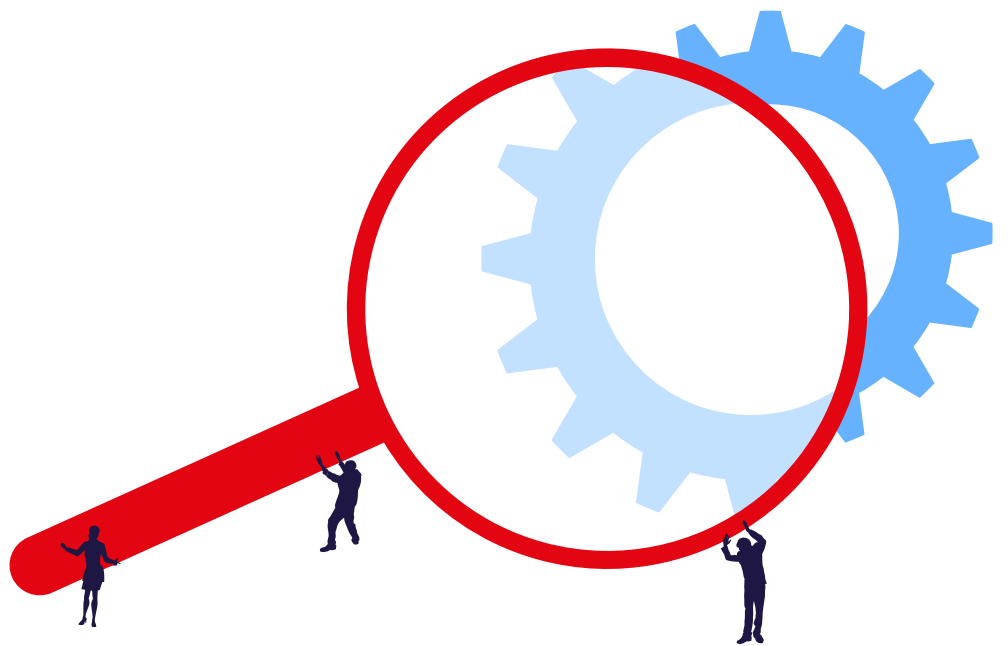


Wireless der Zukunft - Teil 2

Drahtlose Kommunikationssysteme
für öffentliche Verwaltungsgebäude
in der Schweiz

Studie im Auftrag der Arbeitsgruppe
Voice der Digitalen Verwaltung Schweiz



Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser

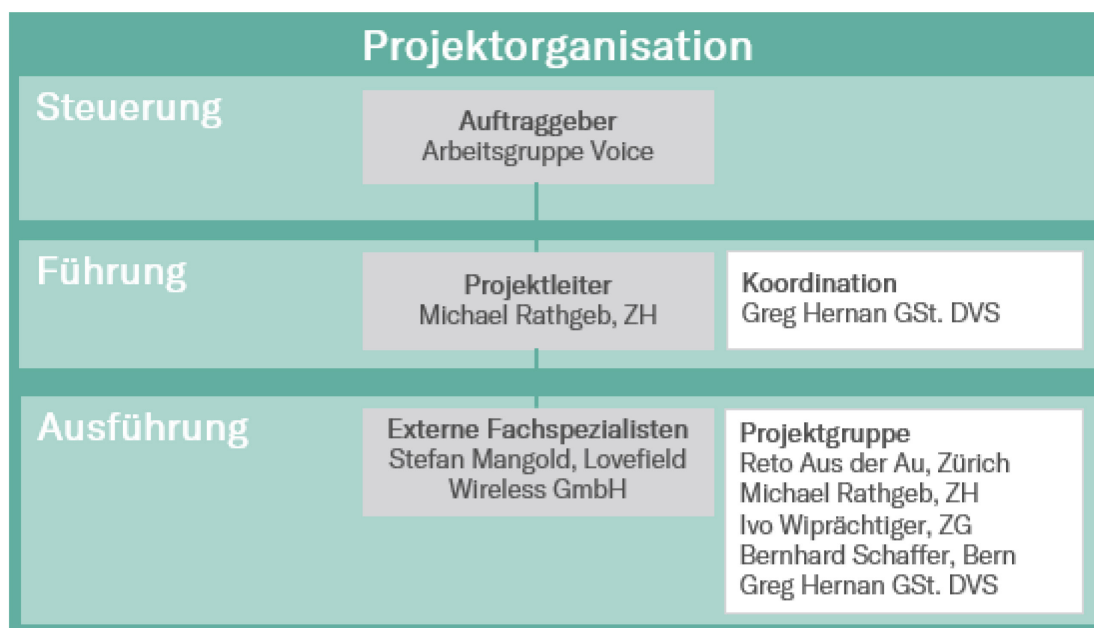
Seit 2021 werden in der Arbeitsgruppe Voice intensive Diskussionen zum Thema "Wireless der Zukunft" geführt. Aus diesen Diskussionen entstand die Vision, eine umfassende Studie zu diesem Thema zu erstellen. Im Jahr 2021 wurde ein externes Unternehmen beauftragt, das im Jahr 2022 einen ersten Entwurf vorlegte.

Nach eingehender Analyse dieses Entwurfs durch die Arbeitsgruppe Stimme wurde beschlossen, das Projekt Anfang 2023 mit einem neuen externen Experten fortzusetzen. Insgesamt fanden 6 Workshops statt, in denen die Arbeitsgruppe Voice gemeinsam mit den Experten intensiv an der Vertiefung und Weiterentwicklung der Studie gearbeitet hat.

Durch diese Zusammenarbeit und den Austausch von Fachwissen konnte ein fundiertes und zukunftsweisendes Dokument erstellt werden, das wichtige Einblicke in die Zukunft der drahtlosen Kommunikation gibt.

Die vorliegende Studie ist das Ergebnis einer engagierten und kooperativen Zusammenarbeit von Experten aus unterschiedlichen Bereichen, die sich gemeinsam dem Ziel verschrieben haben, die Herausforderungen und Chancen der zukünftigen drahtlosen Kommunikation zu erforschen und zu verstehen.

Projektorganigramm



Ergebnis

Die Projektgruppe kam zu dem Schluss, dass die durchgeführte Studie eine solide Grundlage für zukünftige Konzepte und Projekte in diesem Bereich darstellt. Angesichts des Umfangs und der ständigen Neuentwicklungen in diesem Sektor wurde bewusst darauf geachtet, die Beteiligung der Anbieter an der Studie marginal zu halten. Mit dieser Vorgehensweise sollte sichergestellt werden, dass das Dokument möglichst neutral und ohne starken Einfluss der Anbieter erstellt wurde.

Für eine mögliche zukünftige Konzeptphase wird jedoch empfohlen, die Anbieter aktiv einzubinden und entsprechende Ausschreibungen durchzuführen. Dieser Schritt würde es ermöglichen, von den Erfahrungen und Innovationen der Anbieter zu profitieren und sicherzustellen, dass zukünftige Projekte auf einer breiten Basis von Fachwissen und praktischer Erfahrung aufbauen können.

Für weitere Informationen kontaktieren Sie bitte Michael Rathgeb oder Greg Hernan.

Drahtlose Kommunikationssysteme für öffentliche Verwaltungsgebäude in der Schweiz

Vision 2030 - Abschlussbericht

Version: 16. Dezember 2023

Stefan Mangold
Lovefield Wireless GmbH

Inhalt

1	Einführung	5
1.1	Projektauftrag	5
1.2	Gesamtziel	5
1.3	Gliederung.....	6
2	Szenarien, Annahmen, Bewertungskriterien	7
2.1	Referenzmodell	7
2.2	Annahmen.....	8
2.2.1	Datenverkehr.....	8
2.2.2	Gebäudeautomation	9
2.2.3	Rufsysteme.....	10
2.2.4	Gebäude.....	10
2.3	Kriterien	10
3	Technologie	13
3.1	Stand der Technik	13
3.1.1	Wi-Fi 4 (Multiple Input Multiple Output Antennen, Kanalbündelung, 5 GHz).....	13
3.1.2	Wi-Fi 6 / 7 / 8 (Multi-User MIMO, Multi-Link Operation)	13
3.1.3	Wi-Fi HaLow (Internet of Things)	14
3.1.4	3GPP 4G Long Term Evolution.....	14
3.1.5	3GPP 5G New Radio	15
3.1.6	ZigBee / Matter (Internet of Things).....	16
3.1.7	Rufsysteme.....	16
3.1.8	Passive Optische Verteilnetze.....	17
3.2	Entwicklungen und Technologie Trends	17
3.2.1	Höhere Frequenzen, geringere Distanzen und Zellgrössen, Unlizenziertes Spektrum.....	18
3.2.2	Adaptive lernende Verfahren und Künstliche Intelligenz in der Funkschnittstelle.....	18
3.2.3	3GPP RedCap (long-range Internet of Things)	18
3.2.4	3GPP 6G mit intelligenten Oberflächen und Terahertz (THz) Kommunikation.....	19
3.2.5	Nicht-Terrestrische Netze (Satellitenzugänge).....	19
3.2.6	Kommunikation mit Licht (Visible Light Communication, ETH Zürich).....	20
3.2.7	Multiuser Massive MIMO.....	20
3.2.8	Software-Defined Networking.....	21
4	Technologie-Bewertung	23
4.1	Lösungen für Datenverkehr	23
4.2	Lösungen für IoT Automatisierung.....	24
4.3	Lösungen für Rufsysteme	25
4.4	Thesen und Empfehlungen.....	25
4.5	Bemerkungen	27
4.5.1	Flexible Arbeitsformen.....	27
4.5.2	Vielfalt der Gebäude.....	27
4.5.3	Regulierung der Frequenzbänder.....	27
5	Vertiefte Analyse	29
5.1	Wi-Fi IEEE 802.11 (Thesen A, B, E)	29
5.2	3GPP 5G (Thesen A, G)	29
5.3	3GPP 5G RedCap (These D)	29
5.4	Wi-Fi HaLow (These E).....	30
5.5	Passive Optische Netze, PON (These C)	30
5.6	Li-Fi Visible Light Communication.....	30
5.7	Polycom (These F)	31

5.8	Besondere Anforderungen	32
5.8.1	Sicherheitsaspekte, Ausfallsicherheit und Redundanz	32
5.8.2	Energiebedarf und ökologische Nachhaltigkeit	32
6	Zentrales Login	33
6.1	Zugriffskontrolle	33
6.2	Authentifizierung, Autorisierung, Buchführung (AAA)	34
6.3	Wireless Network Security	35
6.3.1	IEEE 802.1X	35
6.3.2	Wi-Fi Protected Access 2 Enterprise	35
6.3.3	5G Subscriber Identity Module (SIM)	35
6.4	Einschätzung	35
7	Fazit: Drahtlose Kommunikations-Infrastruktur 2030	37
7.1	Kernaussagen	37
7.2	Infrastruktur-Variante «STANDARD»	38
7.3	Infrastruktur-Variante «UMFASSEND»	38
8	Handlungsempfehlung	41
8.1	Zusammenfassung	41
8.2	Empfehlungen für ein weiteres Vorgehen	41
8.2.1	Proof of Concepts und Leistungsbewertung durch Messung	41
8.2.2	Dialog mit Lieferanten	41
8.2.3	Kommunikation, Webinar, Demonstration	42
8.2.4	Standardisierung von Lösungen	42
Anhang		43
A	Abkürzungen	43
B	Abbildungsverzeichnis	45
C	Tabellenverzeichnis	45
D	Kostenberechnung - Total Cost of Ownership, TCO	46
E	Umweltbilanz - Life Cycle Assessment, LCA	46
Literatur		49

1 Einführung

Drahtlose Kommunikationstechnologien nehmen bei der Digitalisierung von Diensten eine wichtige Rolle ein. Die Digitale Verwaltung Schweiz (DVS) unterstützt die Umsetzung der digitalen Transformation der öffentlichen Verwaltungen von Bund und Kantonen in der Schweiz. Dabei sind die Aufgaben der DVS zum Beispiel das Festlegen eines gemeinsamen Zielbilds, die Bestimmung der allgemeinen strategischen Ausrichtung oder die Definition von Handlungsfeldern. Erreicht werden sollen unter anderem die Harmonisierung und Interoperabilität von elektronischen Dienstleistungen und die gemeinsame Nutzung von technischen Lösungen durch die verschiedenen Verwaltungsstellen.

Drahtlose Kommunikation ist eine dieser elektronischen Dienstleistungen, die allerdings oft nur mit einer komplexen Infrastruktur realisiert werden kann. Dies ist eine technische Herausforderung, die diese von der DVS in Auftrag gegebene Studie motiviert. Es sollen zukunftsfähige technische Lösungen für Datenverkehr, Gebäudeautomation, und Sicherheitsdienste identifiziert und bewertet werden.

1.1 Projektauftrag

Es soll analysiert werden, ob zukünftig einheitlich auf eine einzige drahtlose Kommunikationstechnologie gesetzt werden kann, oder ob eine Koexistenz von unterschiedlichen zellularen Mobilfunksystemen, lokalen Netzen und Systemen zur Automatisierung (Internet of Things, IoT) zu bevorzugen ist.

Dafür soll eine Übersicht über relevante kommerzielle Funkssysteme und ihre Einsatzmöglichkeiten in der Versorgung von öffentlichen Gebäuden erstellt werden. Der Fokus liegt dabei auf der technischen Beschreibung geeigneter Lösungen, einer Einschätzung der Eignung mit Bezug auf entwickelte Referenz-Szenarien und der Empfehlung von Massnahmen für eine Realisierung.

