weist der Funkstandard EnOcean in Kombination mit der Energieversorgung durch Batterien auf. So erreicht die Gerätekombination aus WiButler Pro und dem batteriebetriebenen mote420 eine Freifeldreichweite von 30 m. Dies sind circa 91% weniger als die DECT Referenzreichweite und mit 45 m Differenz 40% der Reichweite der EnOcean Gerätekombination, bei der der FHKSa mit dem E.H.-Ansatz mit Energie versorgt wird.

In Bezug auf den WiButler und den beiden damit verbundenen Geräten, dem Viessmann ViCare Heizkörper-Thermostat und dem Oventrop mote420 zeigen die Ergebnisse, dass die Herstellerangaben sich genau entgegengesetzt der Messergebnisse verhalten. So hat das mit dem ZigBee Funkstandard ausgestattete Viessmann ViCare Heizkörper-Thermostat mit 190 m eine deutlich höher gemessene Freifeldfunkreichweite als der Stellantrieb mote420 von Oventrop mit 30 m. Nimmt man an, dass die H.A. des WiButler gegebenenfalls in den Technischen Spezifikationen der Zentrale vertauscht sind, so wären diese deutlich näher an den gemessenen Ergebnissen.

Es ist zu beobachten, dass die Funkstandards Thread und ZigBee trotz der unterschiedlichen Gerätekombinationen zwar eine ähnlich hohe Freifeldfunkreichweite haben, aber die Gerätekombination aus WiButler und Viessmann ViCare Heizkörper-Thermostat und dem Funkstandard ZigBee mit 190 m Reichweite eine etwas höhere Reichweite hat als die Gerätekombination aus Apple Home Pod mini und eve Thermo mit dem Funkstandard Thread und 175 m. Da beide Funkstandards auf derselben IEEE-Norm basieren, ist davon auszugehen, dass die Gerätekombination aus WiButler und Viessmann ViCare Heizkörper-Thermostat eine höhere Reichweite haben wird als die Gerätekombination aus Apple Home Pod mini und eve Thermo. Des Weiteren ist bei den 868 MHz Funkstandards – Z-Wave im Devolo Connect Heating Thermostat und EnOcean in den Stellantrieben Afriso AVD30 und Oventrop mote420 – anhand der gemessenen Freifeldfunkreichweiten davon auszugehen, dass diese auch im Gebäude eine solche Verteilung erreichen.

4.2 Gebäudemessungen

Die erste der drei Messungen wurde im Haus bis 200 m² in Hannover durchgeführt. Die resultierende Messstellenabdeckung der einzelnen Stellantriebe im vereinfachten Grundriss ist dabei für das 1.OG des Gebäudes schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt und vollständig in Anhang C angefügt. Abbildung 4.2 zeigt die dazugehörige Auswertung der Ergebnisse in einem Balkendiagramm. Bei den Messungen sind beim Fritz!DECT 301, wie schon beschrieben, technische Probleme aufgetreten, weshalb dieser nicht untersucht werden konnte. Unter den restlichen FHKSa hat das mit dem Funkstandard Thread operierende Gerät Thermo der Firma eve mit 100% Raum- und Messstellenabdeckung den höchsten Wert erreicht. Die maximale Funkdistanz im Haus bis 200 m² Wohnfläche betrug dabei bei einer geraden Linie zwischen dem Home Pod mini von Apple und eve's Thermo 6,7 m (Abbildung 4.2). Des Weiteren durchdrang der Funkstandard Thread Maximum von vier Wänden in an vier Unterschiedlichen Messstellen; im Keller im Raum Keller 2, im 1.OG im Raum Kind 2 und im Dachgeschoss in den Räumen HZG und Abstell groß. Im Dachgeschoss wurden dabei zwei Stahlbetondecken sowie jeweils zwei Ziegelmauern durchdrungen. Dagegen wurden im 1. OG eine Stahlbetondecke, eine Trockenbauwand sowie zwei Ziegelwände durchdrungen. Die im Keller durchdrungenen Mauern bestehen aus einer Stahlbetondecke und drei Ziegelmauern. Ein mit 83% Messstellenabdeckung geringer ausfallendes Ergebnis, hat das ViCare Heizkörper-Thermostat mit dem ZigBee Funkstandard erreicht, der auf derselben IEEE-Richtlinie wie der Funkstandard Thread basiert. Die maximal erreichte Funkreichweite bei einer geraden Linie zwischen der WiButler-Zentrale und dem ViCare Heizkörper-Thermostat liegt bei 6,2 m. Des Weiteren liegt die Anzahl der am meisten durchdrungenen Wände bei 4. Dabei jedoch nicht in mehreren Räumen, sondern einzig im Raum Kind 2 im 1.OG des Hauses. Dieses Ergebnis entspricht einer Umkehrung der Erkenntnis, die sich aus den Ergebnissen der Freifeldreichweitenmessung abgebildet haben.



Abbildung 4.1: Ergebnis der Reichweitenmessung im Gebäude bis 200 m² Wohnfläche

Eine bessere Messstellenabdeckung als das ViCare Heizkörper-Thermostat hat das Devolo Connect Heating Thermostat in Kombination mit der homee Smart Home-Zentrale erreicht. Diese Gerätekombination erreicht im Gebäude eine Messstellenabdeckung von 96%. Der am weitesten entfernte Messpunkt, an dem der Z-Wave-Cube von homee eine stabile Verbindung mit dem Devolo Connect Heating Thermostat herstellen konnte, lag, wie beim eve Thermo bei 6,7 m von dem Z-Wave-Cube von homee entfernt. Die maximale Anzahl von durchdrungenen Wänden lag im Gebäude bei vier. Das Geräte von Devolo hat dabei in drei der vier Räume, bei denen bis zu vier Wände bei einer geradlinigen Verbindung dazwischenliegen, eine stabile Verbindung erreicht. Der Raum, der dabei nicht erreicht wurde, ist Kind 2 im 1.OG des Gebäudes. Die geringsten Messstellenabdeckungen haben die beiden FHKSa mit dem EnOcean Funkstandard. Dabei bestätigte sich das Ergebnis der Freifeldreichweitenmessungen. So hat der FHKSa AVD 30 von Afriso mit der E.H. Technologie 74% abgedeckten Messstellen, an denen eine stabile Verbindung zwischen FHKSa und dem EnOcean Cube des homee Systems hergestellt wurde, eine etwas höhere Messstellenabdeckung im Gebäude als der mit Batterien betriebene FHKSa mote420 von Oventrop, der an 70% aller Messstellen eine stabile Verbindung mit der WiButler Zentrale herstellen konnte (Abbildung 4.2). Der AVD 30 von Afriso hat auf einer maximalen Distanz von 6,2 m eine stabile Verbindung herstellen können und durchdrang ein Maximum von vier Wänden an den Messstellen Kind 2 im 1.OG sowie Abstell klein und HZG im Dachgeschoss des Gebäudes. Der mote420 Stellantrieb von Oventrop hat bei einer maximalen Distanz von 6,2 m eine stabile Verbindung im Gebäude erreicht und durchdrang bei den Messungen an sieben Messstellen maximal zwei Wände, wobei drei Messstellen im Keller, in den Räumen Keller 1 6 m², H.A. und Flur lagen und diese jeweils eine Stahlbetondecke und eine Ziegelmauer trennten. Drei der Messstellen lagen im Erdgeschoss, in den Räumen Essen, Küche + Abstelle und Wohnen 4, wobei diese bis auf den zuletzt genannten Raum jeweils durch zwei Ziegelmauern getrennt werden und der letzte durch eine Trockenbauwand und durch eine Ziegelmauer.

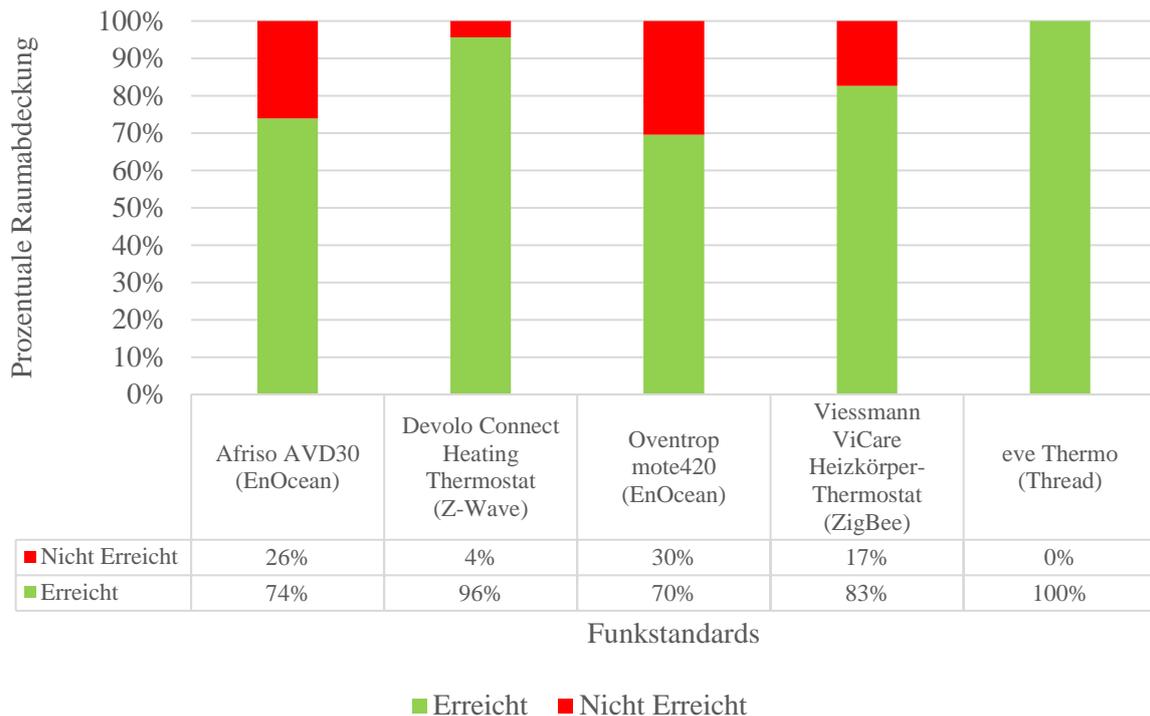


Abbildung 4.2: Messstellenabdeckung im Haus bis 200 m² Wohnfläche

Bei den Messungen im Gebäude bis 400 m² Wohnfläche waren die technischen Probleme des Fritz!DECT 301 behoben und dieser konnte mituntersucht werden. Bei der ersten der beiden Messungen, bei der die Smart Home Zentralen im 1. OG in der Abstellkammer und der Apple Home Pod mini im Wohnbereich im 1.OG aufgestellt waren, wurde bei allen Stellantrieben eine Messstellenabdeckung von weniger als 100% Prozent erreicht, womit die Grenzen eines jeden FHKSa erreicht wurden. Eine Zusammenfassung der in Anhang D detaillierten Übersicht über die Messstellenabdeckung in den einzelnen Räumen für die einzelnen FHKSa bietet Abbildung 4.3. Diese stellt die prozentuale Messstellenabdeckung im Gebäude für jeden Stellantrieb in einer zusammenfassenden Form dar. Die maximale Messstellenabdeckung hat dabei der mit dem DECT Funkstandard funkende Fritz!DECT 301 in Zusammenhang mit der Fritz!Box 7590 erreicht. Die Messstellenabdeckung betrug dabei 98%. Bei 50 Messstellen bedeutet dies, dass nur ein Messpunkt nicht abgedeckt wurde, der Technik-Raum im Keller des Hauses. Die maximale Distanz, über die somit eine stabile Verbindung zwischen dem Fritz!DECT 301 und der Fritz!Box 7590 aufgebaut werden konnte, beträgt 16,7 m. Außerdem konnte der Funkstandard DECT die maximale Anzahl von sieben Wänden im Gebäude bis zur Messstelle Seminarraum überwinden. Bis zum Seminarraum liegen vier Trockenbauwände, eine Ziegelmauer eine Lehmputzwand und eine Stahlbetondecke zwischen der Fritz!Box 7590 und der Messstelle. Für die Funkstandards Thread, Z-Wave und ZigBee bestätigten sich bei den Messungen die Ergebnisse der Messungen im Gebäude bis 200 m² Wohnfläche. So erreicht der Funkstandard Thread im FHKSa Thermo vom Hersteller eve eine Messstellenabdeckung von 78%, das zweitbeste Ergebnis nach dem Fritz!DECT 301. Auf Grund der zu den anderen Zentralen abweichenden und im Haus zentral gelegenen Position des Home Pod mini von Apple, liegt die maximal erreichte Reichweite des Thermo von eve bei 10,7 m. Die maximale Anzahl an durchdrungenen Wänden und Decken liegt für den Thermo an der Messstelle Kind 2 im 1. OG bei fünf. Dabei wurden zwei Ziegelwände, eine Lehmputzwand und zwei Trockenbauwände durchdrungen. Eine zehn Prozentpunkte

geringere Abdeckung als der Thermo von eve erreichte der Funkstandard Z-Wave im Devolo Connect Heating Thermostat mit 68 %. Dabei erreichte das Devolo Connect Heating Thermostat eine maximale Reichweite von 16,5 m und durchdrang genauso wie der eve Thermo im Raum Kind 2 im 1.OG maximal sechs Wände.