1.2 Gesamtziel

Das Gesamtziel des Projekts ist ein pragmatischer Entwurf einer «Drahtlosen Kommunikationsinfrastruktur 2030»: Es soll eine möglichst einfache, kostengünstige, ausfallsichere und skalierbare Lösung skizziert werden. Geeignete drahtlose Kommunikationssysteme sollen identifiziert und bezüglich ihrer Komplexität und Risiken bewertet werden. Es sollen unter anderem Standards, Funkspektren und die kommerzielle Verfügbarkeit der Lösungen berücksichtigt werden. Zusätzlich sind Handlungsempfehlungen für zukünftige Auswahlverfahren zu formulieren.

Das Ziel dieser Handlungsempfehlungen wird sein, eine allgemein gültige Infrastruktur für sichere und die Bedürfnisse erfüllende drahtlose Kommunikationssysteme in öffentlichen Gebäuden und Plätzen entwickeln zu können. Dafür werden Aspekte wie Betriebsaufwand, Energiebedarf, Ausfallsicherheit und Redundanz qualitativ berücksichtigt.

Die im Rahmen dieses Projekts gewonnenen Erkenntnisse sollen internen Diskussionen und der Entscheidungsfindung bei Auswahlprozessen dienen.

Erste Erkenntnisse wurden bereits auf der OneVoice 2023 Konferenz vorgestellt [59].

1.3 Gliederung

Kapitel 2 fasst die relevanten Kommunikationsdienste und Bedürfnisse zusammen. Ein Referenz-Szenarium wird eingeführt, und es werden Lastmodelle von Büroszenarien (Daten und Sprache), Gebäudeautomation (IoT) und Rufsystemen erstellt. Zusätzlich sind in Kapitel 2.3 Bewertungskriterien definiert.

Kapitel 3 identifiziert die potenziellen Technologielösungen und Standards, und Kapitel 4 bewertet diese Lösungen qualitativ. Die daraus abgeleiteten Thesen und Handlungsempfehlungen sind in Kapitel 4.4 zu finden.

Die identifizierten Lösungen werden in Kapitel 5 verglichen und bezüglich ihrer Anwendbarkeit in den hier betrachteten Gebäuden der öffentlichen Verwaltung bewertet. So werden zum Beispiel einige Lösungen mangels Verfügbarkeit von Lieferanten oder auf Grund noch unklarer Situation bei den Herstellern nicht für eine Nutzung empfohlen, obwohl es sich um vielversprechende Technologien handelt.

In Kapitel 6 wird ein Standard-Verfahren für eine zentrale Authentifizierung beschrieben. Da es sich um eine bereits vielfach bewährte Lösung handelt, wird ihre Anwendung daher auch hier empfohlen.

Die Erkenntnisse der Kapitel 5 und 6 liefern die Kernaussagen des Projekts: Kapitel 7 fasst diese Kernaussagen schliesslich zusammen und leitet daraus die abschliessenden Empfehlungen und zwei Varianten einer Kommunikations-Infrastruktur ab (Infrastruktur-Varianten «STANDARD» und «UMFASSEND», Kapitel 7.2 und 7.3).

Das Dokument endet in Kapitel 8 mit Bemerkungen zu möglichen Massnahmen zur Realisierung und mit Vorschlägen, wie die hier gewonnenen Erkenntnisse einer breiteren Leserschaft demonstriert werden können.

Abkürzungen sind im Anhang A auf Seite 43 aufgelistet. Literaturhinweise sind auf den Seiten 49 ff. zu finden

2 Szenarien, Annahmen, Bewertungskriterien

Im Folgenden werden die Annahmen über die benötigten Kommunikationsdienste und ihren Dienstgüte-Anforderungen dokumentiert. Ein Referenzmodell (Gebäude, Raum) wird in Kapitel 2.1, und die Lastmodelle werden in Kapitel 2.2 eingeführt. Die Bewertungskriterien, die in der späteren Beurteilung der technischen Lösungen verwendet werden, sind in Kapitel 2.3 aufgelistet.

2.1 Referenzmodell

In Abbildung 9 sind ein fiktives Gebäude und ein fiktiver Büroraum, die der Modellierung dienen sollen, dargestellt. Das Gebäude umfasst drei mit jeweils acht solcher Büroräume ausgestattete Stockwerke. In jedem Raum ist eine Anzahl von Standard-Arbeitsplätzen untergebracht. In den Räumen befinden sich auch zusätzlich jeweils ein Kollaborationsbereich mit Konferenzsystem, das typischerweise für Besprechungen oder Seminare verwendet wird. Tabelle 1 fasst die getroffenen Annahmen zusammen. Das Gebäude ist mittels Glasfaser [04], Richt- oder Mobilfunk über das Internet Protocol (IP) mit dem Weitverkehrsnetz verbunden. Es ist vorstellbar, dass die Infrastruktur zudem der zellularen Mobilfunk-Versorgung in der Umgebung dienen kann. Neben der typischen Logistik (Flure, Treppenhäuser, Réduits) werden keine weiteren Kollaborations- und Gesprächsräume, Fokusräume oder Schulungszimmer modelliert.

Bezüglich der Durchdringung des Gebäudes mit Funk werden im Sinne der Einfachheit folgende Annahmen getroffen: Die Aussenfronten mit ihren Fenstern und Storen und die Innenwände dämpfen alle Funksignale im höheren GHz Bereich (> 1 GHz) so weit, dass Räume nicht durch ihre Nachbarräume oder von aussen versorgt werden können (keine Durchdringung der Wände). Funk-systeme mit Betriebsfrequenzen kleiner als 1 GHz können allerdings eine Wand, aber nicht mehr, durchdringen.

Es wird angenommen, dass das Gebäude mit Hilfe zweier standardisierter Infrastruktur-Empfehlungen versorgt wird: Die Universelle Kommunikationsversorgung (UKV) nach [46] beschreibt die Vernetzung von Arbeitsplätzen (APs), und das standardisierte Building Automation and Control Protokoll (BACNet) beschreibt unter Anderem die nötige Vernetzung für eine Gebäudeautomation [47]. Abweichungen von solchen standardisierten Verfahren sollen weitestgehend vermieden, oder gegebenenfalls begründet werden [23].

Gebäude-Parameter	Wert
Anzahl Stockwerke	3
Grossraumbüros pro Stockwerk	8
Mittlere Raumgrösse [m ²]	200
Nutzbare Raumfläche	80 %
Fläche pro Arbeitsplatz (AP) [m ²]	10
Kollaborationsbereich [m ²]	20
Daraus resultierende Anzahl APs pro Raum	14
Daraus resultierende Anzahl APs insgesamt	Σ 336

Tabelle 1: Annahmen zum Referenzmodell.



Abbildung 1: Referenzgebäude und -raum. Dieses fiktive Gebäude hat drei Stockwerke mit jeweils acht Räumen. In jedem Raum befinden sich eine Anzahl von Standard-Arbeitsplätzen mit Teilnehmeranschlüssen und einem Kollaborationsbereich. Das Gebäude wird mit redundanter Glasfaser, Richtfunk, oder Mobilfunk versorgt.

2.2 Annahmen

Im Folgenden werden die Lastmodelle der Büro-Szenarien (Datenverkehr, Kapitel 2.2.1), für die angenommene Gebäudeautomation (IoT, Kapitel 2.2.2) und für sicherheitsrelevanten Rufsysteme (Kapitel 2.2.3) eingeführt. Die Dienstgüte-Anforderungen sind dabei von bekannten Szenarien abgeleitet, die von Standardisierungs-Gremien und Herstellern veröffentlicht wurden (Cisco Systems Inc.: [14], [15]; Microsoft Corporation: [53]; ITU-R: [43]; Ericsson AB: [26], [28]; Europäische Kommission: [29]; Huawei Technologies Co., Ltd: [33]).

2.2.1 Datenverkehr

An einem Arbeitsplatz in der öffentlichen Verwaltung werden typischerweise (1) Cloud-Dokumente gestreamt und bearbeitet, (2) verschlüsselte und ausfallfreie Verbindungen ins Weitverkehrsnetz benötigt, und (3) Multicast- oder Unicast-Videokonferenzen durchgeführt. Kommunikationsdienste basierend auf dem Integrierten Sprach- und Datennetz (ISDN) und der klassischen Festnetz-Sprache (Public Switched Telephone Network, PSTN) sind nicht Teil des Anforderungsprofils und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Es wird angenommen, dass Dienste in ortsfesten Szenarien genutzt werden, die Nutzer also während der Kommunikation die Gebäude nicht wechseln und sich auch nicht ausserhalb von Gebäuden aufhalten¹. Tabelle 2 fasst die Annahmen zusammen.

Dienst	Durchsatz Mittel / Spitze [Mb/s]	
Videokonferenz pro User (pro AP)	2.0	10.0
Cloud, Dokumente, Kollaboration pro User (pro AP)	100.0	1'000.0
Voice & Administration pro User (pro AP)	2.0	100.0
Total pro User (pro AP)	Σ 112.0	Σ 1'110.0
Kollaboration (1x pro Raum)	100.0	1'000.0
Gesamtlast pro Raum (50% der Summe, 14 APs pro Raum)	<1'000.0	<10'000.0

Tabelle 2: Daten-Dienste und ihre Dienstgüte-Anforderungen pro User / Arbeitsplatz (AP) und Raum. Es wird nicht zwischen Up- und Downlink unterschieden. Es wird angenommen, dass Dienste in ortsfesten Szenarien genutzt werden.

2.2.2 Gebäudeautomation

Eine moderne Gebäudeautomation benötigt eine Reihe von IoT Sensoren und Aktuatoren, zum Beispiel für die Steuerung von Heiz- und Klimasystemen, Temperatur- und Gas-Sensoren für die Messung der Luftqualität, oder für eine adaptive Beleuchtung und elektronische Beschilderung.

IoT Geräte werden häufig mit langen Betriebszyklen (Duty Cycle) betrieben (zum Beispiel ein periodisches Messen im Minutentakt). Relevant für die Bewertung ist daher eher der Bedarf nach hoher Verfügbarkeit und weniger der mittlere Datendurchsatz.

Das Erkennen von Objekten und Präsenz von Personen für die Sicherheitsüberwachung (Brandchutz), Sensoren für Notfälle in der Pflege (Hospitäler, Seniorenheime), und damit unter Anderem auch eine nicht-invasive Überwachung innerhalb von Verwaltungsgebäuden (Lebenszeichen wie Temperatur, Herzschlag, Atmung) sind weitere IoT Anwendungen, die in den Lastmodellen speziell bezüglich Zuverlässigkeit und Abdeckung berücksichtigt werden.

Tabelle 3 illustriert die Bedürfnisse.

Dienst	Mittlerer Durchsatz [Mb/s]	Bemerkung
Umweltsensoren (Temperatur, Gas) pro Raum	0.1	periodisches Messen
Automation (Storen, Klima, Licht) pro Raum	0.1	
Brandschutz pro Raum	0.1	hohe Verfügbarkeit
Überwachung pro Raum	0.5	hohe Verfügbarkeit
Beschilderung pro Raum	1.0	
Gesamtlast pro Raum	< 2.0	hohe Verfügbarkeit

Tabelle 3: IoT Dienste und Dienstgüte-Anforderungen von Sensoren und Aktuatoren in einem Raum. IoT Geräte werden häufig mit langem Betriebszyklus (Duty Cycle) betrieben (periodisches Messen im Minutentakt). Relevant ist daher eher das Bedürfnis nach hoher Verfügbarkeit und weniger der Durchsatz.

¹ Eine Verwendung von Diensten mit unterbrechungsfreier Kommunikation ausserhalb von Verwaltungsgebäuden kann mit Mobilfunknetzen (5G) unterstützt werden, sofern verwendete Geräte solche Netze unterstützen. Campus-Netze mit einer hohen Dichte von Nutzern zum Beispiel an Universitäten oder Bahnhöfen werden üblicherweise mit Outdoor Wi-Fi versorgt.

2.2.3 Rufsysteme

Rufsysteme werden häufig in Hospitälern und Pflegeheimen betrieben, um Personal im Notfall schnell erreichen zu können. Eine Kommunikation findet nur innerhalb des Gebäudes statt, so dass eine Verbindung zum Weitverkehrsnetz nicht benötigt wird. Wichtig sind bei dieser Art von Systemen die Ausfallsicherheit und eine lückenlose Funkabdeckung innerhalb des Gebäudes. Tabelle 4 fasst die Anforderungen zusammen.

Dienst	Durchsatz [Mb/s]	Bemerkung
Mitarbeiter-Rufsystem, persönliche Alarmer	10.0	hohe Verfügbarkeit und Abdeckung

Tabelle 4: Rufsystem-Dienste und ihre Dienstgüte-Anforderungen in einem Raum. Rufsysteme sind vor allem in Hospitälern und Pflegeheimen in Betrieb. Die Kommunikation findet nur innerhalb des Gebäudes statt, eine Verbindung an das Weitverkehrsnetz ist nicht nötig. Wichtig sind die Verfügbarkeit und vollständige Funkabdeckung im gesamten Gebäude.

2.2.4 Gebäude

Es kann zusammenfassend angenommen werden, dass bei der aus den Annahmen resultierenden, mittleren Last von etwa 1 Gb/s pro Raum und einem Bündelungsgewinn das Referenzgebäude mit 25 Gb/s versorgt werden kann. Mit Bündelungsgewinn ist hier gemeint, dass nicht alle Arbeitsplätze gleichzeitig mit Maximallast betrieben werden.