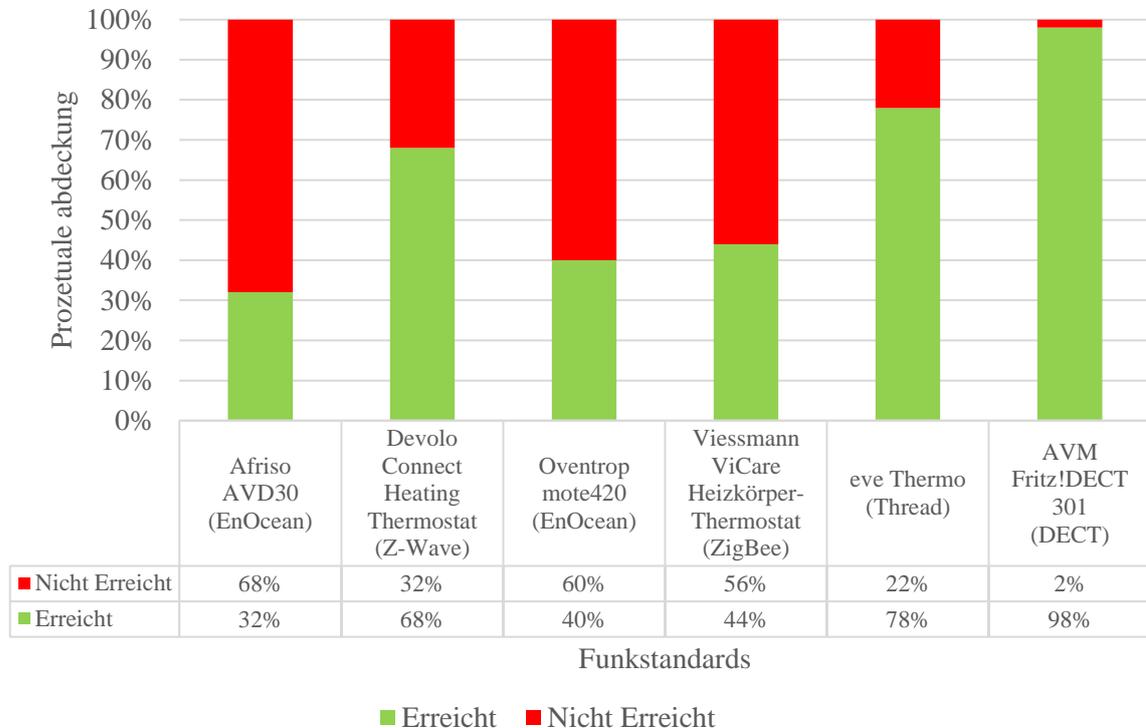


Abbildung 4.3: Messstellenabdeckung bei der ersten Messung im Haus bis 400 m² Wohnfläche

Das darauf folgend viert beste Ergebnis in Bezug auf die Messstellenabdeckung erreichte das ViCare Heizkörperthermostat mit dem ZigBee Funkstandard von Viessmann mit 44% Messstellenabdeckung in Kombination mit der WiButler Zentrale. Die dabei maximal erreichte Funkreichweite lag bei 14,9 m. Die maximale Anzahl an durchdrungenen Wänden und Decken lag an den Messstellen Büro + Flur 1 im Erdgeschoss und Kind 1 im 1. OG bei vier. Bei der Verbindung zur Messstelle Büro + Flur 1 im Erdgeschoss wurden drei Trockenbauwände und eine Stahlbetondecke durchdrungen. Anders wurden bei der Verbindung zum Raum Kind 1 im 1.OG keine Decken, sondern eine Lehmputzwand sowie drei Trockenbauwände durchdrungen. Abgeschlossen wird die Ergebnisauflistung, wie schon bei den Messungen im Wohnhaus der Familie bis 200 m² Wohnfläche, durch die beiden mit dem EnOcean Funkstandard ausgestatteten FHKSa AVD 30 und mote420 von Afriso und Oventrop. Der sich bei den Freifeldmessungen und den Messungen im Wohnhaus bis 200 m² abzeichnende Trend, dass der AVD 30 eine größere Reichweite hat als der mote420, bestätigt sich bei diesen Messungen nicht. So erreicht das Gerät mote420 von Oventrop mit 40% Messstellenabdeckung 14,9 m Funkreichweite und mit vier überwundenen Wänden, an den zwei Messstellen Büro 1 + Flur 2 4 im Erdgeschoss und dem schon beschriebenen Raum Kind 1 im 1. OG ein besseres Ergebnis als der FHKSa AVD 30 von Afriso mit nur 32% Messstellenabdeckung, einer maximalen Funkreichweite von 13 m und maximal vier durchdrungenen Wänden an der Messstelle Flur 5 im 1. OG. Dabei lagen beim Oventrop mote420 zwischen der Smart Home Zentrale und der Messstelle Flur Büro 1 + Flur 2 4 im Erdgeschoss eine Stahlbetondecke sowie drei Trockenbauwände. Den Afriso AVD 30 trennten bei der Verbindung mit

der Smart Home Zentrale im Flur 5 vier Wände: eine Lehmputzwand, eine Trockenbauwand und zwei Wände aus Ziegeln.

Bei der zweiten Messung im Gebäude bis 400 m² Wohnfläche wurden die Smart Home Zentralen für die genauere Untersuchung des Einflusses von Holzbalkendecken auf die Funkreichweite im Wohngebäude im Dachgeschoss des Altbaus positioniert. Dabei wurde ausschließlich der Altbau betrachtet. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 4.4 in Form eines Diagrammes dargestellt, welches die prozentuale Messstellenabdeckung der jeweiligen Stellantriebe bei den Untersuchungen zusammenfasst. Die Messstellenabdeckung in den einzelnen Räumen ist detaillierter in Anhang E in der in Abbildung 4.1 vorgestellten Form dargestellt. In den Ergebnissen der Messungen haben sich einige Trends aus vorherigen Messungen widerspiegelt. Der Funkstandard DECT im Fritz!DECT 301 hat in Kombination mit der Fritz!Box 7590 auch bei dieser Messung die höchste Messstellenabdeckung mit 96% erzielt. Das bedeutet bei 18 Messstellen, dass nur eine Messstelle nicht abgedeckt werden konnte. Dies war, wie auch schon bei der ersten Messung im Haus die Messstelle im Technikraum. Das bedeutet eine maximal erreichte Reichweite von 12,9 m. Die maximale Anzahl an durchdrungenen Decken und Wänden beträgt fünf bei der Messstelle Flur 1 im Erdgeschoss des Gebäudes. Bei einer geradlinigen Verbindung wurden somit zwei Holzbalkendecken, zwei Trockenbauwände sowie eine Ziegelmauer durchdrungen. Mit 72% hat der mit dem Funkstandard Thread operierende FHKSa Thermo von eve die zweit größte Messstellenabdeckung erreicht. Die maximale Anzahl durchdrungener Wände und Decken, nach der weiterhin eine stabile Verbindung zwischen FHKSa und dem Home Pod mini von Apple bestand, betrug vier Decken und Wände bis in den Raum HWR im Erdgeschoss. Bei dieser Verbindung wurden zwei Holzbalkendecken durchdrungen sowie eine Trockenbauwand und eine Ziegelwand. Die maximale Funkreichweite mit einer stabilen Funkverbindung im Fachwerkhauseil beträgt 8,1 m. Die nächst höchste Messstellenabdeckung hat dann das Devolo Connect Heating Thermostat von Devolo mit 61% erreicht. Die maximale Funkreichweite des Devolo Connect Heating Thermostat betrug dabei 9,8 m. Die maximale Anzahl der von dem Devolo Connect Heating Thermostat durchdrungenen Wänden beträgt an den Messstellen Bad und Eltern im 1. OG des Gebäudes vier. Bei der Verbindung zum Raum Bad wurden dabei eine Holzbalkendecke, eine Ziegelwand und zwei Trockenbauwände durchdrungen. Bis zum Raum Eltern wurde dabei auch eine Holzbalkendecke durchdrungen und weiter zwei Ziegelwände sowie eine Trockenbauwand. Das mit dem ZigBee Funkstandard ausgestattete ViCare Heizkörperthermostat von Viessmann hat eine Messstellenabdeckung von 44% erreicht. Dabei beträgt die maximal erreichte Funkreichweite 10,6 m. Im Altbau wurden vier Wände bei der Messstelle Bad durchdrungen, bevor keine stabile Verbindung zwischen der WiButler Zentrale und dem ViCare Heizkörperthermostat hergestellt werden konnte. Die bauliche Beschaffenheit zwischen Smart Home Zentrale und der Messstelle ist dabei bereits für das Devolo Connect Heating Thermostat erläutert worden. Eine genauso große Messstellenabdeckung wie das ViCare Heizkörper Thermostat hat der FHKSa AVD 30 von AFRISO erreicht. Die maximale Funkreichweite betrug dabei 10,6 m und es konnten genauso wie beim ViCare Heizkörper Thermostat die vier Wände bis zum Raum Bad im 1.OG des Gebäudes durchdrungen werden, bevor keine stabile Verbindung hergestellt werden konnte. Die geringste Messstellenabdeckung hat das FHKSa mote420 von Oventrop zusammen mit der WiButler-Zentrale erreicht. Die Messstellenabdeckung dieser Gerätekombination lag bei 39%, die maximale Reichweite betrug 8,8 m. Auch der mote420 FHKSa von

Oventrop hat dabei die Verbindung im Raum Bad des 1.OG des Gebäudes erreicht und somit, genauso wie die beiden vorher erwähnten Stellantriebe, vier Wände durchdrungen.

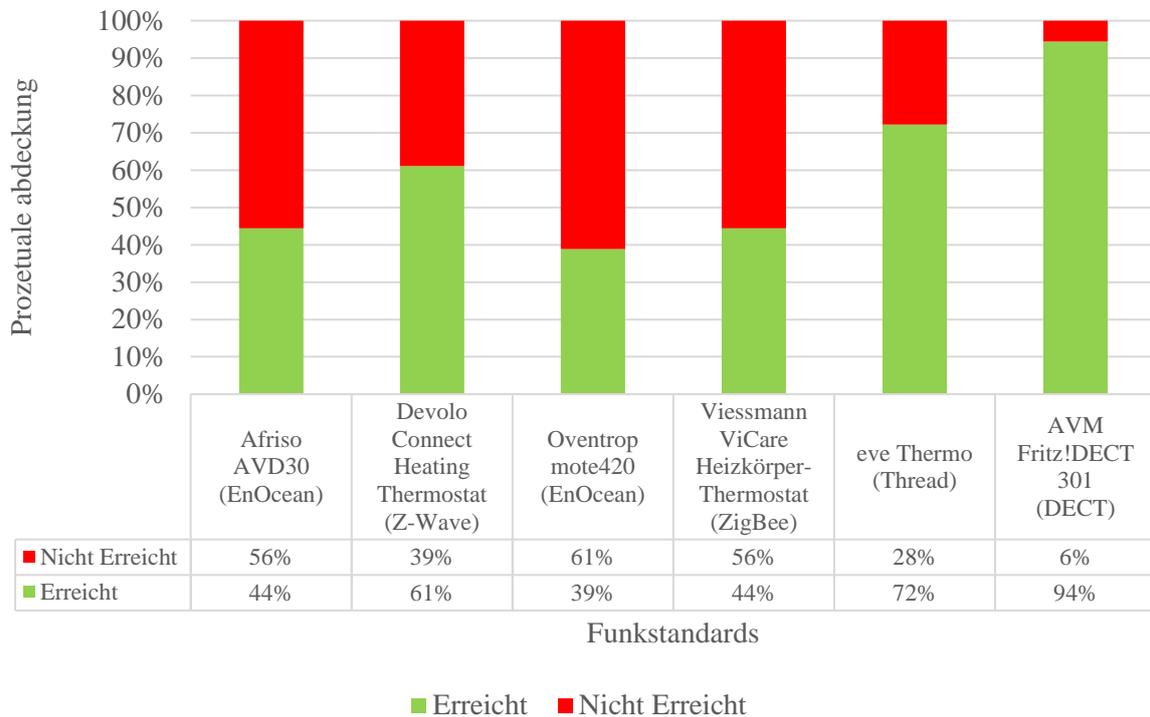


Abbildung 4.4: Messstellenabdeckung bei der zweiten Messung im Haus bis 400 m² Wohnfläche

Werden alle Messstellen, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, zusammengefasst betrachtet, erreicht der mit dem DECT Funkstandard funkende Stellantrieb Fritz!DECT 301 mit 97 % Messstellenabdeckung die höchste Messstellenabdeckung unter den untersuchten Geräten. Die höchste Reichweite, die dieser FHKSa erzielt hat, beträgt 16,7 m. Die höchste Anzahl überwundener Wände und Decken ist sieben. Die zweithöchste Messstellenabdeckung in diesem Vergleich erreicht der Stellantrieb Thermo des Herstellers eve mit 82 %. Der mit dem Funkstandard Thread operierende Stellantrieb erreichte dabei eine maximale Reichweite im Gebäude von 10,7 m und hat maximal fünf Wände durchdrungen. Der auf demselben IEEE Standard basierende Funkstandard ZigBee erreicht dabei in der Gerätekombination von WiButler Zentrale und ViCare Heizkörperthermostat von Viessmann ein deutlich niedrigeres Ergebnis als der Funkstandard Thread und ist schlechter als der Funkstandard Z-Wave im homee Z-Wave-Cube und dem Devolo Connect Heating Thermostat. Dieses hat eine maximale Messstellenabdeckung von 74 % erreicht, eine maximale Reichweite im Gebäude von 16,7 m erzielt und maximal sechs Wände durchdrungen. Der Funkstandard ZigBee im ViCare Heizkörperthermostat hat insgesamt eine Messstellenabdeckung von 54 % erreicht. Die maximale Reichweite des Funkstandards in allen Untersuchungen lautet 14,9 m und die höchste Anzahl an Wänden, die durch den Funkstandard ZigBee in den Messungen durchdrungen wurden liegt bei vier. Wie schon bei den Einzelbetrachtungen der Ergebnisse haben die beiden mit dem Funkstandard EnOcean ausgestatteten FHKSa die geringsten Messstellenabdeckungen erreicht. Dabei hat der mit batteriebetriebene FHKSa mote420 des Herstellers Oventrop eine etwas höhere Abdeckung mit 47 % erreicht. Die maximale Reichweite dieses Stellantriebs lag bei 14,9 m und die maximale Anzahl an durchdrungen Wänden liegt bei vier. Der mit dem E.H.-Prinzip ausgestattete Stellantrieb AVD30 von Afriso hat dabei eine etwas

geringere Messstellenabdeckung von 45 %. Des Weiteren hat dieser Stellantrieb eine maximale Reichweite im Gebäude von 13 m erreicht und eine maximale Anzahl von vier Wänden durchdrungen.