2.3 Kriterien

Die Bewertungskriterien werden in späteren Abschnitten verwendet, um die Eignung der verschiedenen Lösungen einzuschätzen. Im Sinne der Effizienz werden die Themen IT-Sicherheit, die medizinische Verträglichkeit von Funksystemen, und die gesellschaftliche Akzeptanz von Lösungen nicht betrachtet.

Es wird angenommen, dass standardisierte Lösungen implizit den Stand der Technik im Bereich der IT-Sicherheit erfüllen.

- 1. Eignung und Zukunftsträchtigkeit:** (Priorität HOCH) Ist die Lösung grundsätzlich geeignet, zukünftige Bedürfnisse zu adressieren? Dies betrifft Dienstgüteparameter wie zum Beispiel der in den Tabellen angegebene Datendurchsatz pro User und Raum, aber auch Reaktions- und Verzögerungszeiten, die Ausfallhäufigkeit und Zuverlässigkeit, und den Funkfeld-Abdeckungsbereich innerhalb des Gebäudes.
- 2. Kosten:** (Priorität HOCH) Wie hoch sind Investitions- und Betriebskosten der Lösung, speziell unter Berücksichtigung der Lebensdauer von Technologien? Anhang A, Seite 46, beschreibt Grundsätze einer Kostenberechnung zur Bestimmung der «Total Cost of Ownership (TOC)».
- 3. Standardisierung:** (Priorität HOCH) Ist die Technologie frei zugänglich und standardisiert? Sofern eine etabliertes Industriekonsortium wie die Wi-Fi Alliance oder die 3GPP eine Lösung anbietet, wäre dies ein Vorteil. Proprietäre Ansätze sind zu vermeiden.
- 4. CO2 Emission:** (Priorität MITTEL) Ist die Lösung ökologisch nachhaltig? Ein Life Cycle Assessment (LCA) wird in dieser Arbeit zwar nicht durchgeführt, jedoch sollte in Zukunft bei Auswahlverfahren die Umweltbilanz eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Anhang B, Seite 46, beschreibt die LCA Prinzipien für Infrastrukturanwendungen.

5. **Frequenzregulierung:** (Priorität MITTEL) Ist die Konformität zur Frequenzvergabe der nationalen Regulierung gesichert? Kann davon ausgegangen werden, dass ausreichend Systemkapazität zur Verfügung steht? Dies betrifft die Vergabe von Frequenzbändern und ihre Bandbreiten, vorgeschriebene Sendeleistungen und Antennenkonfigurationen, und vorgeschriebene maximale Arbeitszyklen (Duty Cycle).
6. **Verwendung ausserhalb der öffentlichen Verwaltung:** (Priorität NORMAL): Wird diese Technologie auch ausserhalb der Gebäude verwendet?
7. **Lieferantenwahl:** (Priorität NIEDRIG) Wurde die Lösung bereits erfolgreich innerhalb oder ausserhalb der Schweiz angewendet? Ist die Technologie etabliert und wird sie von verschiedenen unabhängigen Lieferanten und Herstellern angeboten?
8. **Ausfallsicherheit:** (Priorität NIEDRIG) Unterstützt die Technologie Ausfallsicherheit und Redundanz? Ist ein Betrieb der Lösung auch bei eingeschränkter Energieversorgung möglich?
9. **Monetarisierbarkeit:** (Priorität NIEDRIG) Bietet die Technologie Potenzial zur Wiederverwendung oder Kommerzialisierung durch Lieferanten? So ist zum Beispiel der Einsatz von zellulärer Technologie nicht nur für die Dienste der Verwaltung, sondern auch für weitere kommerzielle Dienste innerhalb und ausserhalb der Gebäude interessant.

Kriterium	Priorität (HOCH / MITTEL / NIEDRIG)	Einschätzung
Eignung und Zukunftsfähigkeit	1 - HOCH	0...10
Kosten	1 - HOCH	0...10
Standardisierung	1 - HOCH	0...10
CO2 Emission	2 - MITTEL	0...10
Frequenzregulierung	2 - MITTEL	0...10
Verwendung ausserhalb	2 - MITTEL	0...10
Lieferantenwahl	3 - NIEDRIG	0...10
Ausfallsicherheit	3 - NIEDRIG	0...10
Monetarisierbarkeit	3 - NIEDRIG	0...10

Tabelle 5: Bewertungskriterien und ihre Prioritäten. Für einen Vergleich wird im Folgenden ein Zahlenwert zur Einschätzung und Visualisierung verwendet (siehe Abbildung 6 - Abbildung 8). Dabei bedeutet 10 ≈ Die Lösung hat das Potenzial, das Kriterium zu erfüllen, und 0 ≈ Kriterium wird unter den gegebenen Voraussetzungen nicht erfüllt.

3 Technologie

3.1 Stand der Technik

3.1.1 Wi-Fi 4 (Multiple Input Multiple Output Antennen, Kanalbündelung, 5 GHz)

Oft auch als Wireless Local Area Network (WLAN) bezeichnet, ist Wi-Fi eines der bekanntesten und am meisten genutzten drahtlosen Kommunikationssysteme [09], [10], [11]. Der Begriff «Wi-Fi» ist zugleich eine Schutzmarke und ein Interoperabilitäts-Zertifikat und wird von der Wi-Fi Alliance verwaltet.

Wi-Fi Systeme werden im unlizenziierten Frequenzband betrieben und hauptsächlich für die Vernetzung von Laptops, Spielkonsolen, Fernsehern, oder Smartphones mit dem Internet verwendet. Ähnlich wie Ethernet und das Internet Protokoll (IP) wurde Wi-Fi zuerst für die Datenkommunikation und ohne Dienstgüte-Garantie entwickelt: Sprachkommunikation oder Notrufe waren je nach Situation nicht möglich. Die Version Wi-Fi 4 basiert auf dem in 2009 ratifizierten Standard IEEE 802.11n [37], [72], ist weit verbreitet und gilt als besonders kostengünstig. Es war seinerzeit der erste kommerzielle Standard, der Multiple Input Multiple Output (MIMO) Antennen spezialisierte. Die Bündelung von zwei 20 MHz Funkkanälen zu 40 MHz und die Nutzung des 5 GHz Bands ermöglichten relativ grosse Datenraten von mehreren 100 Mb/s. Abbildung 2 illustriert die Versorgung des Modellraums mit mehreren Wi-Fi 4 Access Points, die jeweils einen Teil des Raums versorgen und somit parallel betrieben werden können.

Das als Wi-Fi 5 bezeichnete System ist eine inkrementelle Weiterentwicklung aus dem Jahr 2013 (Standard IEEE 802.11ac) und erreicht theoretisch bis zu 1 Gb/s Durchsatz bei einer Bündelung von vier Funkkanälen im 5 GHz Band.



Abbildung 2: Wi-Fi 4 Versorgung mit mehreren Access Points im Raum. Wi-Fi 4 unterstützt MIMO mit mehreren Antennen, kann also Signale in bestimmte Richtungen fokussieren (Konzeptdarstellung).

3.1.2 Wi-Fi 6 / 7 / 8 (Multi-User MIMO, Multi-Link Operation)

Die Konzeptdarstellung in Abbildung 3 illustriert einige der bereits bekannten Konzepte, die in den neuen Wi-Fi Systemen (Wi-Fi 6 / 7 / 8) zertifiziert werden ([22], [31], [32], [72]). Basierend auf den Standards IEEE 802.11ax, IEEE 802.11be und darauffolgend, werden neue Frequenzbänder er-

schlossen und die Antennen-, Modulations- Kodierungsverfahren, und schliesslich auch die Medienzugriffsprotokolle so erweitert, dass (1) deutlich höhere Datenraten von mehreren Gbit/s und neu auch sehr geringe Latenzzeiten (wenige Millisekunden) erreicht werden können.

Die Multi-User MIMO Konzepte, die in der Abbildung dargestellt sind (zwei Access Points versorgen den gleichen Bereich), werden in Downlink (Signale von den koordinierten und synchronisierten Access Points zu Endgeräten) und Uplink (Signale von Endgeräten zu Access Points) eingesetzt. Nicht alles was die Wi-Fi Alliance vermarktet, ist sofort ein kommerzieller Erfolg. Es bleibt abzuwarten, ob die neuen Konzepte auf das Interesse der Konsumenten treffen. So ist zum Beispiel das im 60 GHz Frequenzband arbeitende WiGig (IEEE 802.11ad, IEEE 802.11ay) ein Kandidat für eine jahrelange vielversprechende Entwicklung, für die letztlich bis heute keine nennenswerte Anwendung gefunden wurde.

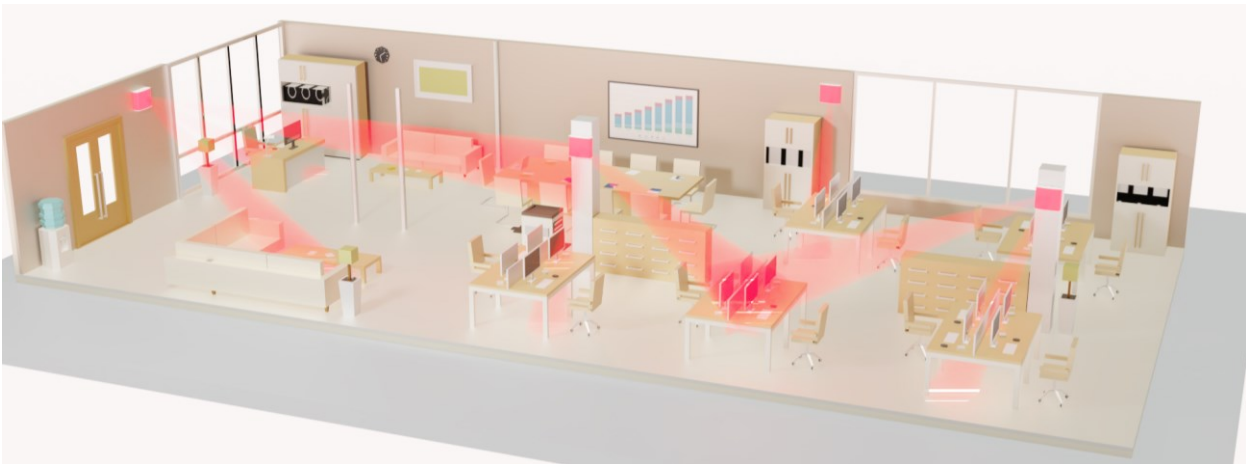


Abbildung 3: Wi-Fi 6 / 7 / 8 (Konzeptdarstellung). Im vorderen Raumbereich ist dargestellt, wie zwei Access Points das gleiche Endgerät mittels Multi-User MIMO versorgen.

3.1.3 Wi-Fi HaLow (Internet of Things)

Wi-Fi HaLow basiert auf dem Standard IEEE 802.11ah und ist die Antwort der Wi-Fi Alliance auf den weltweiten Digitalisierungstrend und dem damit einhergehenden Erfolg von alternativen Lösungen wie ZigBee und Bluetooth [30], [70], [71]. Das besondere an Wi-Fi HaLow ist der ausschliessliche Fokus auf IoT mit reduzierter Signalbandbreite (zum Beispiel 1 MHz statt 20 MHz) und die Nutzung von Frequenzen unter 1 GHz, die typischerweise von batteriebetriebenen IoT Geräten mit geringer Datenrate verwendet werden. Die geringen Frequenzen erlauben wie bei IoT nötig eine stabile Versorgung von Gebäuden auch durch Wände hindurch und Kommunikationsdistanzen von mehreren hundert Metern. Wi-Fi HaLow Geräte können nicht mit anderen Wi-Fi Systemen kommunizieren.

3.1.4 3GPP 4G Long Term Evolution

Heutige Mobilfunkgeräte werden oft mit Long Term Evolution (LTE), der vierten Generation des weltweit verwendeten 3GPP Mobilfunkstandards, betrieben. Das von dem Third Generation Partnership Project (3GPP), einem Industrie-Konsortium, standardisierte und vermarktete System ist ein zelluläres Funknetz, das in der Schweiz von allen Mobilfunkbetreibern genutzt wird [05], [43]. Abbildung 4 illustriert die Versorgung des Modellgebäudes durch eine 4G Basisstation von aussen. Diese Architektur ist bei geringen Datenraten und fehlender alternativer Versorgung (Richtfunk, Festnetz) ein valider Ansatz, kann jedoch eine In-Haus Vernetzung in dem Referenzgebäude

nicht ersetzen: Je nach Beschaffenheit der Aussenwände und Fenster ist eine Versorgung der Innenräume mit hoher Datenrate nur schwer zu erreichen. Für 4G, das derzeit von der Folgegeneration 5G ersetzt wird, werden auch Geräte, die wie ein Wi-Fi Access Point die Endgeräte in einem Raum oder Stockwerk versorgen können, angeboten. Der Betrieb dieser als Picozellen bezeichneten Geräte liegt im Verantwortungsbereich der Netzbetreiber und wird bei fehlerhafter Mobilfunk-Versorgung eingesetzt.