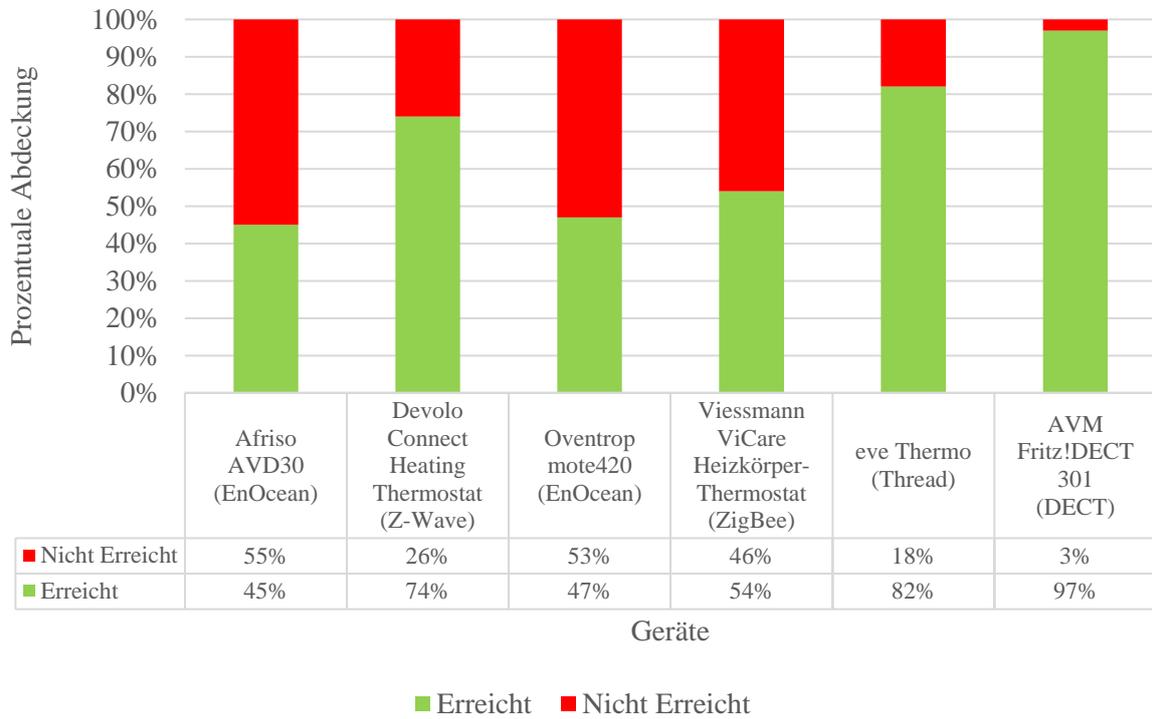


Abbildung 4.5: Zusammenfassung aller Ergebnisse der drei Reichweitenmessungen im Gebäude

4.3 Temperaturmessung

Die Temperaturverläufe der über einen Zeitraum von vier Stunden stattfindenden Temperaturmessung sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Dabei ist der durch das Testo 147 H aufgenommene Referenztemperaturverlauf in schwarz gezeichnet. In Tabelle 4.2 sind dabei die positiv und negativ maximalen Abweichungen sowie die zeitlich gemittelte Abweichung der in den einzelnen Stellantrieben integrierten Temperatursensoren aufgelistet.

Zusätzlich zu Tabelle 4.2 sind in Abbildung 4.7 die Graphen der Temperaturabweichungen eines jeden Stellantriebes über die Zeit in einem Diagramm dargestellt. Zu erkennen ist dabei, dass keines der Geräte dauerhaft die Referenz abbildet, wobei die Stellantriebe Devolo Connect Heating Thermostat, AVM Fritz!DECT 301 und Oventrop mote420 bis auf die Zeitpunkte, an denen starke Temperaturveränderungen stattfanden, nah an der Referenz liegen. Interessant ist dieses Ergebnis vor allem bei den Stellantrieben AVM Fritz!DECT 301 und Oventrop mote420, da diese über hohe Sendezyklen verfügen und trotzdem den Temperaturgraphen bis auf 0,5 K genau abbilden.

Tabelle 4.2: Maximale positive und negative Abweichungen sowie zeitlich gemittelte Abweichungen der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren zur Referenzmessung

Abweichung	Fritz!DECT 301 (DECT)	Afriso AVD 30 (EnOcean)	Devolo Connect Heating Thermostat (Z-Wave)	Viessmann ViCare Heizkörper Thermostat (ZigBee)	Oventrop mote420 (EnOcean)	eve Thermo (Thread)
Max. positive Abweichung: [K]	5,1	4,1	0,9	2,9	4,1	4,6
Max. negative Abweichung: [K]	-1,8	-3,7	-5,2	-1,2	-1,1	-1,8
Zeitlich gemittelte Abweichung: [K]	0,4	-0,2	-0,2	1,4	0,5	0,7

Anders verhalten sich die Geräte AVD 30 von Afriso und ViCare Heizkörperthermostat von Viessmann. Der Stellantrieb AVD 30 weist während der Phase des offenen Fensters und der anschließenden Anpassungsphase bei geschlossenem Fenster sehr hohe Abweichungen erst in positiver Form und anschließend in negativer Form auf. Im Mittel resultiert dies in einer niedrigen mittleren Temperaturabweichung, ist jedoch zeitlich sehr lange vorhanden bevor sich die Abweichung der Referenz wieder annähert. Das ViCare Heizkörperthermostat von Viessmann hingegen hat über fast den gesamten Zeitraum eine hohe Abweichung, woraus die hohe mittlere Abweichung resultiert. Eine

verhältnismäßig nahe Abbildung der Referenz erreicht dieser Stellantrieb während der Abkühlungsphase.

Die durch die Offsetanpassung resultierenden Temperaturverläufe der einzelnen Stellantriebe sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

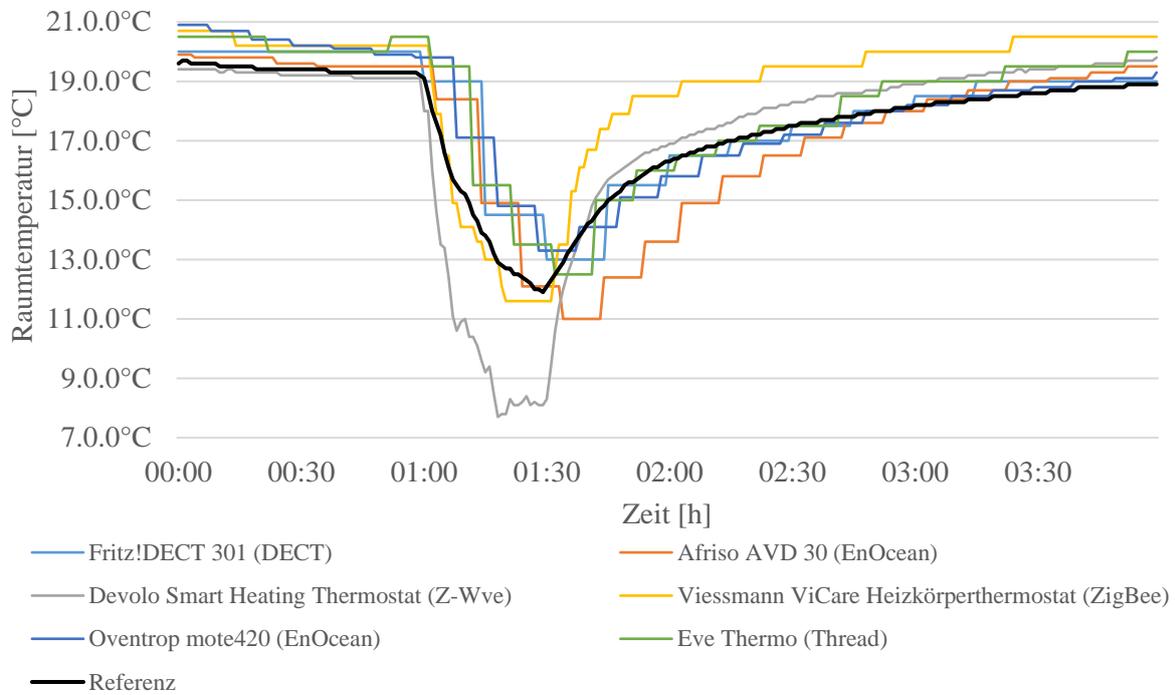


Abbildung 4.6: Zeitlich gemessener Raumtemperaturverlauf

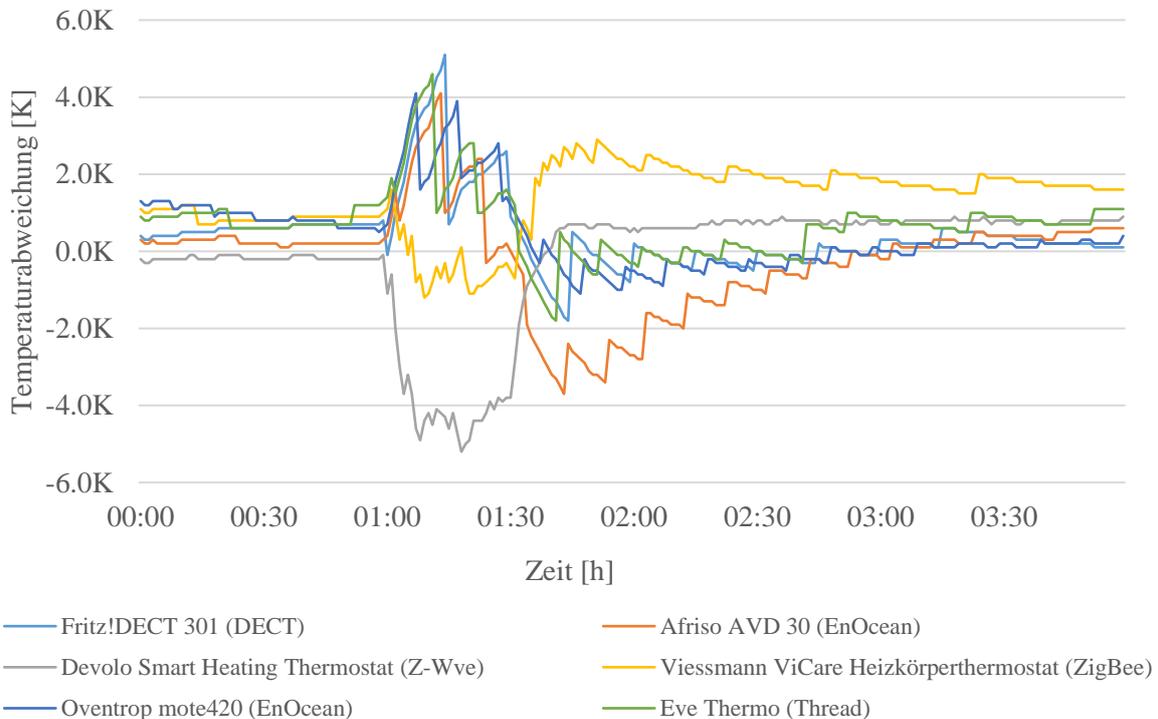


Abbildung 4.7: Zeitliche Verläufe der Temperaturabweichungen der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren

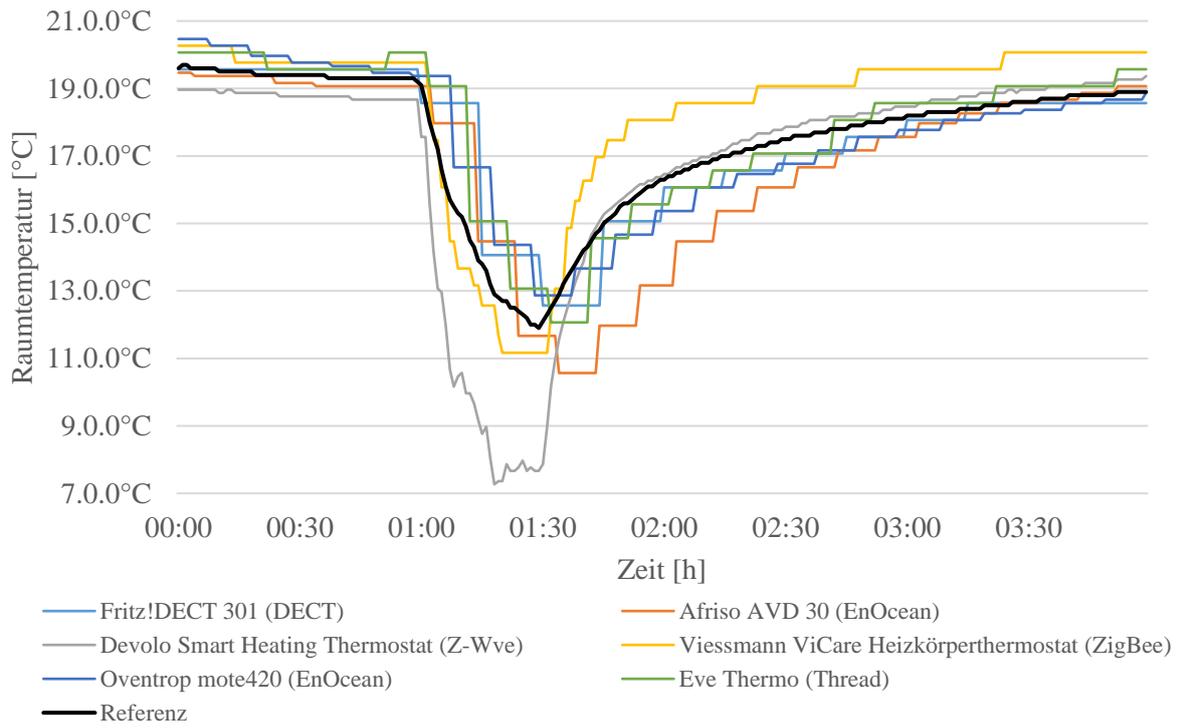


Abbildung 4.8: Zeitlicher Raumtemperaturverlauf mit angepasstem Offset

4.4 Zusammenfassung

Fasst man all diese Ergebnisse zusammen, füllt man die Ergebnisspalten von Tabelle 3.2 und bewertet die Ergebnismatrix nach der in Kapitel 3.5 beschriebenen Methode, so resultiert dies zu der in Tabelle 4.4 dargestellten Matrix. Daraus ergibt sich die in Tabelle 4.3 gezeigte Rangliste

Tabelle 4.3: Zusammenfassende Platzierung der sechs untersuchten Geräte

Platz	FHKSa	Funkstandard	Punkte
1	AVM Fritz!DECT 301	DECT	36
2	Devo Connect Heating Thermostat	Z-Wave	28
3	Viessmann ViCare Heizkörperthermostat	ZigBee	25
4	eve Thermo	Thread	24
5	Afriso AVD 30	EnOcean	22
6	Oventrop mote420	EnOcean	19

Vor allem das AVM Fritz!DECT 301 schneidet dabei sehr gut ab mit 36 von 42 Punkten. Das liegt vor allem an der starken Gewichtung der Reichweiten in dieser Auswertung, welche eine der Stärken des DECT Funkstandards ist. In allen Kategorien, die mit der Reichweitenuntersuchung zusammenhängen erreicht der Stellantrieb die höchsten Werte. Bei den Temperaturmessungen hingegen schneidet der Stellantrieb im unteren Drittel ab und sammelt mit sechs Punkten die zweit wenigsten Punkte unter allen Stellantrieben. Den zweiten Platz belegt das mit dem Z-Wave Funkstandard integrierte Devo Connect Heating Thermostat von Devo mit 28 Punkten. Dabei sammelt der FHKSa vor allem durch ein verhältnismäßig gutes Abschneiden bei der Gebäudereichweite sowie der zeitlich gemittelten Abweichung Punkte. Bei der Freifeldreichweite sowie der betragsmäßig größten Temperaturabweichung erreicht der FHKSa hingegen jeweils die niedrigste Punktzahl. Insgesamt lässt sich in Bezug auf den Funkstandard Z-Wave bei Betrachtung der Reichweitenmessung eine hohe Funkreichweite im Gebäude feststellen, jedoch eine verhältnismäßig geringe Freifeldreichweite. An dritter Stelle positioniert ist das ViCare Heizkörperthermostat. Diese mittlere Positionierung spiegelt sich dabei auch mit der hauptsächlich mittelmäßigen Positionierung bei den einzelnen Reichweitenfaktoren wieder. Diese befinden sich allesamt bis auf die Freifeld Reichweite, die mit Position zwei in der Einzelfaktorenbewertung mit fünf Punkten eine bessere Positionierung hat, bei Position drei. Bei der Langzeittemperaturmessung fällt das Resultat der Bewertung genau auf der Mitte, jedoch nicht durch zwei Bewertungen im Mittelfeld, sondern zwei extreme Abschneiden an erster und letzter Stelle. So weicht der im ViCare Heizkörperthermostat integrierte Temperatursensor zwar betragsmäßig am geringsten von der Referenztemperaturkurve ab, im zeitlichen Mittel jedoch am stärksten. Den vierten Platz belegt der Stellantrieb Thermo des Herstellers eve, der mit dem Funkstandard Thread ausgestattet ist. Dieser überzeugt zwar bei den Freifeldreichweiten und den

Messstellen- und Raumabdeckungen, jedoch nicht bei der Langzeittemperaturmessung, bei welcher der Stellantrieb mit insgesamt fünf Punkten aus den zwei damit zusammenhängenden Kategorien das schlechteste Ergebnis erzielt hat. Letzteres ist dabei auf die bei zwei von drei Messungen zentraler im Gebäude gelegene Position des mit dem Stellantrieb verbundenen Home Pod mini von Apple zurückzuführen. Vor allem die Betrachtung der maximal durchdringbaren Wände zeigt dies, da der Funkstandard Thread hier mit 5 Wänden ein besseres Ergebnis als das ViCare Heizkörperthermostat von Viessmann mit 4 Wänden erzielt. Die in der Rangliste letzten Stellantriebe sind die beiden mit dem EnOcean Funkstandard ausgestatteten Stellantriebe. Dabei liegt der mit der E.H. Methode ausgestattete AVD 30 von AFRISO mit drei Punkten weitervorn vor dem mote420 von Oventrop und ist damit relativ nahe an den drei davorliegenden Stellantrieben. Besonders bei der Langzeittemperaturmessung schneidet der AVD 30 von AFRISO mit insgesamt 11 von maximal 12 Punkten, aus den beiden mit dieser Messung zusammenhängenden Kategorien, am besten ab. Ein weiteres bestes Ergebnis erzielt dieser Stellantrieb unter den 868 MHz Funkstandards bei der gemessenen Freifeldreichweite. Unter all den anderen Aspekten können die beiden EnOcean Stellantriebe wenig überzeugen.

Tabelle 4.4: Gesamtauswertung der Messergebnisse mit der in Kapitel 3.5 beschriebenen Methode

FHKSa	Gemessene Freifeldreichweite	Vollständig abgedeckte Räume (/)	Erreicht Messpunkte (/)	Maximale Gebäude Reichweite (gemessen) [m]	Max. Wände zwischen Messstelle und Zentrale bei der noch eine Verbindung hergestellt werden	Betragsmäßig höchste Messabweichung	Zeitlich gemittelte Messabweichung	Punktesumme
Viessmann ViCare Heizkörperthermostat	190 m	27 / 63	49 / 91	14,9 m	4	2,9 K	1,4 K	25
Punkte	5	3	3	4	3	6	1	
Afriso AVD 30	75 m	24 / 63	41 / 91	13 m	4	4,1 K	-0,2 K	22
Punkte	3	2	1	2	3	5	6	
Oventrop mote420	30 m	23 / 63	43 / 91	14,9 m	4	4,1 K	0,5 K	19
Punkte	1	1	2	4	3	5	3	
eve Thermo	175 m	49 / 63	75 / 91	10,7 m	5	4,6 K	0,7 K	24
Punkte	4	5	5	1	4	3	2	
DevoLo Connect Heating Thermostat	50 m	40 / 63	67 / 91	16,7 m	6	5,2 K	-0,2 K	28
Punkte	2	4	4	6	5	1	6	
AVM Fritz!DECT 301	347,5 m	42 / 44	66 / 68	16,7 m	7	5,1 K	0,4 K	36
Punkte	6	6	6	6	6	2	4	

4.5 Fazit

Die Ergebnisse der Reichweitenmessungen im Gebäude lassen zunächst einige allgemeine Schlüsse zu. Zunächst zeigt sich bei Betrachtung der Messstellenabdeckung der Geräte Thermo von eve und ViCare Heizkörperthermostat von Viessmann, dass eine zentrale Position der Smart Home Zentrale im Gebäude zu einer höheren Messstellenabdeckung führt. So ist der mit dem Thermo verbundene Home Pod mini als Smart Home Zentrale bei den beiden Messungen im Gebäude bis 400 m² deutlich zentraler im Gebäude positioniert als der mit dem ViCare Heizkörperthermostat verbundene WiButler Pro und erzielt dabei eine deutlich höhere Messstellenabdeckung bei einer deutlich geringeren Gebäudereichweite (vergleiche Abbildung 3.10, Abbildung 3.12, Anhang D, Anhang E). Die beiden Geräte sind dabei bewusst gewählt, da sie in den Stellantrieben genutzten Funkstandards Thread und ZigBee, wie in Kapitel 2.3 beschreiben, mit demselben Datenübertragungsprotokoll operieren und somit mit der möglicherweise gleichen Antenne betrieben werden. In Bezug auf die in Kapitel 2.2 und 2.3 vorgestellte allgemeine Durchdringung von Wand- und Deckenmaterialien bestätigt sich in Bezug auf die Messergebnisse aus der Gebäudereichweitenmessung, dass Decken, ob aus Holzbalken oder Stahlbeton, ein deutlich größeres Hindernis für Funkwellen sind als viele Wandarten aus unterschiedlichen Materialien. Ein ähnliches Dämpfungsverhalten, wie die Decken, zeigte nur die Lehmputzwand zwischen Altbau- und Neubauteil des Wohnhauses mit bis zu 400 m² Wohnfläche. Allgemein ist anzumerken, dass anders als in Kapitel 2.2 behauptet eine alleinige Betrachtung der Dämpfungsfaktoren schon einen Hinweis auf die allgemeine Funkabdeckung in einem Gebäude liefern könnte. Eine Erkenntnis, die sich weiter aus den Ergebnissen der Gebäudereichweitenmessung ergibt, ist dass der Winkel einer Geraden, die zwischen einem Messpunkt und einer Smart Home Zentrale gezogen wird, zu einer zu durchdringenden Wand einen großen Einfluss auf die Dämpfung des Funksignals hat. So lässt sich erkennen, dass je spitzer der Winkel ist, desto stärker wird das Signal abgeschwächt. Dies lässt sich auf den längeren Weg durch die Wand zurückführen, den ein Strahl bei einem spitzen Winkel durch eine Wand zurücklegt. Eine Erkenntnis, die sich aus den Langzeittemperaturmessungen ergibt ist, dass die Messabweichungen der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren bei allen Stellantrieben am größten ist, wenn sich die Umgebungsbedingungen sehr schnell verändern. Wobei sich diese Abweichungen von der Referenz auch nicht durch einen Temperaturoffset beheben lassen, da diese Abweichungen stark schwankend sind. Bei sich nur leicht verändernden Umgebungsbedingungen liegen viele Stellantriebe dagegen sehr nahe an der Referenz und können gegebenenfalls durch einen Offset angepasst werden. Allgemein betrachtet sind diese vier beschriebenen Erkenntnisse bei der Entwicklung einer vernetzten EZR gegebenenfalls nicht von primärem Interesse, könnten die Entwicklung jedoch in unterschiedlichen Entwicklungsstufen, wie der Ausarbeitung von Anwendungsfällen, beeinflussen.

Aus den Ergebnissen der Gebäudereichweitenmessungen lässt sich weiter ablesen, dass 868 MHz Funkstandards trotz der sehr viel niedrigeren Freifeldfunkreichweite im Vergleich zu 2,4 GHz Funkstandards eine annähernd gleich hohe Gebäudereichweite haben beziehungsweise im Falle des Funkstandards Z-Wave sogar eine höhere Gebäudefunkreichweite als die Funkstandards ZigBee und Thread aufweisen. Dies ist insofern interessant, da der Funkstandard Z-Wave im Vergleich zu den Funkstandards ZigBee und Thread eine geringere Sendeleistung benötigt (vergleiche Tabelle 3.1). Das bedeutet, dass der Funkstandard Z-Wave bei höherer Gebäude-Funkreichweite einen geringeren

Energieverbrauch besitzt, was zu einer höheren Batterielaufzeit führt und ihn insgesamt sehr attraktiv für Anwendungen in Geräten ohne permanente Netzstromversorgung macht, wie zum Beispiel Heizkörperstellantriebe.

In Bezug auf die Entwicklung einer vernetzten Einzelraumregelung und auf einen passenden Funkstandard lässt sich somit zusammenfassen, dass der Funkstandard DECT zwar eine sehr hohe Gebäudereichweite aufweist jedoch der durch die hohe Sendeleistung resultierende hohe Energieverbrauch und die damit einhergehende geringe Batterielaufzeit von Geräten mit diesem Funkstandard, diesen Funkstandard uninteressant für die Anwendung in einer vernetzten Einzelraumregelung machen. Sehr Interessant wegen des E.H. Ansatzes jedoch auf Grund der geringen Reichweite im Gebäude nicht empfehlenswert ist der Funkstandard EnOcean. Hier könnte für eine Reichweitenerhöhung ein Funk-Repeater eingesetzt werden, der jedoch weitere Kosten birgt und keine weiteren Funktionen, wie eine Funksteckdose der Mesh-fähigen Funkstandards, bringt. Somit wäre der Einsatz eines Funk-Repeaters unattraktiv. Mit einer Erhöhung der Funkreichweite im Gebäude wäre dieser Funkstandard sehr empfehlenswert für die Anwendung in einer vernetzten Einzelraumregelung.

Die für eine vernetzte EZR empfehlenswerten Funkstandards sind zum einen Z-Wave und zum anderen die beiden auf der IEEE Norm IEEE 802.15.4 basierenden Funkstandards ZigBee und Thread. Ausschlaggebend sind vor allem die im Gebäude erreichten hohen Funkreichweiten und Messstellenabdeckungen, welche durch die Mesh-Fähigkeit der Funkstandards noch weiter erhöht wird. In Bezug auf die IEEE Norm IEEE 802.15.4 ist zukünftig vor allem der Funkstandard Thread empfehlenswert, da dieser in dem in Zukunft eingeführten Matter Protokoll eingesetzt wird. In Bezug auf den Einsatz in vernetzten EZR vor Einführung des Matter Protokoll ist der Einsatz von Thread sowie von ZigBee empfehlenswert. Dabei ist möglich den Funkstandard zu wechseln, da die verwendeten Antennen bei beiden Funkstandards dieselben sind. Des Weiteren ist der Funkstandard Z-Wave auf Grund der geringen Sendeleistung bei einer sehr hohen Messstellenabdeckung und der hohen Reichweite im Gebäude sehr empfehlenswert. Wobei dieser sogar dieselbe Gebäudereichweite erzielt, wie der energieintensivere Funkstandard DECT.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die fünf Smart Home Funkstandards ZigBee, Z-Wave, Thread, DECT und EnOcean in sechs Heizkörperstellantrieben auf das Potential für die Anwendung in vernetzten Einzelraumregelungen untersucht. Ziel war es, eine Grundlage zu schaffen, auf der basierend, Entwickler von gesamten Heizungssystemen eine Entscheidung auf wissenschaftlicher Basis für einen der im Markt etablierten Smart Home Funkstandards treffen zu können. Dafür wurden die genannten Funkstandards auf zwei für die Einzelraumregelung und Anwendung im Wohngebäude wichtige Faktoren untersucht. Zum einen die tatsächliche Funkreichweite im Gebäude und zum anderen die Temperaturmessgenauigkeit der in den Stellantrieben integrierten Temperatursensoren, die für die Anwendung in einem möglichst Effizienten System notwendig ist. Als Referenz für die Funkreichweite im Gebäude wurde eine Messung der Reichweite im freien Feld durchgeführt, die einen Trend für den Vergleich zwischen Herstellern oder Literaturangaben und tatsächlichen Werten aufzeigen sollte.