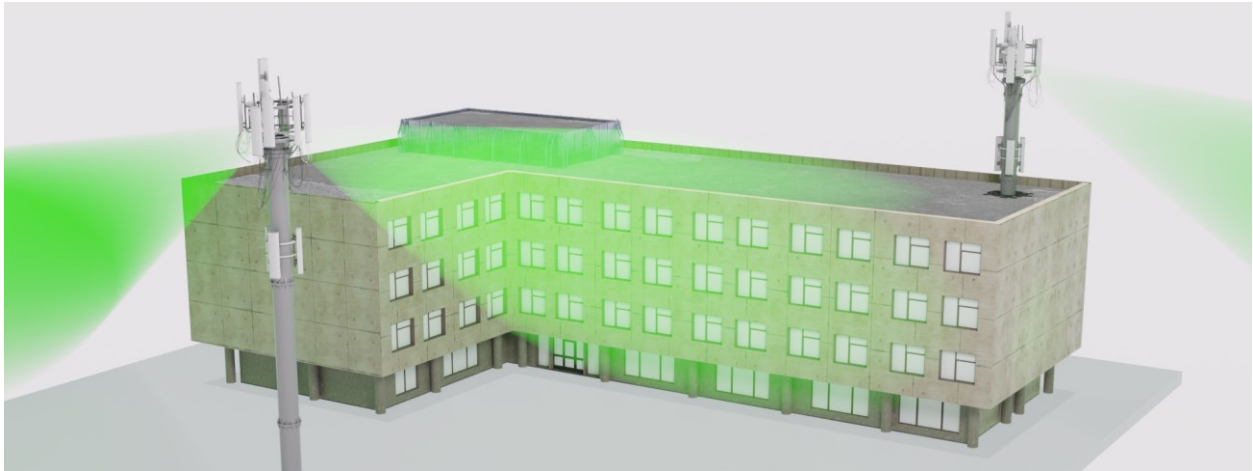


Abbildung 4: Gebäudeversorgung mit zellulärer 4G Basisstation, und Versorgung der Umgebung. Je nach Beschaffenheit der Aussenwände und Fenster ist eine Versorgung der Innenräume nur mit geringer Datenrate zu erreichen.

3.1.5 3GPP 5G New Radio

Die neueste Mobilfunk-Generation, die derzeit weltweit ausgerollt wird, ist 5G New Radio [08], [11], [26], [27], [28], [33], [34]. Mit dieser Lösung werden neue Frequenzbänder genutzt, und die Funk-schnittstelle wird ähnlich wie bei Wi-Fi mit neuen modernen Konzepten weiterentwickelt. Tabelle 6 fasst den Release-Plan des 3GPP Standardisierungs-Gremiums zusammen (Stand 2023). Speziell liegt der Fokus von 5G auf der systematischen Adressierung verschiedener Anwendungsbereiche und Märkte, was im Detail in [33] und [34] beschrieben und in Tabelle 7 zusammengefasst ist.

Es bleibt zu bemerken, dass zelluläres 5G eine Mobilfunk-Technologie ist und nicht für die Versorgung von Innenräumen mit ortsfesten Geräten entwickelt wurde. Aus diesem Grund ist 5G nicht dafür optimiert, die hier diskutierten Szenarien zu adressieren. Der Fokus in der von 5G adressierten Anwendungen (siehe Tabelle 7) liegt ganz klar auf mobilen Anwendungen.

Jahr	Release	Merkmale
2018	Rel-15	5G Basic: eMBB, Basic URLLC
2019	Rel-16	5G Evolution: V2X, NR-U, IIoT/TSN, IAB, Positioning
2021	Rel-17	5G Evolution: eMBB, URLLC, mMTC Features
2023	Rel-18	5G Advanced: RedCap, NTN
2025	Rel-19	5G Advanced
2026	Rel-20	5G Advanced
2028	Rel-21	6G Basic: Terahertz Kommunikation, Intelligente Oberflächen

Tabelle 6: Die Release Roadmap des 3GPP Standardisierungs-Gremiums für Mobilfunk, [01], [25], [26], [27]. Die Abkürzungen sind auf Seite 43 definiert.

Markt	Mobile Anwendungen	Dienstgüte-Anforderung
Mobile Broadband	fast broadband, cloud-based storage	hoher Durchsatz (10 Gb/s), geringe Latenz
VR/AR/Hologram	live broadcast, design, games	hoher Durchsatz, geringe Latenz
Smart City	IoT connected devices, cloud computing / cloud storage, traffic mgmt.	geringe Latenz
Automotive	tele-operated or autonomous driving, massive sensor, edge computing	geringe Latenz
Smart Manufacturing	edge computing, logistics, cameras	hoher Durchsatz, geringe Latenz
Drones	network planning	geringe Latenz
Wearables	body cameras, personal safety monitoring	geringe Latenz
eHealth	remote patient monitoring, diagnostics	geringe Latenz
Retail / Payment	interactive displays, e-kiosks	hoher Durchsatz
Energy	intelligent power distribution, smart meters	hoher Durchsatz

Tabelle 7: Klassifizierung von 5G Anwendungen, entsprechender Dienstgüte-Anforderungen, und dem Marktpotenzial. ZellulARES 5G ist eine Mobilfunk-Technologie und nicht primär für die Versorgung von Innenräumen mit ortsfesten Geräten entwickelt worden. Daher liegt der Fokus auf mobilen Anwendungen [33], [34].

3.1.6 ZigBee / Matter (Internet of Things)

ZigBee und die darauf basierende Protokoll-Familie Matter sind der de-facto Standard für industrielle und kommerzielle IoT Anwendungen [16], [17], [18], [19], [67], [75].

Die Connectivity Standards Alliance (CSA) hat die Vermarktung von ZigBee übernommen und seit einigen Jahren die Matter Protokolle entwickelt – dies mit dem klaren Ziel der Harmonisierung unterschiedlicher Ansätze. Viele namhafte Hersteller und Anwender sind Mitglied in der CSA. ZigBee arbeitet wie Wi-Fi HaLow im unkoordinierten lizenzfreien Spektrum mit Frequenzen unter 1 GHz. Heutige ZigBee Funksysteme sind oft proprietär und unabhängig in Geräte integriert (Beispiel: Schalter, Thermostate, Feuermelder). Sie sind allerdings nicht zuletzt wegen der Harmonisierungsbestrebungen der Industrie auch in eine Gebäudevernetzung integrierbar, was beispielsweise in vielen Grosshotels (Türöffner, Beleuchtung, Nutzungsstatistik, Automatisierung der Klimaanlage) bereits heute schon üblich ist. Im Gegensatz zu Wi-Fi HaLow gibt es eine Vielzahl von Herstellern, die ZigBee Lösungen anbieten.

Bluetooth 5 ist eine zu ZigBee komplementäre Technologie, die eher in der Unterhaltungselektronik eingesetzt wird (Kopfhörer, Smartphones) [12].

3.1.7 Rufsysteme

Rufsysteme in Hospitälern und ähnlichen Verwaltungsgebäuden können als lokal begrenzte Notrufsysteme verstanden werden. Ihre Anforderungen an Verfügbarkeit, IT Security und einfacher Bedienung gehen weit über das sonst geforderte Mass hinaus. Es existieren Lösungen basierend auf DECT und Wi-Fi, jedoch wären auch Ansätze basierend auf den Standards Tetra und Tetrapol, also in der Schweiz dem Sicherheitsfunknetz Polycom, denkbar [06], [07], [20], [21]. DECT wird weniger häufig als Wi-Fi oder den zellularen 3GPP Standards verwendet, und es kann daher angenommen werden, dass es kommerziell interessant wäre, 5G oder Wi-Fi zu verwenden. Sollte die Priorität auf Verfügbarkeit und IT Security liegen, könnte auch Polycom mit einer eigenen Infrastruktur eine valide Lösung sein, Rufsystem in Verwaltungsgebäuden unabhängig von anderen Anwendungen zu realisieren.

3.1.8 Passive Optische Verteilnetze

Passive optische Verteilnetze sind Polymerfaser- oder Glasfaser-gebundene Netze, die mit Lichtwellenleitern statt drahtloser Übertragung arbeiten [04], [29], [38], [74]. Sie kommen ohne eigene elektrische Energieversorgung und ohne aktives Routing aus. Auf Signalverstärkungen und Signalaufbereitung wird verzichtet. Die Verteilung erfolgt mittels optischer Splitter, die für die Aufteilung der Signale auf die einzelnen Faserleitungen zu den Räumen, Accesspoints und Arbeitsplätzen sorgen. Dies ist in Abbildung 5 dargestellt.

Kommunikationsleitungen werden bidirektional, also mit Datenübertragungen in beide Richtungen, verwendet. Die Splitter besitzen Verteilverhältnisse von zum Beispiel 1:64. An den Abschlüssen der Verteilung werden die Signale in elektrische Signale umgewandelt. So können In-Haus Funkzellen und stationäre Endgeräte an den Arbeitsplätzen stabil und störungsfrei miteinander verbunden werden. Neben geringen Investitionskosten erlaubt die sehr hohe mögliche Datenrate der Lichtwellenleiter eine spätere Skalierung, falls der Kapazitätsbedarf steigen sollte. Aufgrund der wenigen aktiven Komponenten und der langen Lebensdauer der passiven Komponenten kann PON als äusserst umweltfreundliche Lösung mit Potenzial für Energieeinsparung gelten.

Nachteilig für PON ist, dass im Gegensatz zu den Lichtwellenleitern die klassischen kupferbasierten Leitungen auch für die elektrische Leistungsversorgung von aktiven Komponenten und Accesspoints verwendet werden können (Power over Ethernet, PoE) [15].

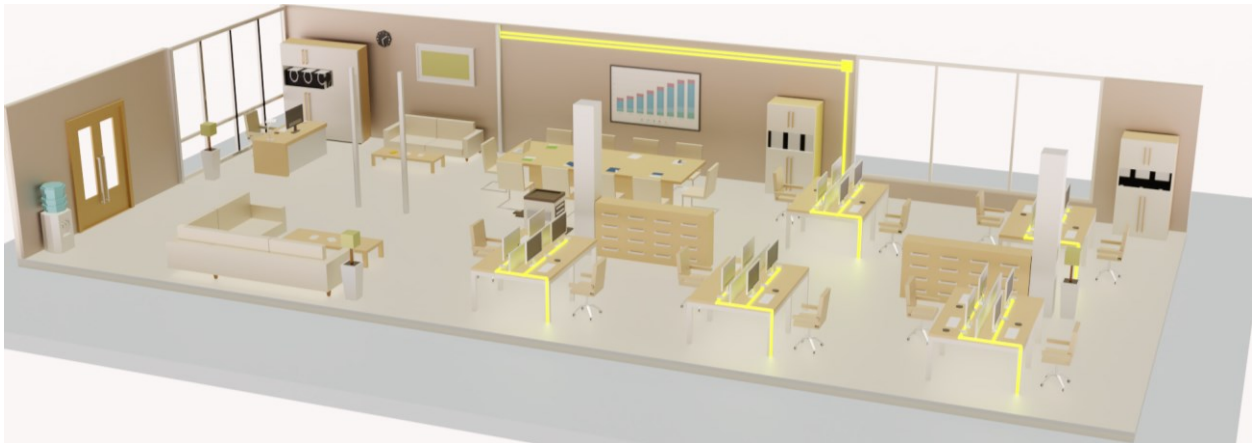


Abbildung 5: Passive optische Vernetzung mit Lichtwellenleitern und optischen Splittern (Konzeptdarstellung).

3.2 Entwicklungen und Technologie Trends

Es ist für diese Studie von Interesse, zu erwartende Entwicklungen und Trends, die für zukünftige kommerzielle Funksysteme relevant sein können, zu identifizieren. Einige dieser Entwicklungen sind daher im Folgenden aufgelistet. Motiviert sind diese Entwicklungen durch die beiden grossen Trends Digitalisierung und Dekarbonisierung:

1. **Digitalisierung:** mehr (mobile) Geräte und Sensoren, vertrauliche Nutzung von Daten, Cloud Computing & Storage, besonderer Fokus auf den Schutz von Privatsphären und der IT Security
2. **Dekarbonisierung:** energieeffiziente Kommunikationssysteme mit langer Lebensdauer, dynamisch und adaptive konfigurierbare Netze bei instabiler Versorgung (Ausfall der Energieversorgung), Verzicht auf elektrochemische Energiespeicher (Batterien, Akkumulatoren), optische Kommunikation

3.2.1 Höhere Frequenzen, geringere Distanzen und Zellgrößen, Unlizenziertes Spektrum

Zukünftige drahtlose Kommunikationssysteme werden ihren Bedarf an hochbitratigen Signalen hauptsächlich in höheren Frequenzbereichen, also im Funkspektrum von Frequenzen grösser als 6 GHz oder im Terahertz Band erfüllen können. Wegen der dort herrschenden regulativen Bedingungen und der physikalischen Einschränkungen sind die Ausbreitungs-Distanzen in der Realität deutlich eingeschränkt. Daher sind in Zukunft die resultierenden Zellgrößen, also die Versorgungsflächen von Access Points und Basisstationen, kleiner als bisher, und der Bedarf an mehr Stationen wird auch für die Inhaus-Versorgung wachsen. Es kann daher prinzipiell für jeden Raum mit mindestens einem Access Point gerechnet werden. Bei den verwendeten sehr hohen Betriebsfrequenzen bewirkt die verringerte Zellgröße aber auch eine deutlich erhöhte Netzkapazität: In kleinen Zellen ist die Zahl der Endgeräte im Empfangsbereich naturgemäß auch kleiner, und so steigt pro Endgerät also auch die Kapazität, gemessen in Bit pro Zeit. Es werden auch wegen des im Mittel höheren Signal-Rausch-Verhältnisses (Signal-to-Noise Ratio, SNR) Modulationsverfahren mit höherer Ordnung möglich (mehr Bit pro Zeit bei gleichbleibender Frequenzbandbreite).

Die Nutzung von unlizenziertem Funkspektrum wird bei hohen Frequenzen eine wichtige Rolle spielen. So teilen zum Beispiel bereits heute verschiedene ungleiche Systeme das unlicenzierte 60 GHz Band (Radar, WiGig Kommunikation, Sensoren, Richtfunk). Für eine akzeptable spektrale Effizienz werden also Koexistenz-Verfahren benötigt, die dafür sorgen müssen, dass drahtlose Kommunikationssysteme in unlizenziierten Bändern nicht gestört werden. Unterschiedliche (neue) Funkssysteme werden in der Lage sein müssen, mit anderen Systemen effizient zu koexistieren, so dass der gleichzeitige Betrieb mit Dienstgüte-Kontrolle möglich ist. Das bekannte Spread Spectrum Verfahren, mit Hilfe dessen Funksignale breitbandig versendet werden, kann für die spektrale Koexistenz von ungleichen (gegenseitig unbekannt) Systemen verwendet werden. Das Bluetooth Frequency Hopping (FH) Verfahren ist ein klassisches Beispiel dafür [12]. Auch adaptive MIMO Antennen, die die Funksignale in und aus der gewollten Richtung senden oder empfangen, werden das Problem der Koexistenz entschärfen.

3.2.2 Adaptive lernende Verfahren und Künstliche Intelligenz in der Funkschnittstelle

Für die Funkschnittstelle werden Modulation, Codierung, und Mehrfachzugriffsverfahren kontinuierlich weiterentwickelt, so zum Beispiel neue Multi-Carrier-Modulation, Mustererkennung und KI-basierte Detektoren im Medienzugriff [58]. Da grundsätzlich aus der Zugriffsstatistik der Kommunikationsbedarf pro Endgerät (wie viele Daten wann und wie schnell) abgeleitet werden kann, bieten sich lernende Verfahren an, um die Nutzung der Funkressourcen zu optimieren.

3.2.3 3GPP RedCap (long-range Internet of Things)

Es ist vorstellbar, dass die besondere Rolle, die der Standard Wi-Fi HaLow für die gesamte Wi-Fi Roadmap spielt, in gleicher Form vom 3GPP Standard Reduced Capability (RedCap) für 5G übernommen wird: Die Bildung einer harmonisierten, weltweit verfügbaren und von allen Beteiligten favorisierten IoT Lösung.

RedCap ist ein bereits verabschiedeter 3GPP Standard, der nur die für IoT notwendigen Konzepte der 5G Funkschnittstelle übernimmt [25], [48], [56], [60], [68], [69]. So entsteht auf einfache Art und Weise eine zellulare IoT Lösung, die das Potenzial hat, die heute auf dem Markt dominierenden und eher proprietären Ansätze (LoRa [73], NB-IoT und LTE-M [39], [49], [52]) vollständig zu erset-

zen. RedCap Systeme operieren in ihrer einfachsten Konfiguration mit einer reduzierten Signalbandbreite von 20 MHz. Die Endgeräte benötigen nur einen Transceiver, können also nicht gleichzeitig senden und empfangen. Sie operieren zum Beispiel mit dem einfachen Frequency Division Duplex (FDD) Verfahren, das schon in den neunziger Jahren in der zweiten Mobilfunk-Generation, Global System for Mobile Communications (GSM), sehr erfolgreich genutzt wurde. RedCap unterstützt genau wie Wi-Fi 4 die Nutzung von 2x2 MIMO Antennen. Die Betriebsfrequenz kann frei zwischen 2 GHz und 6 GHz gewählt werden, andere Konfigurationen sind aber auch möglich.

3.2.4 3GPP 6G mit intelligenten Oberflächen und Terahertz (THz) Kommunikation

Mobilfunk wird traditionell mit erheblichen Fördermitteln entwickelt.

Schon während der Ausrollphase einer Mobilfunkgeneration beginnen Lobbygruppen, Akademiker, Standardisierungs-Gremien und nicht zuletzt Fördereinrichtung mit der Ausrichtung der Forschung und Entwicklung auf die darauf folgenden Generation [03], [50], [51], [62].

So ist es bereits heute, während 5G zunehmend zum Einsatz kommt, möglich, einen Trend und mögliche technische Ansätze für 6G zu benennen. Neben der zu erwartenden Evolution der Funkchnittstelle (Modulation und Kodierung, IT Security, Medienzugriffsprotokolle, Antennen) bemühen sich laufende Projekte um die Einbettung von KI-basierten Entscheidungen in die Verwaltung der Funkressourcen. 6G Systeme werden hohe Funkfrequenzen verwenden und in den Bereich von Terahertz-Frequenzen stossen. Für die Planung von Verwaltungsgebäuden kann daher angenommen werden, dass Funkzellen weiter eher kleine Gebiete abdecken und eine Vielzahl von Basisstationen nötig sein wird (ein Access Point pro Raum). Die Ausbreitung von Signalen durch Fenster, Türen und Wände wird (wie von optischen Signalen bekannt) nur schwer möglich sein.

Es gibt Ansätze, dieser Problematik mit intelligenten Oberflächen entgegen zu wirken: Eine Vielzahl von millimetergrossen und miteinander synchronisierten Antennenelementen kann die Reflektionsbedingungen einer Wand für Terahertz-Frequenzen so verändern, dass die Signale ihre Ziele mittels Reflektionen trotz vieler Hindernisse erreichen. Die Komplexität solcher intelligenten Oberflächen zu beherrschen ist Ziel laufender Forschungsprojekte, in denen auch Schweizer Institutionen beteiligt sind [28].

3.2.5 Nicht-Terrestrische Netze (Satellitenzugänge)

Ein Trend bei der 3GPP sind Satellitenzugänge für Nicht-Terrestrische Netze (NTN), die Weltraum- oder Luft-gestützte Plattformen verwenden. Dies wird mit einer Vielzahl von Low Earth Orbit (LEO) Satelliten ermöglicht, die kleiner, leichter und günstiger zu betreiben sind als geostationäre Satelliten [55], [57], [58].

3GPP arbeitet an einem NTN Standard, der als integraler Bestandteil von 6G angesehen wird, um weltweite Konnektivität bereitzustellen.

In der Schweiz können NTN für (temporäre) Zugänge in schwer erreichbaren Regionen und Katastrophengebiete mit eingeschränktem zellularem Empfang von Interesse sein. Auch in Zeiten, in denen Netze oder eine Energieversorgung ausfallen, können LEO Satelliten einen hilfreichen Ersatz bieten.

Beim Betrieb ist zu beachten, dass gegebenenfalls eine Gebäudeversorgung mit Hilfe eines ausserhalb des Gebäudes befestigten Transceivers nötig wäre. LEO Satelliten sind nicht geostationär und umkreisen die Erde mit einer Umlaufzeit von etwa zwei Stunden. Dabei ist ein Satellit, je nach Orbit (typisch sind etwa 1000 km), etwa zehn Minuten im Sichtfeld einer Antenne. Ein NTN besteht

daher typischerweise aus einer grossen Zahl solcher Satelliten, und Transceiver müssen in der Lage sein, die Satelliten alle paar Minuten zu wechseln. Um das für den Empfang mit höherer Datenrate nötige Signal-Rausch Verhältnis (SNR) zu erreichen, werden in den Transceivern Phased-Array Antennen verwendet, die den Satelliten folgen können. Sie sind relativ gross und in kommerziellen Geräten (Laptops, Mobiltelefone) nicht verfügbar.

Populäre bereits aktive NTNs sind Starlink (www.starlink.com, derzeit mehr als 4000 Satelliten, 550 km Umlaufbahn) und OneWeb (oneweb.net, derzeit mehr als 600 Satelliten auf 1200 km Umlaufbahn). Das bekannte NTN Globalstar (www.globalstar.com, 24 Satelliten, 1400 km) ist auf Notruf und IoT spezialisiert und weniger für eine Gebäudeversorgung geeignet. Neuere iPhones der Firma Apple nutzen Globalstar für Notrufe.

3.2.6 Kommunikation mit Licht (Visible Light Communication, ETH Zürich)

Die Verwendung optischer Signale für Kommunikationszwecke anstelle von Funksignalen hat in den letzten Jahren ein bemerkenswertes Forschungs- und Standardisierungsinteresse geweckt. So hat auch die ETH Zürich wichtige Beiträge im Bereich IoT und Unterhaltungselektronik entwickelt [64], [65]. Der allgemeine Trend zu einer wachsenden Nachfrage nach drahtlosen Daten wird in Zukunft die Erschliessung von derzeit ungenutzten Frequenzbändern des elektromagnetischen Spektrums erfordern. Dazu gehört auch das Spektrum von sichtbarem Licht (400...800 Terahertz). Dieses als Visible Light Communication (VLC) benannte Verfahren kombiniert das sichtbare Licht von Beleuchtungseinrichtungen mit Datenkommunikation. Die Technologie ist etabliert und viele Fortschritte der VLC-Forschung haben bereits ihren Weg in Standards gefunden (Beispiele sind IEEE 802.11 Li-Fi und IEEE 802.15.7 [35]).

VLC ist auch für IoT relevant: IoT verbindet kleine, wenig komplexe Geräte (zum Beispiel Sensoren oder Spielzeug) mit dem Weitverkehrsnetz. Viele IoT-Geräte haben geringe Anforderungen an die Datenrate. Eine Kommunikationsinfrastruktur, die darauf abzielt, eine grosse Anzahl von Geräten zu verbinden, muss also kostengünstig, unaufdringlich und weitestgehend überall verfügbar sein. Die Nutzung von Licht und VLC ist daher eine attraktive Wahl für Geräte, welche sowieso eine LED-Beleuchtung beinhalten.

3.2.7 Multiuser Massive MIMO

Die Organisation ITU-R (ITU Radiocommunication Sector) identifiziert regelmässig Technologietrends kommerzieller Funkssysteme, welche dort als International Mobile Telecommunications (IMT) bezeichnet werden (siehe [42] und [43]). Laut ITU-R ist eine der vielversprechenden Lösungen für Wi-Fi und Mobilfunk das «Multiuser Massive MIMO» Konzept.

Fortschrittliche aktive adaptive Antennentechnologien, Multiple Input Multiple Output (MIMO) mit grosser Zahl von Antennenelementen (zum Beispiel >100, oft als «Massive MIMO» bezeichnet) und Multiuser MIMO erzielen im Vergleich zum Stand der Technik eine erheblich effizientere Nutzung des Funkspektrums. Dabei werden Nutzer nicht nur von einem Access Point oder einer Basisstation, sondern gleichzeitig, auf der gleichen Frequenz, mit phasengenau synchronisierten Signalen, von einer Vielzahl von Stationen versorgt. Antennen senden und empfangen in und aus verschiedenen Richtungen und nutzen die Mehrwegeausbreitungen und Reflexionen der Signale an Objekten und Wänden geschickt aus. So kann bei gleichbleibender Frequenzbandbreite die Datenrate (und somit die spektrale Effizienz) um ein Vielfaches erhöht werden.

Die Herausforderung liegt dabei im grossen Rechenaufwand im Basisband und der Synchronisierung der Signale.

Auch das gleichzeitige Senden und Empfangen auf derselben Frequenz mit Selbstinterferenzunterdrückung ist ein Konzept, das die spektrale Effizienz erhöhen kann.

3.2.8 Software-Defined Networking

Software-Defined Networking (SDN) ist eines der von ITU-R favorisierten Ansätze um Netzinfrastrukturen flexibler zu gestalten und zu vereinfachen. Zukünftige drahtlose Kommunikationssysteme erfordern laut [42] flexible Netzwerkkomponenten, die auf der Grundlage der SDN Architektur flexibel konfiguriert werden können. Software wird also einige Funktionen, die bisher mit dedizierter Hardware realisiert wurden, ersetzen. Dazu wird eine Netzwerk-Funktions-Virtualisierung (NFV) benötigt, also eine standardisierte Methode, um Funktionen und Interfaces in einer vereinheitlichten Sprache zu spezifizieren. Netzkomponenten wie zum Beispiel Router, Firewall, Load Balancer oder Billing Systems sollen so dynamisch konfigurierbar werden und somit veränderten Gegebenheiten entsprechend leichter anzupassen sein. Dies kann bei einem Teilausfall von Netzen eine wichtige Rolle spielen.

4 Technologie-Bewertung

Einige der in Kapitel 3 identifizierten Lösungen werden in diesem Kapitel verglichen und mit Hilfe der Kriterien aus Tabelle 5, Seite 11, bewertet. Darauf basierend werden Thesen und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Für die Vergleiche in Abbildung 6 - Abbildung 8 wird ein Zahlenwert zur Visualisierung verwendet. Dabei bedeutet ein hoher Wert, dass die Lösung das Potenzial hat, ein Kriterium zu erfüllen, und ein geringer Wert, dass ein Kriterium unter den gegebenen Voraussetzungen nicht erfüllt wird.

Die Darstellungen sind nicht mittels der Modelle berechnet und dienen stattdessen der Visualisierung und Gewichtung der in diesem Dokument identifizierten Vor- und Nachteile.

4.1 Lösungen für Datenverkehr

Abbildung 6 illustriert die Bewertung für den Datenverkehr. Die empfohlenen Lösungen sind 3GPP 5G/6G, Wi-Fi 6 / 7, PON, und VLC. Es ist sichtbar, dass für eine VLC Lösung noch einige Fragen zu beantworten sind, so zum Beispiel die Qualität der Standardisierung (mit Übernahme durch die Wi-Fi Alliance und entsprechender Zertifizierung und Kommerzialisierung) und die Lieferantwahl. VLC wurde bereits vor einigen Jahren in der IEEE 802.15 ohne Erfolg standardisiert, und es muss genau beobachtet werden, ob mit Li-Fi ähnliches passieren wird.