Für das Verständnis der Ergebnisse wurden dabei zunächst die wichtigen Begriffe definiert und die Grundlagen der Funkübertragung erläutert. Anschließend wurde näher auf die einzelnen Funkstandards eingegangen und die Charakteristiken und Hintergründe dieser erläutert. Abschließend wurde der Stand bisheriger Forschungen zusammengefasst, der sich auf die Untersuchung von Funkdämpfungen von bestimmten Gebäudematerialien bei definierten Frequenzen bezieht.

Aus den darauffolgenden Untersuchungen stellte sich der Funkstandard DECT als der Funkstandard mit der höchsten Reichweite heraus, wobei dieser auf Grund des relativ hohen Energieverbrauchs und der verhältnismäßig kleinen Verbreitung im Markt unattraktiv ist. Der Funkstandard EnOcean ist dabei auf Grund geringer Reichweiten nicht zu empfehlen. Anders stellt sich der Funkstandard Z-Wave durch eine hohe Reichweite als empfehlenswert für die Anwendung in einer vernetzten Einzelraumregelung dar. Des Weiteren hat das Gerät eine hohe Temperaturgenauigkeit. Außerdem empfehlen sich die Funkstandards Thread und ZigBee, da diese eine relativ hohe Reichweite aufweisen bei mittelmäßiger Messungengenauigkeit und einer hohen Zukunftsfähigkeit durch das in Zukunft eingeführte Matter Protokoll der Connectivity Standards Alliance, in das der Funkstandard Thread integriert ist.

Da in dieser Arbeit nur ein kleines Spektrum der auf dem Smart Home erhältlichen Produkte und FHKs abgebildet wurde, ist es für verlässliche Aussagen bezüglich der Funkstandards zukünftig wichtig, die in dieser Arbeit geschaffene Datenbasis zu erweitern und zu vervollständigen. Damit könnten nicht nur Entwickler von Smart Home Anwendungen, sondern auch Anwender bei der Auswahl des Funkstandards aus unabhängigen Quellen unterstützt werden. Zukünftig interessant wird dabei vor allem die Entwicklung des Protokolls Matter sein, das zukünftig als das einzige Smart Home Kommunikationsprotokoll existieren soll. Darauf aufbauend wären zukünftig erweiterte Betrachtungen nicht notwendig. Da das Matter Protokoll jedoch noch nicht etabliert ist und Interoperabilität durch unterschiedliche Konzepte erreicht werden kann, sollte diese Datenbasis vorerst durch die Betrachtung weiterer Geräte gegebenenfalls aber auch durch die Betrachtung weiterer Funkstandards erweitert werden. Des Weiteren sollte der in Kapitel 2.2 als nicht effektiv abbeschriebene und in 4.5 als gegebenenfalls hinweisend beschriebene Ansatz der Gebäudereichweitenbestimmung, durch Berechnung über die Freifeldreichweite und die in Kapitel 2.2 gegebene Formel, in einer Extraarbeit untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt, Preise: Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2005 bis September 2021. Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021.
- [2] Brandes, Julian; Haun, Markus; Senkpiel, Charlotte; Kost, Christoph; Bett, Andreas; Henning, Hans-Martin: WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM 2050. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020.
- [3] Dr. Hintemann, Ralph; Hinterholzer Simon: Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourceneinsparungen bei vernetzten Haushaltsprodukten. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, 2018.
- [4] Becker, Simon; Hagen, Jonas; Krüger, Rico: DENA-GEBÄUDEREPORT 2022. Berlin: Deutsche Energie-Agentur, 2021.
- [5] Lauckner, Gunter; Krimmling, Jörn: Raum- und Gebäudeautomation für Architekten und Ingenieure. Dresden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, S. 95-126.
- [6] Möhlenhoff GmbH: Zertifikatsnr. AHBHS AHBHS_125751999. Salzgitter: TÜV Rheinland, 2019.
- [7] Lauckner, Gunter; Krimmling, Jörn: Raum- und Gebäudeautomation für Architekten und Ingenieure. Dresden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, S. 175-226.
- [8] Lauckner, Gunter; Krimmling, Jörn: Raum- und Gebäudeautomation für Architekten und Ingenieure. Dresden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, S. 283-321.
- [9] Lauckner, Gunter; Krimmling, Jörn: Raum- und Gebäudeautomation für Architekten und Ingenieure. Dresden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, S. 95-126.
- [10] Benetti, Silvia: Was ist ZigBee und welche Geräte sind kompatibel?, 2020: Das Haus. <https://www.haus.de/smart-home/zigbee-kompatible-geraete-30172>, aufgerufen am 21.01.2022.
- [11] Thread Group: Thread Benefits, 2022. <https://www.threadgroup.org/What-is-Thread/Thread-Benefits#BuiltforIoT>, aufgerufen am 21.01.2022.
- [12] Langmann, Reinhard: Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0. Düsseldorf: Carl Hanser Verlag München, 2021, S. 159 – 212.
- [13] Kark, Klaus: Antennen und Strahlungsfelder. Weingarten: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, S. 1 – 7.
- [14] Werner, Martin: Nachrichtentechnik. Fulda: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017, S. 545 – 701.
- [15] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen geringer Reichweite (SRD). Bonn: 2020.
- [16] Gabriel, Mariya: amending Decision 2006/771/EC updating harmonised technical conditions in the area of radio spectrum use for short-range devices. Brüssel: Official Journal of the European Union, 2019.
- [17] IEEE: Vision und Mission, 2022. <https://www.ieee.org/about/vision-mission.html>, aufgerufen am 26.01.2022.
- [18] WiButler: Funkstandards, 2022. <https://www2.wibutler.com/funkstandards/>, aufgerufen am 06.01.2022.
- [19] homee: Startseite, 2022. <https://hom.ee/>, aufgerufen am 05.01.2022.

- [20] homematic IP: Startseite, 2022: <https://homematic-ip.com/de>, aufgerufen am 06.01.2022.
- [21] Dr. Lasquety-Reyes, Jeremiah: Smart Home Report 2021: Statista GmbH, 2021.
- [22] Schmid, Gernot; Lager, Daniel; Preiner, Patrick; Überbacher, Richard; Neubauer, Georg; Cecil, Stefan: Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2005.
- [23] ZigBee Alliance Board of Directors: ZigBee Specification. Davis, USA: ZigBee Alliance, Inc., 2015.
- [24] CSA: ZigBee FAQ, 2022: <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>, aufgerufen am 06.01.2022.
- [25] Randewich, Noel: Google's Nest launches network technology for connected home, 2014: Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-google-nest-idUSKBN0FK0JX20140715>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [26] Thread Group: What is Thread?, 2022: <https://www.threadgroup.org/What-is-Thread/Overview>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [27] Trust, Alexander: Thread, was ist das, und wie funktioniert das mit HomeKit?, 2020: MACNOTES.DE. <https://macnotes.de/2020/11/13/thread-was-ist-das-und-wie-funktioniert-das-mit-homekit/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [28] CSA: Matter, 2022: <https://csa-iot.org/all-solutions/matter/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [29] Erl, Josef: Neuer Smart-Home-Standard: Was ist Matter?, 2022: Mixed. https://mixed.de/neuer-smart-home-standard-was-ist-matter/#Kann_ich_Alexa_Siri_oder_den_Google_Assistant_mit_Matter_nutzen, aufgerufen am 25.01.2022.
- [30] Pattison Tuohy, Jennifer: Matter's plan to save the smart home, 2021: The Verge. <https://www.theverge.com/22787729/matter-smart-home-standard-apple-amazon-google>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [31] Z-Wave: Learn about Z-Wave, 2022: <https://www.z-wave.com/learn>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [32] Z-Wave Europe: Z-WAVE TECHNOLOGY, 2021: <https://zwave.eu/z-wave/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [33] Z-Wave Alliance: About Z-Wave Technology, 2022: https://z-wavealliance.org/about_z-wave_technology/, aufgerufen am 25.01.2022.
- [34] homee: Kompatible Produkte, 2021: <https://hom.ee/compatible/?funksystem=806&useCases=&produktTyp=>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [35] dect forum: DECT Technology, 2022: <https://www.dect.org/dect-technology>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [36] Elektronik Kompendium: DECT ULE (Ultra-low Energy), 2022: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/2403111.htm>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [37] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung durch schnurlose Telekommunikationsanlagen des Systems DECT. Bonn: 2020.
- [38] Wissner, Karolin: Gebäudeautomation in Wohngebäuden (Smart Home). Frankfurt am Main: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018, S. 9-43.

- [39] Straub, Lea: Funkstandard EnOcean: Eine zukunftssträchtige Technologie, 2021: Das Haus. <https://www.haus.de/smart-home/funkstandard-enocean-vorteile-nachteile-und-kompatible-gateways-25001>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [40] EnOcean: Radio Technology, 2022: <https://www.enocean.com/en/technology/radio-technology/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [41] EnOcean: Energy Harvesting, 2022. <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting/>, aufgerufen am 06.01.2022.
- [42] Jaturatussanai,Pongsatorn; Chamchoy, Monchai; Promwong, Sathaporn: Characteristics of UWB Propagation Through Building Materials. Ladkrabang, Thailand: Proceedings ofISCIT2005, 2005.
- [43] Hong, Ju Yeon; Kim, Chung-Sup; Kim, Junseok; Lim, Jong-Su; Chong, Young-Jun: An Analysis of Building Material Electrical Properties' Effects on Radio Wave Propagation, Daejeon, Korea: Electronics and Telecommunications Research Institute, 2020.
- [44] Y.E. Mohammed; A.S. Abdallah; Y.A. Liu: Characterization of indoor penetration loss at ISM band. Peking, China: Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2003.
- [45] Valek, Martin; Zvanovec, Stanislav; Pecha, Pavel: Indoor propagation measurement for wireless operating systems in 2.45 GHz ISM band. Prag, Tschechische Republik: Radioengineering Vol. 11, 2002.
- [46] Bobkov, Ivan; Denisova, Maria; Rolish, Alexey; Voskov, Leonid: Study of LoRa Performance at 433 MHz and 868 MHz Bands Inside a Multistory Building. Moskau, Russland: Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), 2020.
- [47] Ah-Rantala, Panu; Ukkonen, Leena; Sydanheimo,Lauri; Keskilammi, Mikko; Kivikoski, Markku: Different kinds of walls and their effect on the attenuation of radiowaves indoors. Rauma, Finnland: Tampere University of Technology, 2003.
- [48] Bedienungsanleitung AVM Fritz!DECT 301: AVM Computersysteme Vertriebs GmbH, 2021.
- [49] Handbuch Fritz!Box 7590: AVM Computersysteme Vertriebs GmbH, 2021.
- [50] Datasheet Afriso AVD 30: AFRISO-EURO-INDEX GmbH, 2021.
- [51] Z-Wave: Devolo Connect Heating Thermostat, 2022: <http://manuals-backend.z-wave.info/make.php?lang=en&sku=DEVE9356&cert=ZC08-15020003>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [52] Bedienungsanleitung Viessmann Heizkörper Thermostat: Viessmann Climate Solutions SE, 2019.
- [53] Funktionsbeschreibung WiButler pro: Connectivity Solutions GmbH, 2021.
- [54] Betriebsanleitung Oventrop mote420: Oventrop GmbH & Co. KG, 2019.
- [55] Eve Thermo Erste Schritte: Eve Systems GmbH, 2021.
- [56] WiButler: WiButler Alliance, 2022. <https://www2.wibutler.com/alliance>, aufgerufen am 05.01.2022.
- [57] WiButler Community: Von Usern getestete Produkte, 2022. <https://community.wibutler.com/category/11/von-usern-getestete-produkte>, aufgerufen am 05.01.2022.