Erwartungsgemäss zeigt PON die besten Ergebnisse bezüglich Nachhaltigkeit und Ausfallsicherheit. Aufgrund der langen Betriebsdauer von PON ist auch eine geringe TCO zu erwarten.

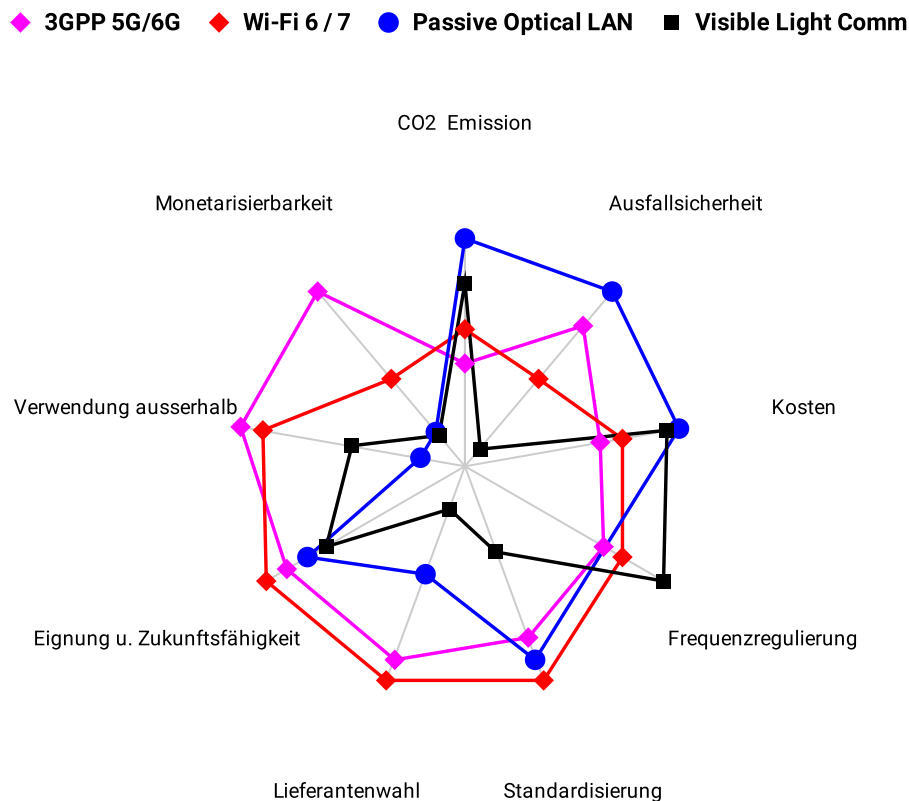


Abbildung 6: Vergleich der Lösungen für Datenverkehr. Kosten, Eignung und Standardisierung haben hohe Priorität. Eine Kombination von PON und Wi-Fi erscheint als vielversprechende Lösung.

3GPP 5G/6G ist keine Technologie, die für einen Inhaus-Versorgung mit ortsfesten Geräten optimal geeignet ist, sondern eine Mobilfunk-Technologie mit Fokus auf mobilen Anwendungen. Allerdings lässt sich eine einmal ausgerollte Infrastruktur auch anderweitig verwenden.

Fazit: Eine Kombination von PON und Wi-Fi erscheint als vielversprechende Lösung.

4.2 Lösungen für IoT Automatisierung

Abbildung 7 illustriert die Bewertung für die IoT Automatisierung.

Diese Dienste werden durch ZigBee / Matter versorgt werden können, speziell wenn es sich um dedizierte Sensoren handelt, die nicht vom Betreiber kontrolliert oder konfiguriert werden müssen.

Wi-Fi 4, das heutige Wi-Fi, ist eine Alternative dazu, die auf Grund ihrer geringen Kosten und der hohen Verfügbarkeit nicht unterschätzt werden sollte.

Wi-Fi HaLow leidet unter der unklaren Situation bei Lieferanten, ähnlich wie VLC.

3GPP RedCap allerdings kann eine valide Alternative darstellen, da 3GPP RedCap auch mit geringen Frequenzen (<1 GHz) betrieben werden kann.

Fazit: Die Nutzung von ZigBee, einer Infrastruktur basierend auf Wi-Fi 4, und eventuell eine Nutzung von 3GPP RedCap erscheinen als vielversprechende Lösungen.

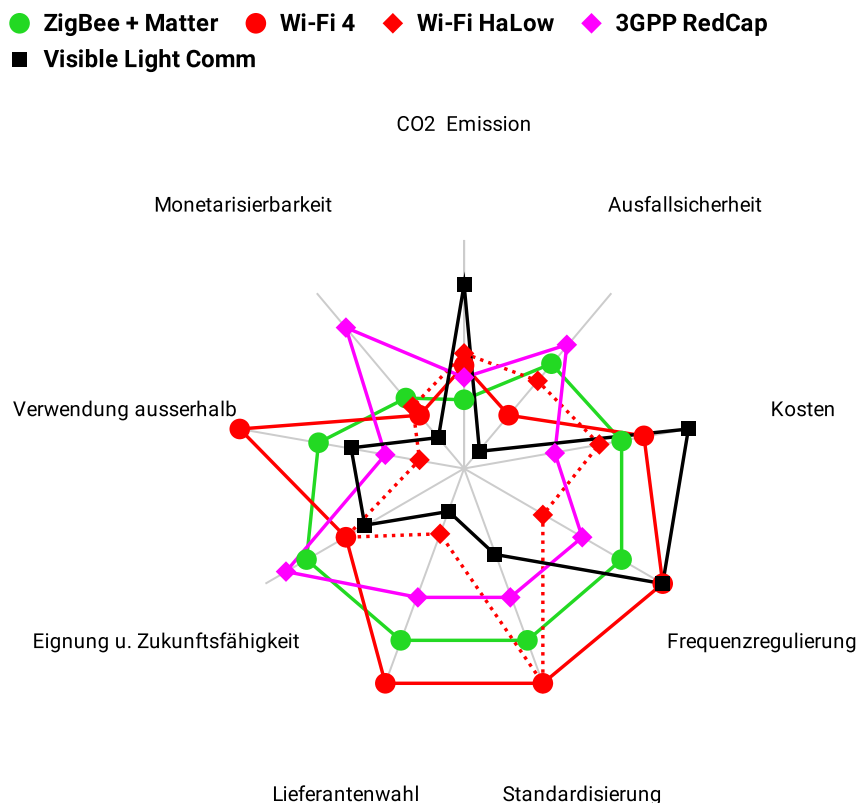


Abbildung 7: Vergleich der Lösungen für IoT Automatisierung. Kosten, Eignung und Standardisierung haben hohe Priorität. Die Nutzung von ZigBee, einer Infrastruktur basierend auf Wi-Fi 4, und eventuell eine Nutzung von 3GPP RedCap erscheinen als vielversprechende Lösungen.

4.3 Lösungen für Rufsysteme

Abbildung 8 illustriert die Bewertung der möglichen Lösungen für ein Rufsystem.

Hier ist bisher eine Lösung basierend auf DECT der übliche Ansatz. Es gibt aber auch interessante alternative Lösungen, so zum Beispiel Wi-Fi 4 (speziell, wenn Wi-Fi 4 sowieso auch für die Automatisierung gewählt werden sollte), 3GPP RedCap, und das ohnehin flächendeckend zur Verfügung stehende Sicherheitsfunknetz Polycom (Tetrapol).

Bei einer Lösung basierend auf Polycom müssen höhere Kosten auf Grund von Lizenzgebühren angenommen werden.

Fazit: DECT, Wi-Fi 4, 3GPP RedCap, und Tetrapol sind vielversprechende Lösungen.

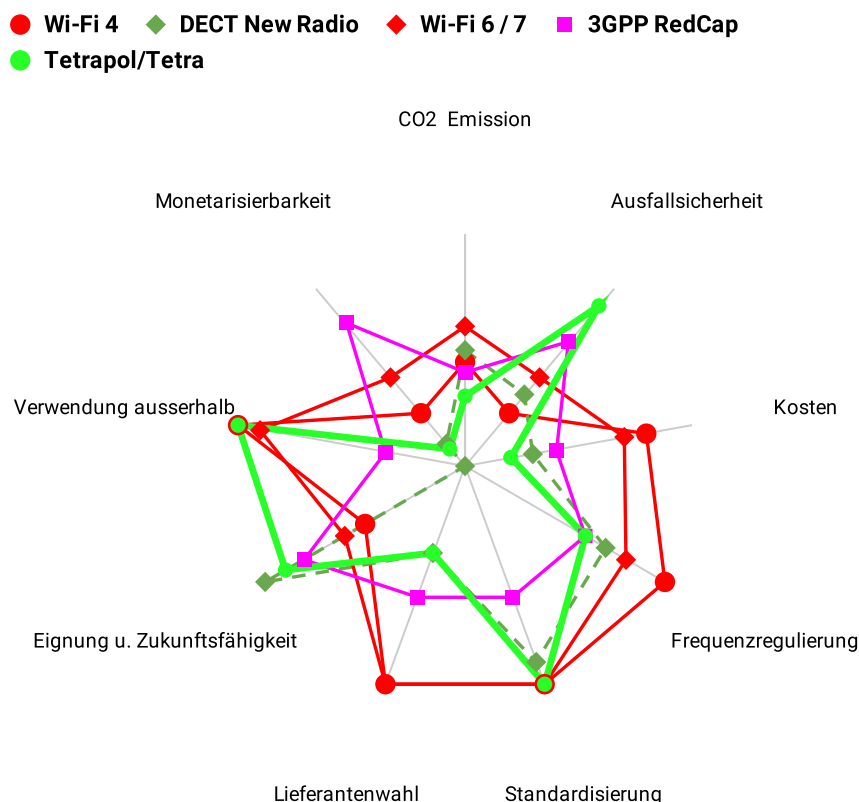


Abbildung 8: Vergleich der Lösungen für Rufsysteme. Kosten, Eignung und Standardisierung haben hohe Priorität. DECT, Wi-Fi4, 3GPP RedCap, und Tetrapol/Tetra sind vielversprechende Lösungen. Bei einer Lösung basierend auf Tetrapol/Tetra werden höhere Kosten auf Grund von Lizenzgebühren angenommen.

4.4 Thesen und Empfehlungen

These A: Eine deckende Versorgung der Gebäude durch Wi-Fi erfüllt die zu erwartenden Bedürfnisse für den Datenverkehr.

Das heute schon verfügbare Wi-Fi 6, das auf dem Standard IEEE 802.11ax basiert, ist geeignet, die Verwaltungs-Gebäude zu versorgen und zukünftige Dienstgütereanforderungen zu erfüllen. Die Weiterentwicklung auf Wi-Fi 7 / 8 wird diesen Trend unterstützen.

Auf eine In-Haus Infrastruktur zur Versorgung der Innenräume durch 3GPP 5G/6G kann daher weitestgehend verzichtet werden.

These B: Wi-Fi 4 ist eine kostengünstige Alternative, die auf dem Standard 802.11n basiert und seit etwa zehn Jahren zum Einsatz kommt.

Die Nutzung von Wi-Fi 4 für IoT Anwendungen und Rufsysteme bietet daher eine attraktive Alternative. Es wird empfohlen, eine flächendeckende Wi-Fi 4 Abdeckung zu prüfen, und damit auch IoT Anwendungen und Rufsysteme zu unterstützen. Damit wäre auch der Verzicht auf eine DECT-Infrastruktur möglich.

These C: Passive Optische Netze werden die Kosten- und Umweltbilanz positiv prägen.

PON kann generell als ökologisch nachhaltig und ausfallsicher eingeschätzt werden, da auf aktive Komponenten wie funkbasierte Repeater oder Mesh Networking verzichtet werden kann. PON ist nicht zuletzt auf Grund seiner langen Lebensdauer eine günstige Lösung, um Arbeitsplätze und Netzkomponenten zu vernetzen.

These D: 3GPP RedCap wird die derzeitige Fragmentierung von zellularen IoT Standards vereinheitlichen (LoRa, NB-IoT, LTE-M) und kann daher eine interessante Lösung für IoT und eine Gebäudeautomatisierung bieten.

Die Anwendung von 3GPP RedCap für die Gebäudeautomatisierung und das Internet der Dinge ist vielversprechend. Eine Vorbereitung zur frühen Nutzung dieser Technologie ist empfehlenswert. Daraus folgt auch ein Verzicht auf LoRaWAN, NB-IoT, und LTE-M, sowie DECT New Radio.

These E: Wi-Fi HaLow kann eine valide IoT Lösung sein, wirkt jedoch nicht so etabliert wie ZigBee oder Wi-Fi 4.

Wi-Fi HaLow, sofern kommerziell verfügbar, wird in Zukunft eine valide IoT Lösung bei der Anwendung für die Gebäudeautomatisierung und das Internet der Dinge sein. Eine Vorbereitung zur frühen Nutzung, ohne auf ZigBee oder die Alternative Wi-Fi 4 zu verzichten, kann hilfreich sein. Es wird empfohlen, neben ZigBee/CSA auch Wi-Fi HaLow zu untersuchen.

These F: Die Nutzung von Polycom (Tetrapol) ist eine Alternative zu DECT in der Nutzung von Rufsystemen.

Hochredundante und ausfallsichere Notfallsysteme können durch Tetrapol abgedeckt werden. Sofern verfügbar und kommerziell sinnvoll, wird daher empfohlen, einen Verzicht auf DECT / DECT NR+ zu analysieren und gegebenenfalls auf Tetrapol zu wechseln.

These G: Eine erweiterte kommerzielle Nutzung reduziert die Gesamtkosten von 3GPP 5G/6G. 3GPP 5G/6G nutzt nicht nur der öffentlichen Verwaltung, sondern dient auch der Versorgung mit alternativen Diensten (Unterhaltung, Information, soziale Medien). Daher ist eine Wiederverwendung der Kommunikations-Infrastruktur für zum Beispiel die Aussenbereiche um die Gebäude interessant. Öffentliche Verwaltungsgebäude befinden sich oft in Stadtzentren und sind damit ideale Kandidaten für Antennenstandorte und eine Vernetzung. Es wird empfohlen, dies vertieft zu untersuchen.

4.5 Bemerkungen

4.5.1 Flexible Arbeitsformen

Es kann für die Zukunft angenommen werden, dass in der öffentlichen Verwaltung vermehrt auf flexiblere Arbeitsformen gesetzt wird: Arbeitszeiten und -Orte werden je nach Bedarf gewechselt (FlexWork und Home Office), Videokonferenzen ersetzen Gesprächsrunden, Arbeitsplätze werden nur temporär belegt und geteilt («Shared Office»). Von Mitarbeitenden erworbene und auch im Berufsalltag verwendete Endgeräte werden von ihnen selbstständig ausgewählt und administriert («Bring your own Device», BYOD). So muss also auch eine drahtlose Infrastruktur diese Flexibilität, Heterogenität und Vielzahl unterschiedlicher Endgeräte unterstützen. Das verlangt nach Lösungen, die bereits auf dem Markt etabliert sind und in Konsumgütern (Notebooks, Smartphones) verfügbar sind. Proprietäre, nicht standardisierte Lösungen sollten weitestgehend vermieden werden.

4.5.2 Vielfalt der Gebäude

In den Kantonalen Verwaltungen besteht eine erhebliche Gebäudevielfalt mit unterschiedlicher Dichte. Sowohl neue, moderne Gebäude, als auch ältere und unter Denkmalschutz stehende Gebäude, die sich in dichten Stadtzentren befinden, sind oft in Verwendung. Da die Wandbeschaffenheit (Material, Dicke, Feuchtigkeit, Reflexionseigenschaften) einen Einfluss auf die Funkfeldausbreitung innerhalb eines Gebäudes hat, kann die in diesem Dokument getroffene Wahl eines einzelnen Referenz-Szenariums dieser Vielfalt nicht völlig gerecht werden. Das modellierte Szenarium dient also hauptsächlich der Illustration und der Diskussion. Für Einzelfälle sind abweichende Lösungen (Beispiel: Versorgung von aussen) denkbar.

Spezialisierte Anwendungen von drahtlosen Kommunikationssystemen, die zum Beispiel in Datenzentren, Hospitälern, in der Logistik, bei der Steuerung von grossen Maschinen, oder auch in Fabriken (Industrial IoT) auftreten, werden in diesem Projekt nicht betrachtet.

4.5.3 Regulierung der Frequenzbänder

Bei der Bewertung von Funksystemen darf nicht vergessen werden, dass die Vergabe von Funkfrequenzen einen Einfluss auf die Qualität der Lösungen haben kann (exklusiv lizenziert oder offen, Frequenzbänder, Sendeleistungen, Antennencharakteristiken). Oft stehen Systeme in Konkurrenz zueinander, und es ist die Spektrumsvergabe der Frequenzen, die letztlich über den kommerziellen Erfolg einer Lösung und damit über die Auswahl bestimmt (Beispiel: Die Regulierung von 5G New Radio Unlicensed, NR-U, erlaubt den Betrieb von 5G im unlizenzierten Spektrum, während Wi-Fi ausschliesslich im unlizenzierten Spektrum, aber nicht im exklusiv lizenzierten betrieben werden darf). Eine Lösung, die mit lizenziertem Spektrum und vorteilhaften Randbedingungen (Sendeleistungen, Frequenzen) betrieben werden kann, hat häufig auf Grund dieser Randbedingung einen technischen Vorteil, da mögliche Anforderungen an Dienstgüte erfüllt werden können.

5 Vertiefte Analyse

5.1 Wi-Fi IEEE 802.11 (Thesen A, B, E)

Die öffentlichen Verwaltungsgebäude der Schweiz sollten dem Stand der Technik entsprechend mit Wi-Fi versorgt werden. Es können in Gebäudebereichen mit einer geringen Endgeräte-Dichte (Kellerräume, Flure, Logistikräume) einfachste Geräte der Generation Wi-Fi 4 verwendet werden. Wi-Fi 4 ist eine kostengünstige Variante, die auf dem IEEE 802.11n Standard basiert und bereits seit etwa zehn Jahren zum Einsatz kommt. Eine flächendeckende Versorgung eines gesamten Gebäudes durch Wi-Fi kann mit moderneren Geräten mit Hilfe von MIMO Antennen fast schon beliebig skaliert werden. Wi-Fi kann höchste Anforderungen bezüglich des Durchsatzes und der Anzahl von Arbeitsplätzen pro Raum erfüllen. Wi-Fi 6, das auf der Verwendung von MIMO Antennen und der Versorgung durch mehrere Access Points basiert (mit phasengleichen Signalen, Standard IEEE 802.11ax) kann ein Vielfaches der erwarteten zukünftigen Dienstgüteanforderungen unterstützen. Die heutigen Standardisierungs-Aktivitäten bei der IEEE 802.11 hin zu den nächsten Generationen Wi-Fi 7 und Wi-Fi 8 werden diesen Skalierungseffekt weiter beschleunigen.

Wi-Fi wird für beide Varianten der Kommunikations-Infrastruktur empfohlen.

5.2 3GPP 5G (Thesen A, G)

Bei einer Nutzung von Wi-Fi stellt sich die Frage, ob auf eine In-Haus 5G Infrastruktur zur Versorgung der Innenräume durch 3GPP 5G verzichtet werden kann. Grosse privatwirtschaftliche Unternehmen in der Schweiz haben diesen Entscheid bisher eindeutig getroffen. Üblicherweise wird auf eine dedizierte 5G Kommunikations-Infrastruktur verzichtet und stattdessen auf die zellulare Versorgung von aussen gesetzt.

In dieser Arbeit wird daher 3GPP 5G nur bei hohen Anforderungen an Dienstgüte, Redundanz und Verfügbarkeit der Dienste als Teil der Kommunikations-Infrastruktur empfohlen. Es ist daher als Bestandteil der Variante «UMFASSEND» (Kapitel 7.3) empfohlen.

Das sogenannte Indoor 5G lässt sich aber vereinzelt auch vorteilhaft einsetzen, speziell wenn die 5G Funkfeldausbreitung innerhalb eines Gebäudes gewünscht sein sollte. Weitere Argumente für eine 5G Infrastruktur sind eine mögliche Drittnutzung mit Gewerbeflächen und Laufkundschaft, und öffentlich zugängliche Bauten.

Öffentliche Verwaltungsgebäude befinden sich oft in Stadtzentren und sind attraktive Kandidaten für Antennenstandorte von öffentlichen 5G Netzen. Eine erweiterte Nutzung und Wiederverwendung einer für die Gebäudeversorgung vorgesehenen Kommunikations-Infrastruktur kann für Telekommunikationsanbieter von Interesse sein. Die Versorgung der Aussenbereiche in der Nähe der Gebäude kann also ein weiterer Grund für das Ausrollen von 5G im Gebäude sein.

5.3 3GPP 5G RedCap (These D)

Es ist wichtig zu bemerken, dass die zellulare IoT Lösung, die 3GPP heutzutage anbietet, auf den Märkten fragmentiert ist. Es gibt unterschiedliche Varianten, aber weder LoRaWAN, noch

NB-IoT, noch LTE-M sind weltweit verfügbar. Diese drei Lösungen verlieren dadurch an Attraktivität, da sie nicht mit den gleichen Skalierungseffekten entwickelt werden können, die weltweite Märkte theoretisch ermöglichen. 3GPP RedCap ist mit dem Ziel entwickelt worden, diese Fragmentierung von zellularen IoT Standards aufzulösen und eine vereinheitlichte Lösung anzubieten, und zwar weltweit. RedCap basiert auf einer Reduktion der Funktionalitäten von 5G, was weitestgehend durch Software/Firmware Updates ermöglicht werden kann. Es wird daher davon abgeraten, auf eine der drei heutigen Lösungen zu setzen, und stattdessen mit Anbietern und Lieferanten die 3GPP RedCap Lösung zu diskutieren.

3GPP 5G RedCap ist Teil der Variante «UMFASSEND», die eine komplexe Gebäudeautomatisierung und das Internet der Dinge adressiert. Daraus folgt also ein Verzicht auf LoRaWAN, NB-IoT, und LTE-M.

5.4 Wi-Fi HaLow (These E)

Die Nutzung der IoT Variante von Wi-Fi, dem sogenannten Wi-Fi HaLow, kann für beide Varianten der Kommunikations-Infrastruktur nicht empfohlen werden. Es gibt derzeit nur wenige Hersteller, die überhaupt einen Chipsatz anbieten. Auch sind die technischen Alternativen basierend auf ZigBee/CSA, Bluetooth, oder Wi-Fi 4 im Verbrauchermarkt sehr weit verbreitet. Daher ist es für eine Empfehlung zur Nutzung von Wi-Fi HaLow in den Infrastruktur Varianten zu früh. Je nach Entwicklung der Märkte und in der Wi-Fi Alliance (dem Konsortium, dass die Roadmap von Wi-Fi bestimmt), kann es aber weiterhin interessant sein, neben ZigBee/CSA auch Wi-Fi HaLow zu beobachten. Es ist nicht auszuschliessen, dass HaLow in Zukunft in Wi-Fi Chipsätzen integriert wird, da eine solche Integration bei der Chip-Herstellung technisch leicht realisierbar ist.

5.5 Passive Optische Netze, PON (These C)

PON-basierte Netze sind, wie bereits beschrieben, keine drahtlosen, sondern leitungsgebundene Netze. Aufgrund ihrer vorteilhaften mechanischen Eigenschaften (Biegeradius) werden in Gebäuden günstige Polymerfaser- statt Glasfaserleitungen verwendet. PON unterstützt hohe Datenraten im Bereich von Terabit pro Sekunde. Daher, aufgrund ihrer langen Lebensdauer, und wegen des geringen CO₂-Fussabdrucks wird diese Lösung als wesentlicher Bestandteil beider Varianten der Kommunikations-Infrastruktur empfohlen (siehe Kapitel 1).

5.6 Li-Fi Visible Light Communication

Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Nutzung von Beleuchtungseinrichtungen für die drahtlose Kommunikation: Dies ist eine inzwischen unter dem Namen «Li-Fi» in der Wi-Fi Community standardisierte Technik. Li-Fi wird auch, da sichtbares Licht als Träger verwendet wird, als Visible Light Communications (VLC) bezeichnet. Die ETH Zürich hat während der letzten Jahre mit Forschungsbeiträgen zu VLC massgebend beigetragen und geholfen, VLC in der Wi-Fi Standardisierung zu etablieren. Die Datenmodulation bei VLC erfolgt durch äusserst schnelle Lichtmuster, die von den menschlichen Augen unerkant bleiben (sogenannte steganografische, also versteckte Kommunikation).

Die besonderen Vorteile von VLC liegen neben der Energieeffizienz und dem verhältnismässig geringen CO₂-Fussabdruck (1) in einer sehr hohen möglichen Übertragungsrate (Gb/s) im Spektrum des sichtbaren Lichts, und (2) der einfachen Möglichkeit der Abschirmung gegen

Lauschangriffe. Allerdings sind in heutigen Notebooks und Smartphones keine Li-Fi Transceiver eingebaut. Die in Smartphones und Notebooks eingebauten Kameras sind zwar theoretisch geeignet, Daten zu empfangen, erreichen aber nicht die geforderten Datenraten. Es bleibt also abzuwarten, ob sich diese vielversprechende Technologie im Verbrauchermarkt und der Unterhaltungselektronik durchsetzen wird.

Die offensichtlichen Vorteile von VLC und die Tatsache, dass die Standardisierung von Li-Fi erst kürzlich abgeschlossen wurde, sind der Grund, zu empfehlen, dass diese Technologie weiter beobachtet wird und gegebenenfalls die Kommunikations-Infrastruktur für eine Li-Fi Nutzung ausgelegt werden sollte. Li-Fi ist Teil der Variante «UMFASSEND», siehe Kapitel 7.3.