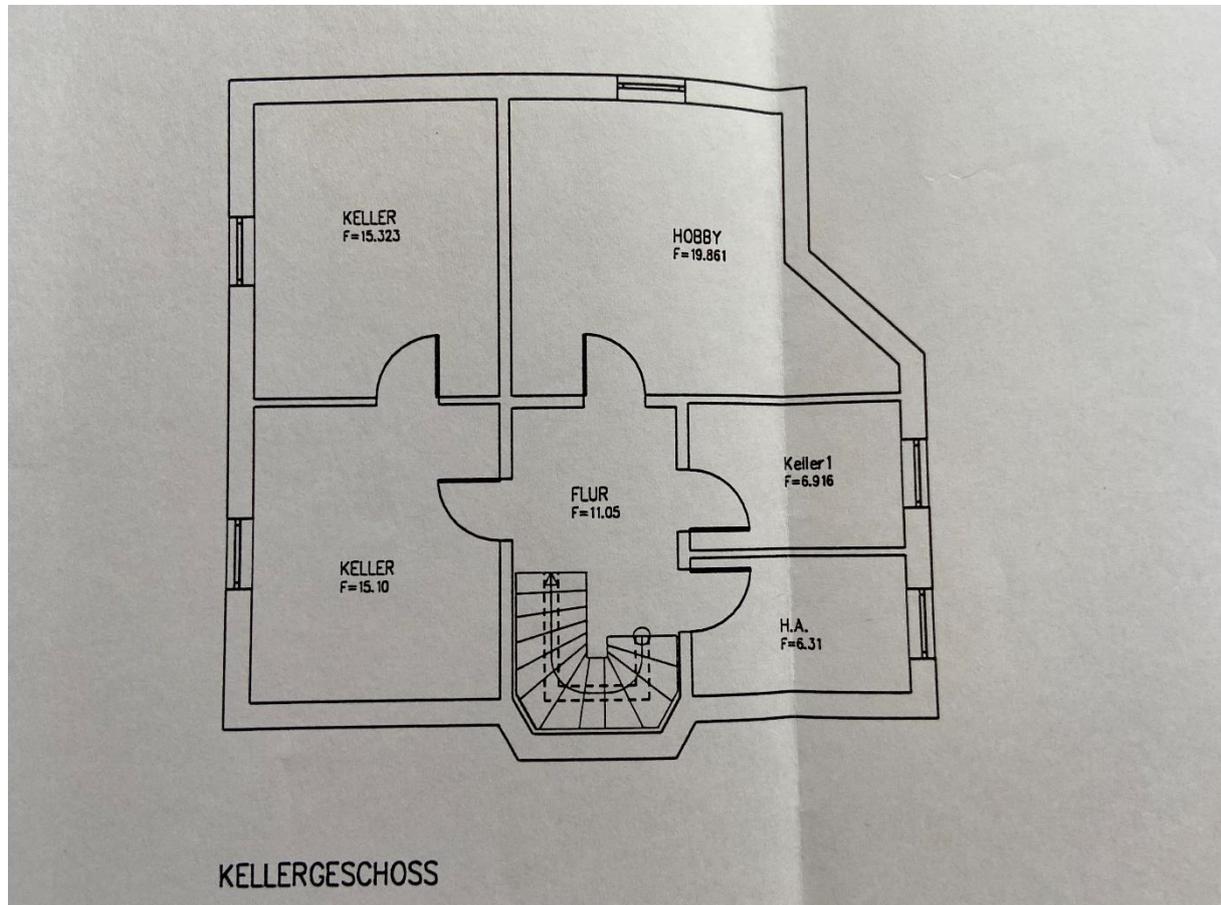
- [58] WiButler Shop: Wibutler Pro Zentrale, 2022: <https://shop.wibutler.com/zentrale/wibutler-pro/1/wibutler-pro-zentrale>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [59] Oventrop: mote 420 Funkstellantrieb (EnOcean), 2022: <https://www.ventrop.com/de-DE/produktssysteme/artikeldetails/1150766>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [60] homee, homee Community, 2022. <https://community.hom.ee/c/geraet-vorschlagen/6>, aufgerufen am 05.01.2022.
- [61] Nolde, Andreas: AVM Fritz!Box 7590 (WLAN-ac-Router) im Test, 2020: Chip. https://www.chip.de/test/AVM-FritzBox7590-WLAN-ac-Router-im-Test_117818392.html, aufgerufen am 25.01.2022.
- [62] Nolde, Andreas: Diese FritzBox heizt Ihnen ein: Fritz!DECT 301 mit E-Ink-Display, 2017: Chip 365. https://www.chip.de/news/Diese-FritzBox-heizt-Ihnen-ein-FritzDECT-301-mit-E-Ink-Display_126669159.html, aufgerufen am 25.01.2022.
- [63] homee: homee Brain Cube, 2021: <https://hom.ee/products/homee-brain-cube/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [64] homee: homee EnOcean Cube, 2021: <https://hom.ee/products/homee-enocean-cube/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [65] homee: homee Z-Wave Cube, 2021: <https://hom.ee/products/homee-z-wave-cube/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [66] Apple: Home Pod mini Technische Spezifikationen, 2022: <https://www.apple.com/de/homepod-mini/specs/>, aufgerufen am 25.01.2022.
- [67] Eve: Eve Thermo, 2022: <https://www.evehome.com/en/eve-thermo>, aufgerufen am 25.01.2022.

Anhang

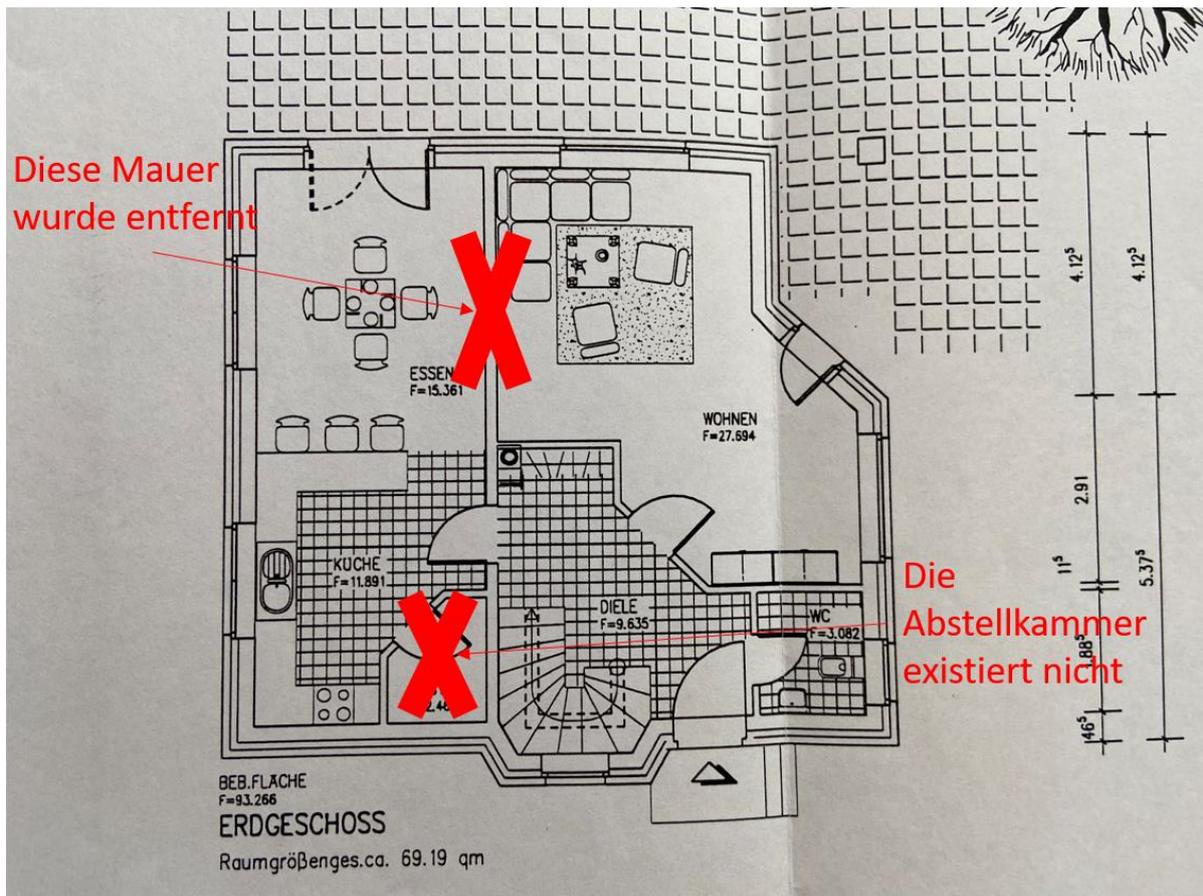
Anhang A

Grundriss des Wohnhauses bis 200 m² Wohnfläche, in 30627 Hannover

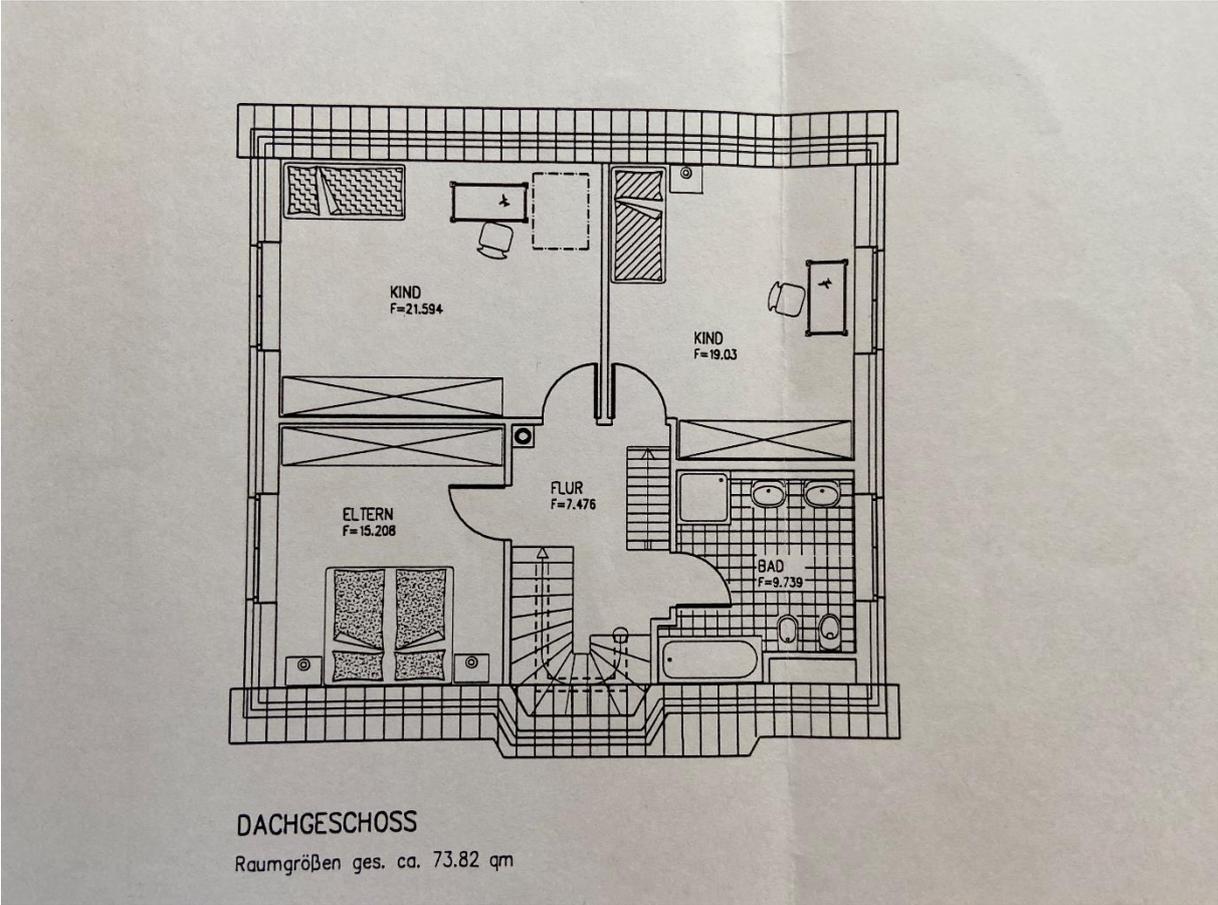
Keller:



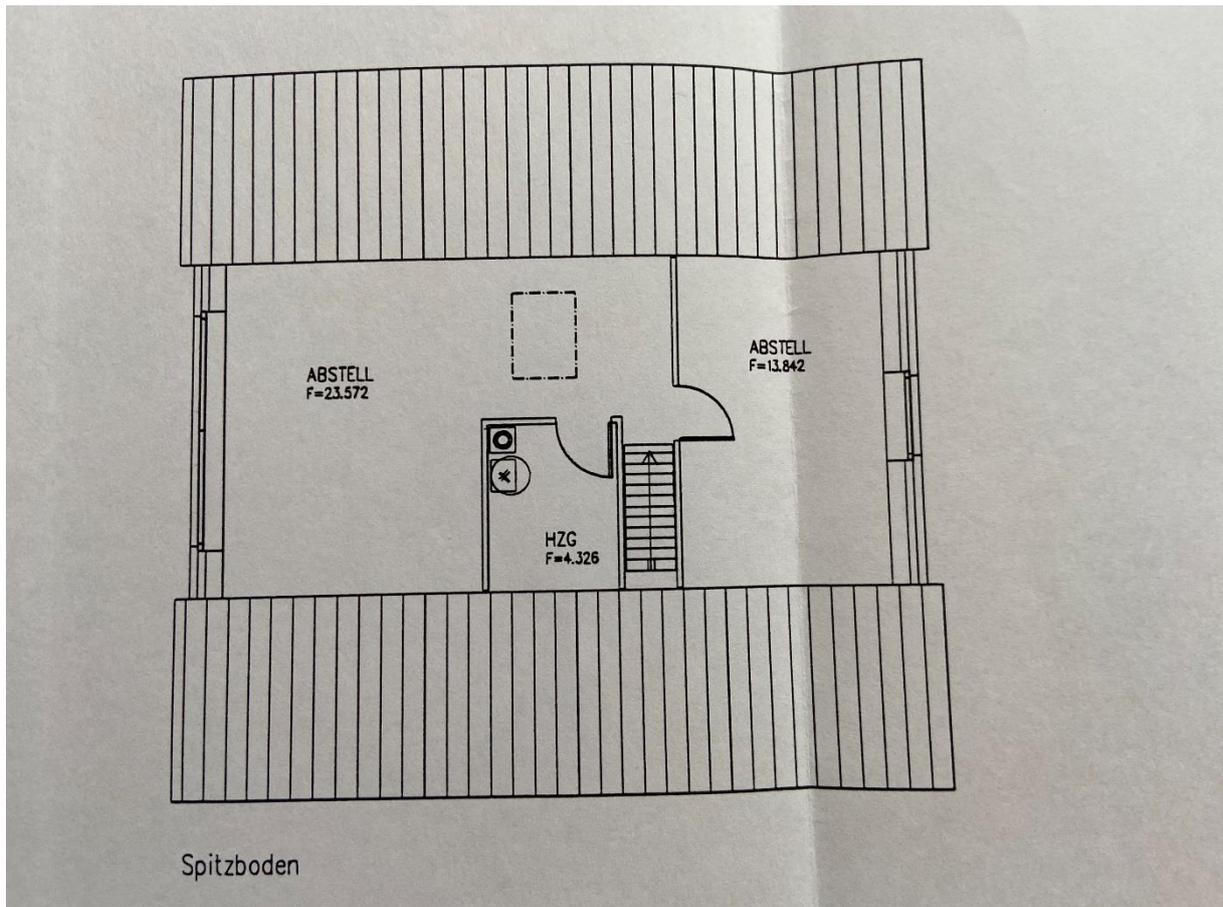
Erdgeschoss:



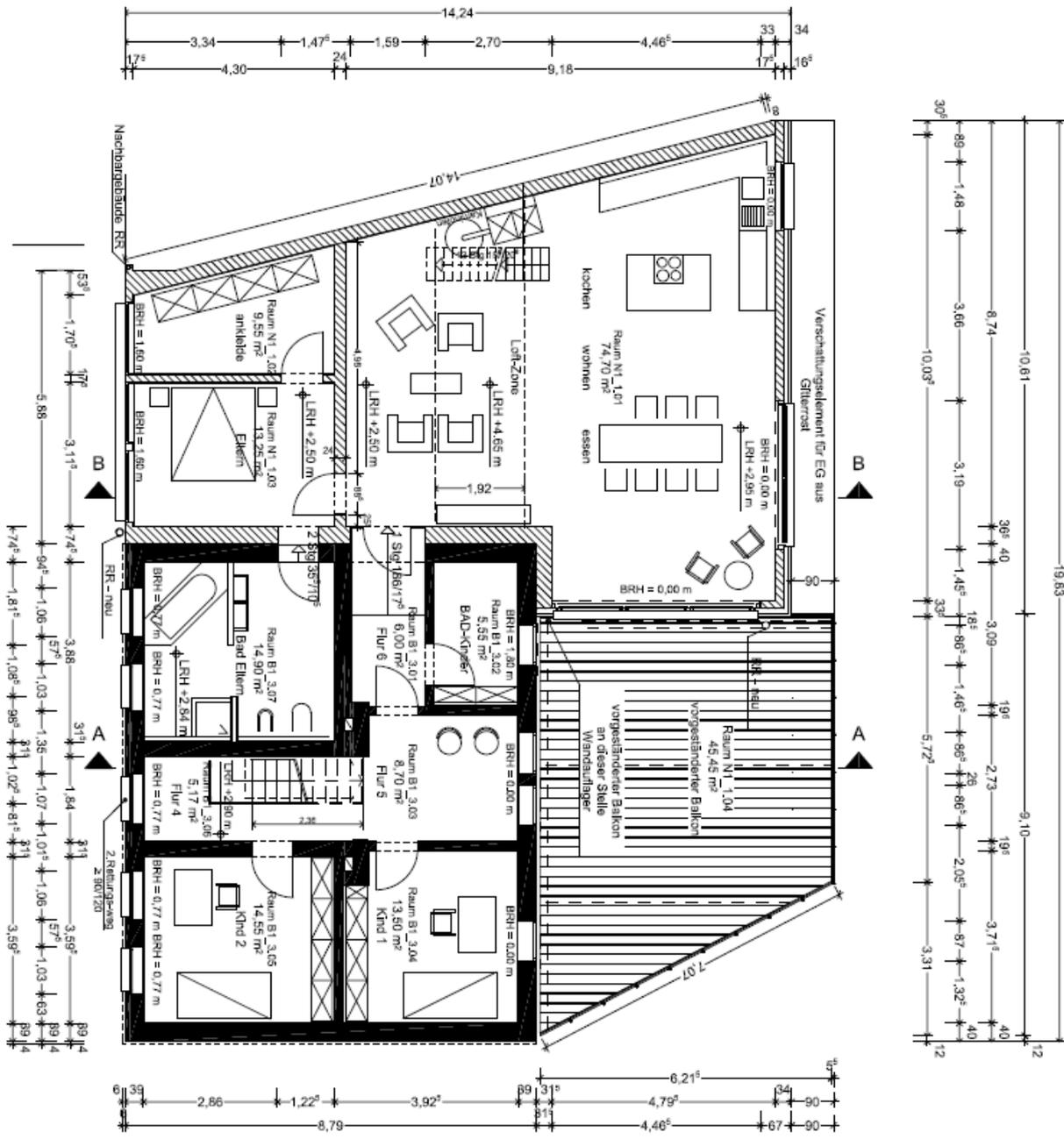
1. OG:



2. OG:



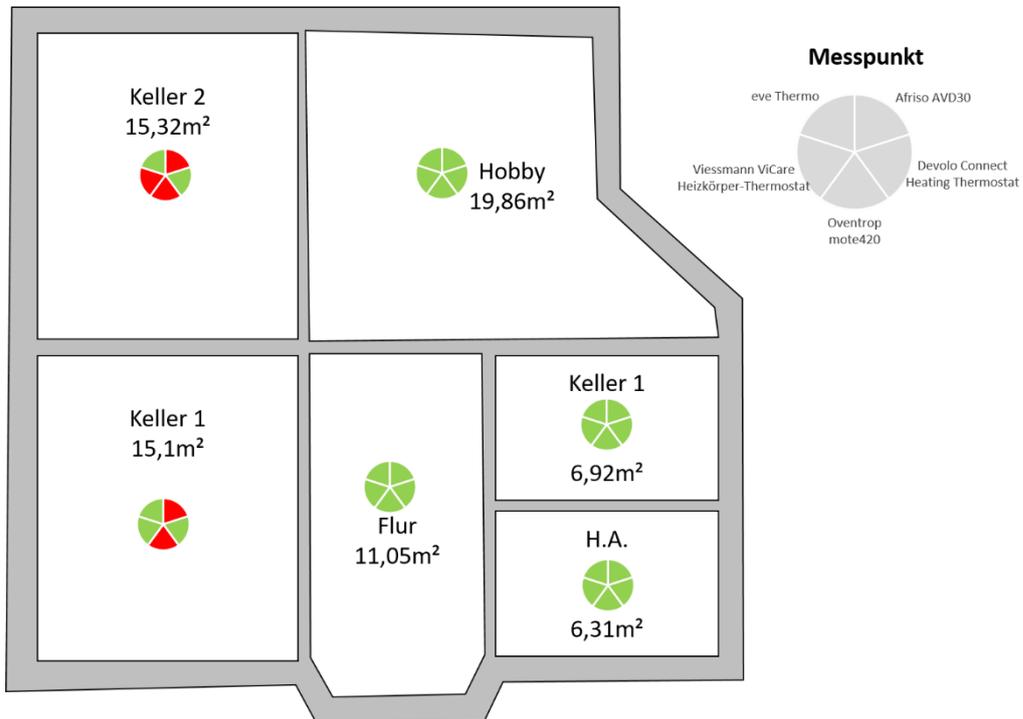
1.OG:



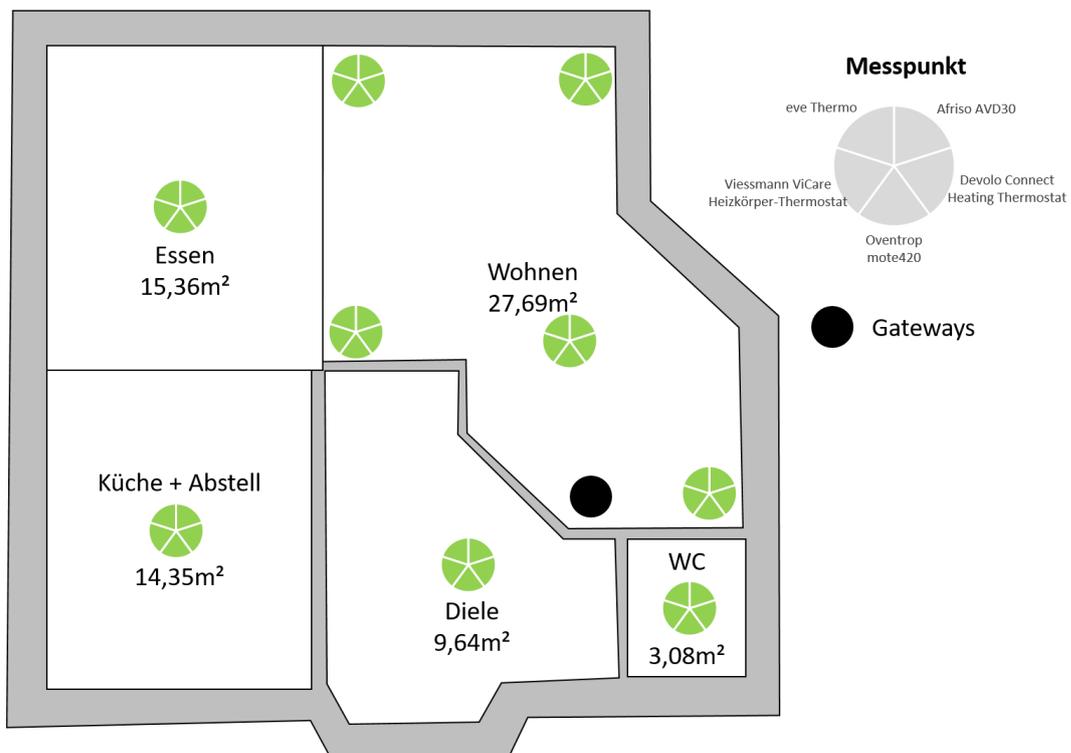
Anhang C

Auswertung der Gebäudereichweitenmessung im Gebäude bis 200 m² Wohnfläche

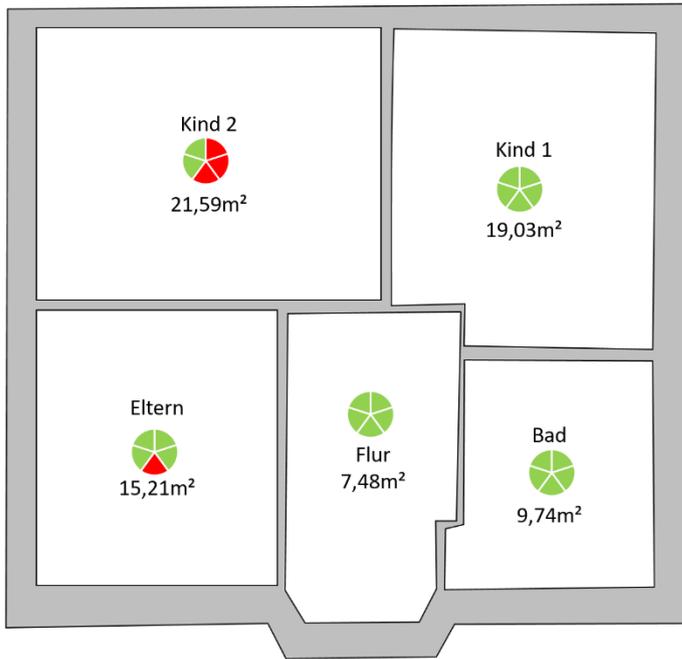
Keller



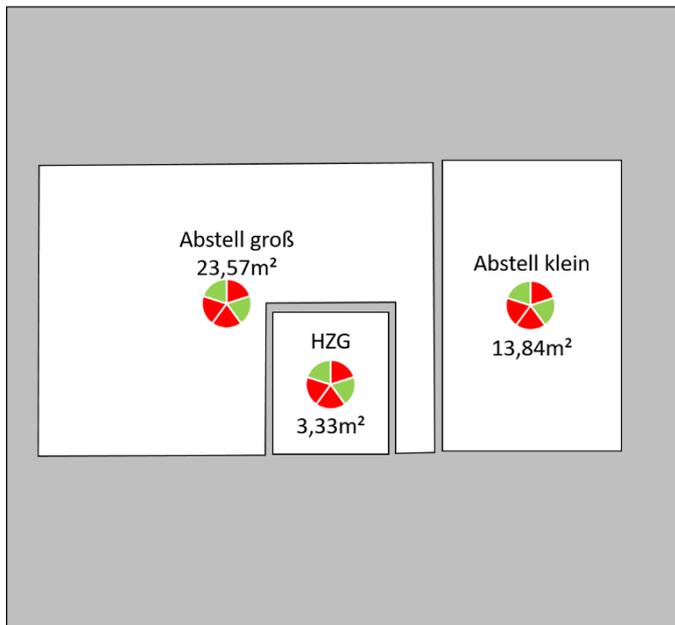
Erdgeschoss



1. OG



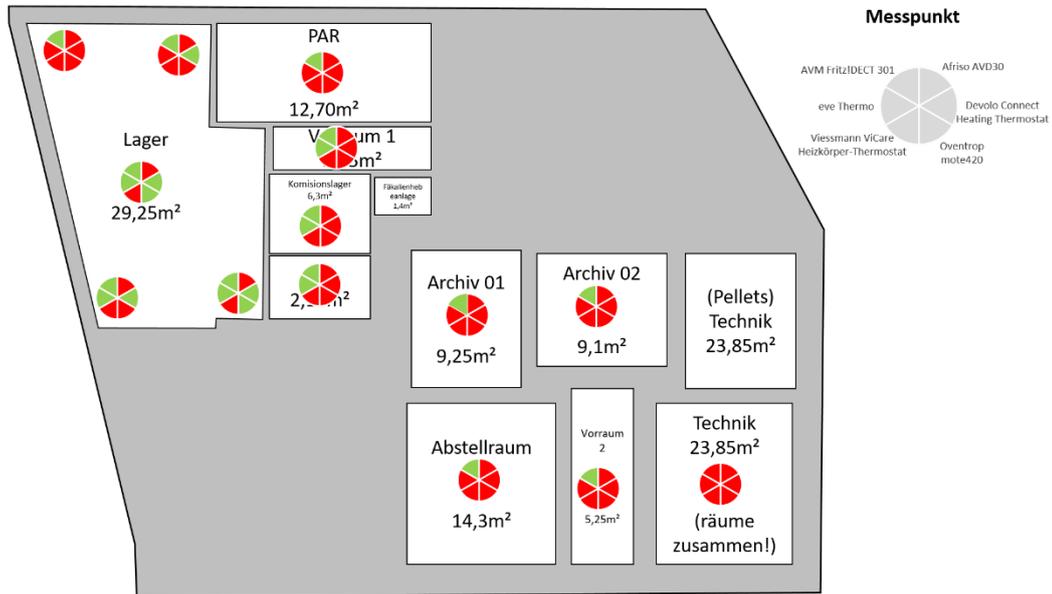
2. OG



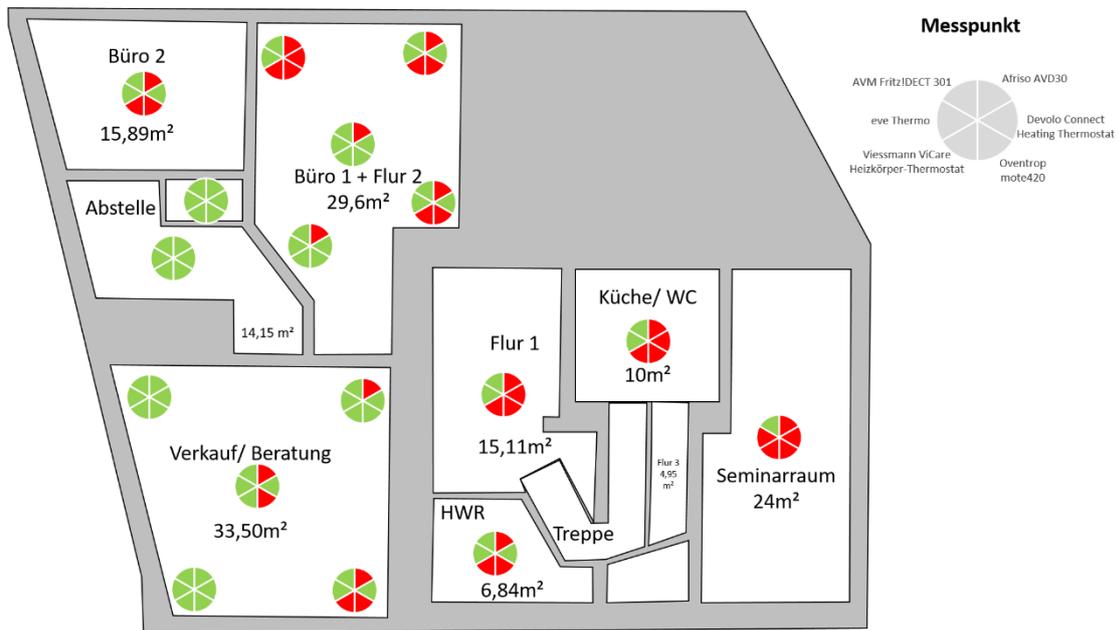
Anhang D

Auswertung der ersten Gebäudereichweitenmessung im Gebäude bis 400 m² Wohnfläche

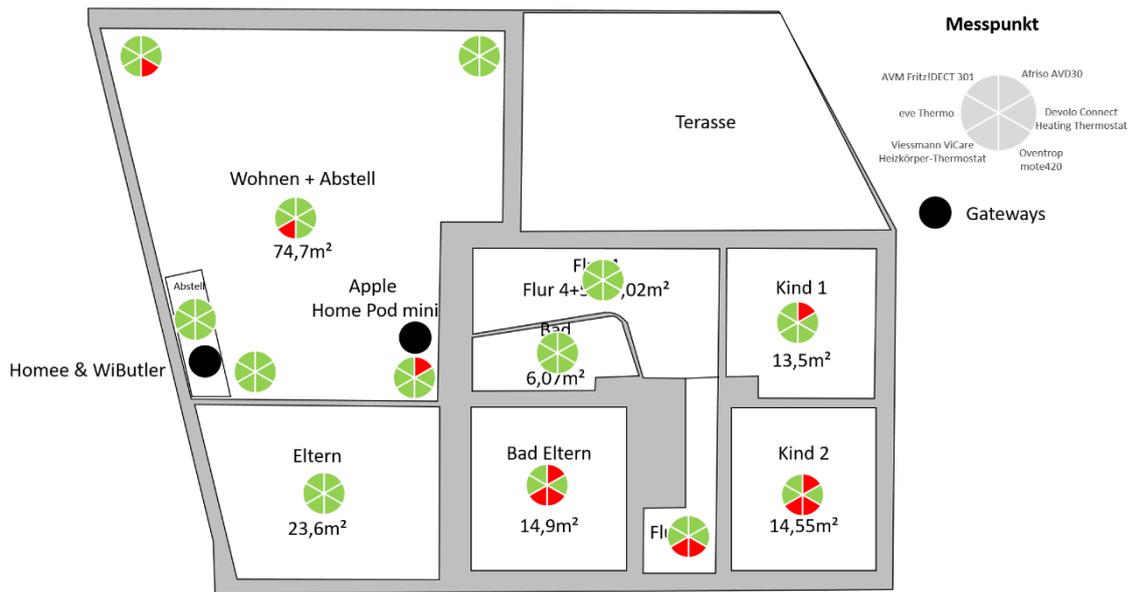
Keller



Erdgeschoss



1. OG



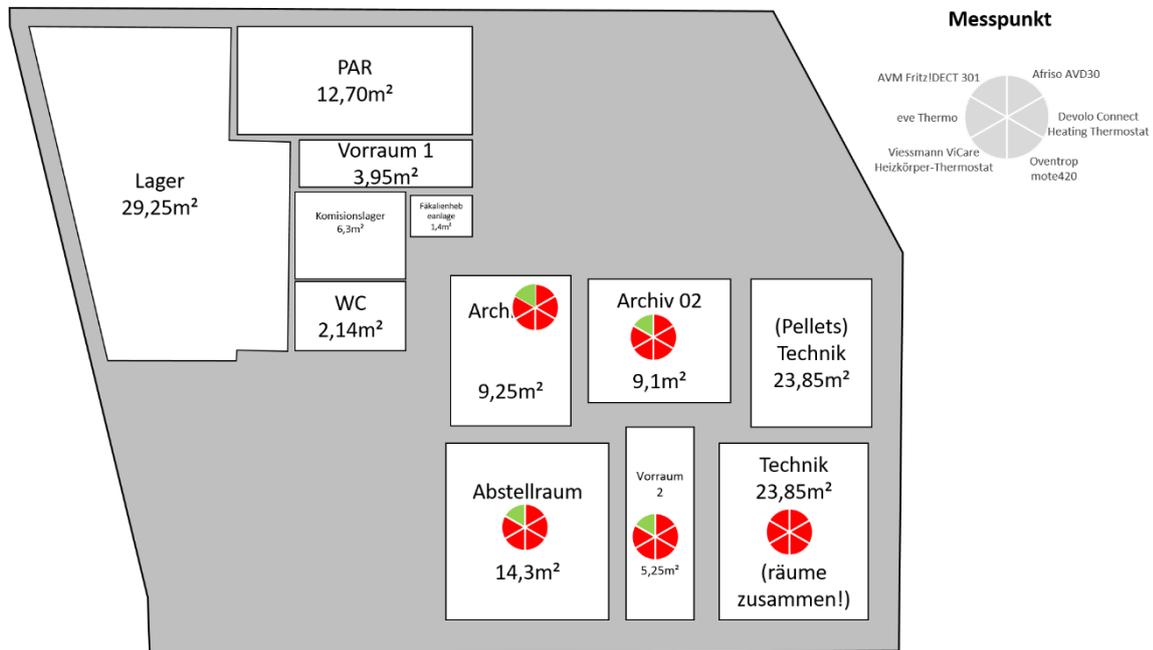
2. OG



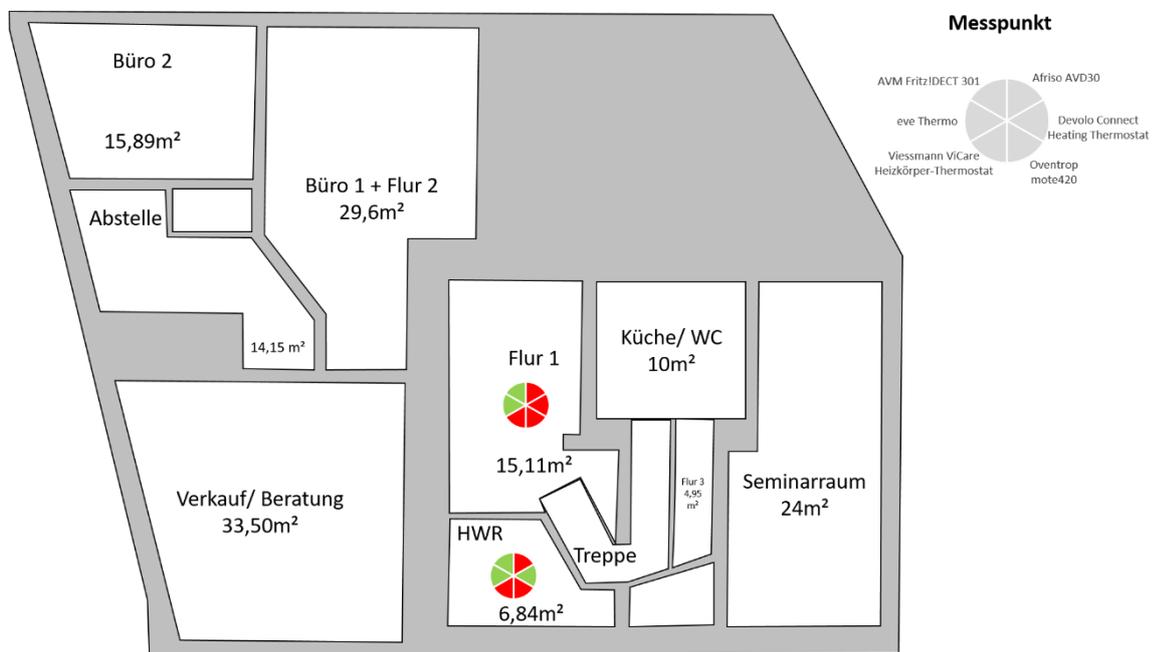
Anhang E

Auswertung der zweiten Gebäudereichweitenmessung im Gebäude bis 400 m² Wohnfläche

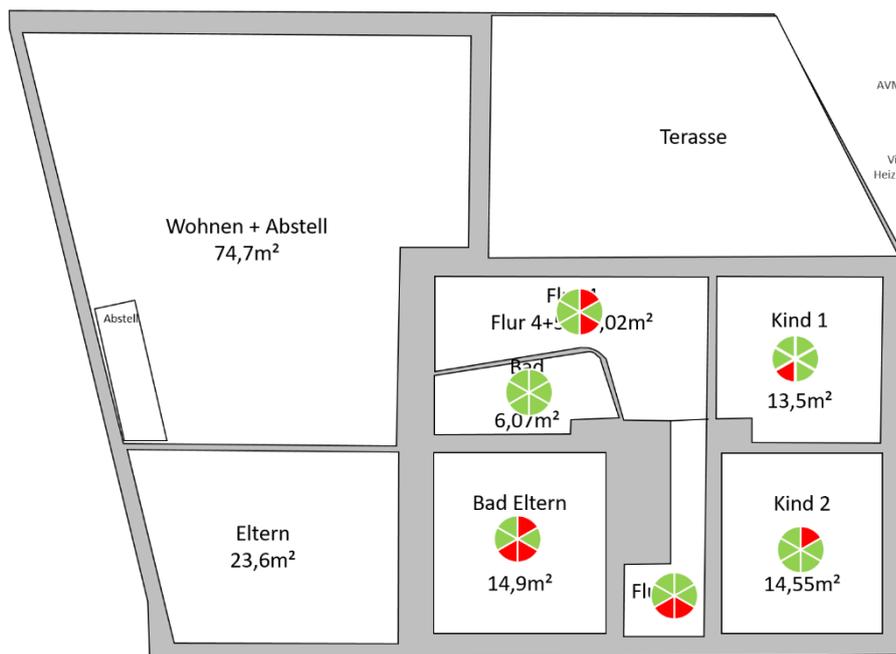
Keller



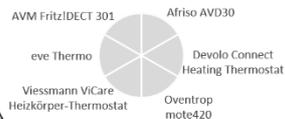
Erdgeschoss



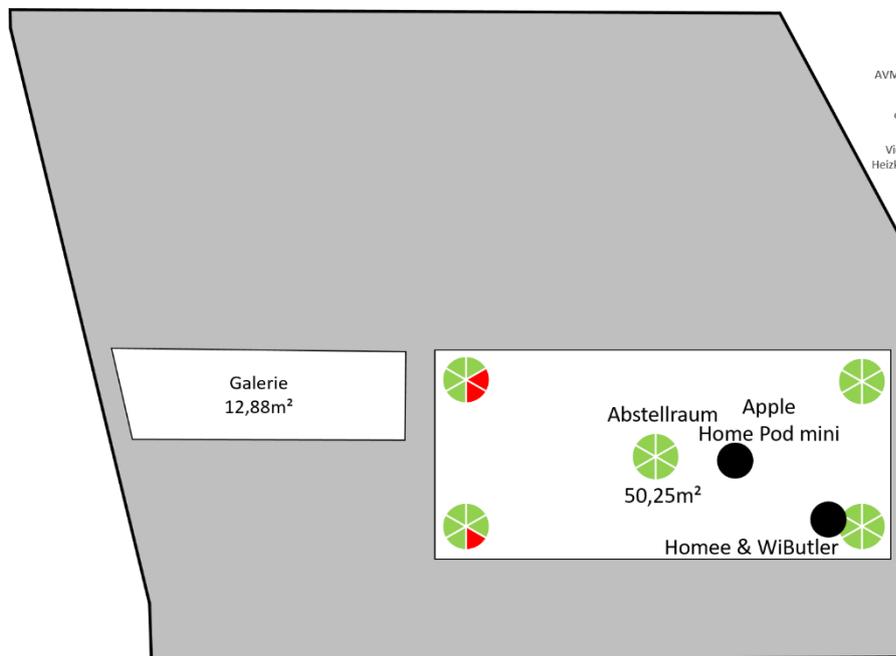
1. OG



Messpunkt



2. OG



Messpunkt



● Gateways