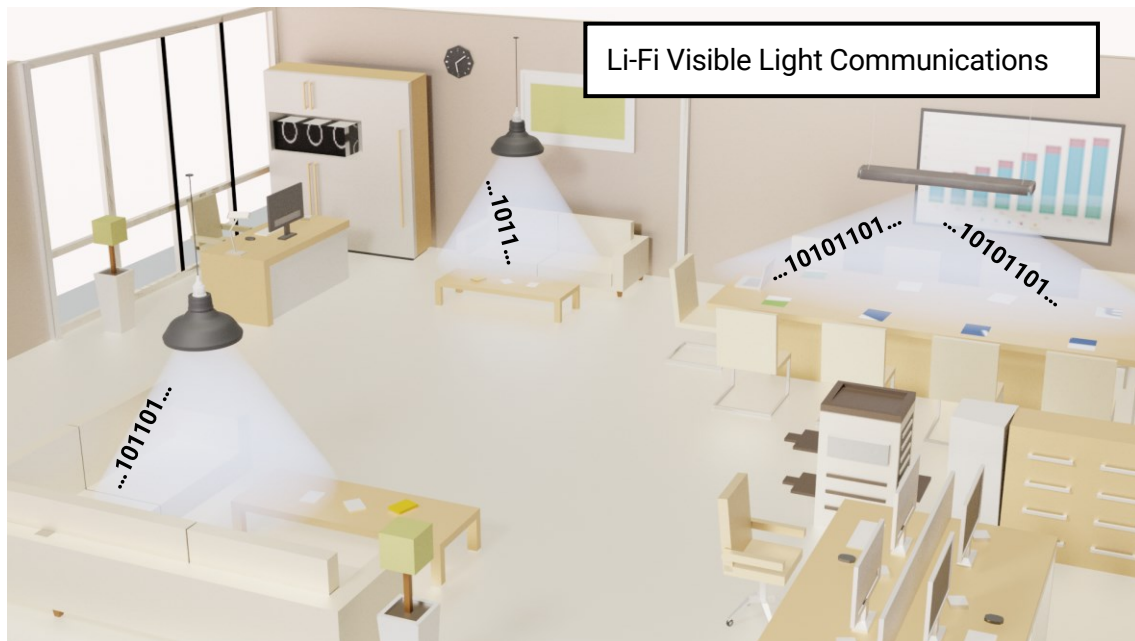


Abbildung 9: Li-Fi Visible Light Communications. Li-Fi Systeme nutzen die in Gebäuden vorhandenen Beleuchtungssysteme für die drahtlose Kommunikation aus. Dies kann, sofern Endgeräte mit optischen Transceivern ausgestattet sein sollten (was bisher für Mobiltelefone und Notebooks nicht der Fall ist), einen Beitrag ökologischen Nachhaltigkeit leisten. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese vielversprechende Technologie im Konsumentenbereich durchsetzen wird.

5.7 Polycom (These F)

Die Nutzung von Polycom (Tetrapol) kann eine mögliche Lösung für Rufsysteme oder andere hochverfügbare und ausfallsichere Notfallsysteme sein. Dies ist eine durchaus zu empfehlende Variante. Allerdings sollten dedizierte Kommunikations-Infrastrukturen für Notfallsysteme und vergleichbare kritische Anwendungen nur speziell in Gebäuden der Blaulichtorganisationen und Hospitälern benötigt sein. Diese Spezialfälle sind im Referenz-Szenarium dieser Studie nicht abgebildet. Konzepte basierend auf Tetrapol Systemen sind sicher eine valide Option, um diese zu realisieren, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass dies erhebliche Investitionskosten verlange.

In dieser Arbeit wird Polycom nicht weiterverfolgt und später in den Varianten für die Kommunikations-Infrastruktur nicht berücksichtigt. Sollte Bedarf an Polycom Lösungen in einem Gebäude bestehen, wird dies durch die anderen hier diskutierten Technologien (Wi-Fi, 5G, optisch) nicht verunmöglicht, da es sich bei den empfohlenen Lösungen ausschliesslich um standardisierte Systeme mit entsprechenden komplementären Funkspektren handelt.

5.8 Besondere Anforderungen

5.8.1 Sicherheitsaspekte, Ausfallsicherheit und Redundanz

Die typischen und dem Stand der Technik entsprechenden Anforderungen an die IT-Sicherheit gelten auch für die Zugangsnetze und die Kommunikations-Infrastruktur. Sie umfassen zum Beispiel eine Firewall-Konfigurationen, ein System zur Erkennung von Missbrauch, die üblichen Verschlüsselungen, und eine sichere Zugriffskontrolle auf Netze und Ressourcen.

Werkzeuge zum automatisierten Monitoring helfen, die Leistung und den Zustand eines Netzes und der Komponenten zu überwachen. Für Ausfälle, Störungen und unklare Situationen werden vordefinierte Prozesse benötigt, um angemessen reagieren zu können. Sofern eine Hochverfügbarkeit der Dienste erforderlich sein sollte, sind zusätzliche Redundanzmechanismen (Hybrid-Netzwerklösungen, Failover-Systeme, Lastenausgleich) gerechtfertigt, da sie gegebenenfalls helfen, Ausfälle zu vermeiden oder Ausfallzeiten zu minimieren. Die Verfügbarkeit der Kommunikations-Infrastruktur ist insbesondere kritisch, wenn die Nutzung von Cloud-Diensten berücksichtigt werden muss, was in den hier angenommen Szenarien der Fall ist. Es versteht sich von selber, dass auch sichergestellt sein sollte, dass das Zugangsnetz den geltenden Datenschutzbestimmungen und Branchenstandards entspricht. Um die Einhaltung der Compliance sicherzustellen, werden üblicherweise Audits durchgeführt.

5.8.2 Energiebedarf und ökologische Nachhaltigkeit

Die Dekarbonisierung beabsichtigt die Vermeidung des Treibhausgasausstosses in die Atmosphäre mit dem Ziel, der Erderwärmung und dem Klimawandel entgegenzuwirken. Für Bauvorhaben in der Schweiz ist unter Anderem der bekannte Minergie-Standard massgebend. Einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und damit zur ökologischen Nachhaltigkeit kann auch durch die Wahl der Kommunikations-Infrastruktur geliefert werden. So sind zum Beispiel passive optische Netze hierfür optimal geeignet. Diese Netze sind, wie bereits oben beschrieben, leitungsgebundene Polymerfaser-Netze, die, einmal ausgelegt, faktisch unbegrenzte Kommunikationskapazitäten (Terabit pro Sekunde) und Lebensdauern bieten, und weitestgehend ohne Energiezufuhr auskommen, da vielfach auf aktive Komponenten verzichtet werden kann.

Lichtbasierte Li-Fi Systeme (Visible Light Communication, VLC) nutzen die Beleuchtungssysteme der Gebäude für die drahtlose Datenkommunikation. Im besten Fall kann damit auf Funksender wie Wi-Fi oder zelluläres 5G komplett verzichtet werden. Li-Fi hat somit das Potenzial, die Kommunikations-Infrastruktur zu vereinfachen und implizit zu einer ökologischen Nachhaltigkeit beizutragen.

Das bereits im vorigen Abschnitt empfohlene Netzwerk-Monitoring sollte zusätzlich auch zur Bestimmung von Parametern eines ökologischen Lifecycle Assessments verwendet werden: Eine kontinuierliche Messung und Auswertung der Datenmenge in Bit pro Sekunde und Hertz und dem Energiebedarf der Netzkomponenten pro Datenmenge in Joule pro Bit pro Sekunde beim Senden und Empfangen sind Beispiele dafür. Mit der Messung solcher Parameter wird der Energiebedarf von Netzkomponenten einschätzbar, und die Infrastruktur kann dementsprechend optimiert werden.

Passive optische Netze, Li-Fi und ein kontinuierliches Lifecycle Assessment haben das Potenzial die Umweltbilanz von Lösungen positiv zu prägen.

6 Zentrales Login

In öffentlichen Verwaltungsgebäuden sind für den erfolgreichen Einsatz einer Kommunikations-Infrastruktur eine Vielzahl von Prozessen und IT-Systemen nötig, und zwar unabhängig von der gewählten Lösung zur drahtlosen Kommunikation. So sind zum Beispiel neben der in diesem Kapitel beschriebenen Login-Thematik das Verwalten von Nutzern und Geräten, der Betrieb und die Bewirtschaftung der Netzkomponenten, die Vermeidung von Störungen und Angriffen, und das Ermöglichen von Überwachungsmaßnahmen zu beachten.

Der Zugriff auf die Ressourcen der Versorgungsnetze wird wie in vielen Fällen üblich über ein kontrolliertes Verfahren vergeben werden müssen (zentrales Login). So muss zum Beispiel ein nicht autorisierter Zugriff auf die Netze und Dienste der Verwaltung unterbunden und nur verifizierten Geräten ein Zugriff ermöglicht werden.

Es besteht Interesse, bereits erfolgreich verifizierten Geräten und Nutzern nicht nur einmalig innerhalb eines Verwaltungsgebäudes, sondern auch in der Folge ausserhalb, im Home-office, oder an weiteren Standorten der Verwaltung, die gleichen Rechte und Rollen zu gewähren (Handover). Lösungen hierfür können mit Hilfe von bekannten Authentifizierungsverfahren realisiert werden. Im Folgenden sind diese zusammengefasst.

6.1 Zugriffskontrolle

Für einen kontrollierten Zugriff auf Ressourcen existieren in der Netzwerktechnik bereits eine Vielzahl von Lösungen, die mittels der drei folgenden Kategorien charakterisiert sind: (1) Attribut-basiert (Attribute-Based Access Control, ABAC), (2) Beziehungs-basiert (Relationship-based Access Control, ReBAC), und (3) Rollen-basiert (Role-based Access Control, RBAC).

Die Wahl zwischen diesen drei Lösungen ABAC, ReBAC oder RBAC hängt von den Anforderungen und der Komplexität der Zugriffskontrolle ab. Es werden in der Praxis oft auch mehrere Lösungen gewählt, um deren Vorteile zu kombinieren.

ABAC ermöglicht einen Zugriff basierend auf einer Vielzahl von Attributen, wie zum Beispiel Geräte- oder Benutzermerkmalen, oder Umgebungsbedingungen. ABAC Lösungen gelten als komplex und ressourcenintensiv.

ReBAC berücksichtigt Beziehungen zwischen Benutzern und Ressourcen, was in komplexen Organisationsstrukturen nützlich ist. Es erlaubt, dass Zugriffsregeln aufgrund von Beziehungen angepasst werden. Allerdings kann das Evaluieren von Beziehungen rechenintensiv sein, und die Implementierung und Administration sind anspruchsvoll.

RBAC autorisiert basierend auf Rollen und ist vergleichsweise einfach zu implementieren und zu verwenden. RBAC ist skalierbar und gut für grosse Organisationen geeignet. Es ist allerdings weniger flexibel als ReBAC oder ABAC, da es auf vordefinierten Rollen basiert und nicht die Feingranularität bietet, die für bestimmte Anwendungsfälle erforderlich sein können. Rollen und Berechtigungen («Besitzer», «Administrator», «Gast», «Leser», usw.) ändern sich nicht dynamisch, was im Vergleich zu ABAC und ReBAC weniger anpassungsfähig ist.

Alle drei Kategorien können in öffentlichen Verwaltungsgebäuden der Schweiz relevant sein, und mit den im Folgenden beschriebenen Verfahren realisiert werden.

6.2 Authentifizierung, Autorisierung, Buchführung (AAA)

Mit Authentifizierung wird das Überprüfen von Identitäten bezeichnet. Ein Authentifizierungsprozess beginnt typischerweise, wenn ein Gerät versucht, sich an einem Netzwerk oder für einen Dienst anzumelden. Die Anmeldeparameter werden dabei von einer zentralen Instanz im Netz mittels Datenbanken oder Verzeichnisdienste (Beispiel: Lightweight Directory Access Protocol, LDAP und Active Directory) geprüft. Sofern die Anmeldeinformationen gültig sein sollten, kann die zentrale Instanz Information zur Autorisierung und Freischaltung des Geräts zurücksenden. Diese Information enthält Zugriffsberechtigungen für Netzwerkdienste oder Informationen darüber, welche Ressourcen genutzt werden dürfen. Die zentrale Instanz kann auch Buchführungsinformationen erfassen und speichern, die später für Abrechnungszwecke verwendet werden (Buchführung = engl. Accounting), so zum Beispiel Dauer und Art der Verbindung, genutzte Dienste oder Datenmengen.

Die RADIUS-Authentifizierung (Remote Authentication Dial-In User Service) ist die bekannteste AAA Lösung [44]. RADIUS wird bereits seit Jahren in kommerziellen Netzen verwendet. Das RADIUS-Protokoll realisiert die Verwaltung von Nutzer-Anmeldeinformationen, die Integration mit Verzeichnisdiensten und die sichere Übertragung von Anmeldeinformationen. Der Authentifizierungsprozess beginnt, wenn ein Gerät versucht, sich in ein Netzwerk oder einen Dienst einzuloggen. Der RADIUS Client (zum Beispiel ein Wi-Fi Access Point) leitet die Anmelde-Parameter an den RADIUS Server weiter. Der Server ist für die Überprüfung dieser Parameter mittels lokaler Datenbanken oder mittels Verzeichnisdienste wie LDAP oder Active Directory verantwortlich. Eine zusätzliche Mehr-Faktor-Authentifizierung (MFA) kann in dieser Phase verwendet werden. MFA ist ein Sicherheitsverfahren, bei dem ein Nutzer zwei oder mehrere verschiedene und voneinander unabhängige Authentifizierungsparameter bereitstellt. Sollten die Anmeldeinformationen gültig sein, sendet der RADIUS Server eine Bestätigungsnachricht an den RADIUS Client, welcher im Anschluss dem Gerät Zugriff auf die gewünschten Dienste oder Ressourcen gewährt.

Eine Alternative zu RADIUS ist dessen Erweiterung DIAMETER, das erweiterte Sicherheitsfunktionen und Flexibilität bereitstellt, aber nach den gleichen Prinzipien arbeitet [45].

RADIUS wird in verschiedenen Szenarien eingesetzt: So nutzt zum Beispiel die privatrechtliche Stiftung SWITCH als Betreiberin des Netzes für Bildungs- und Forschungseinrichtungen in der Schweiz auch die RADIUS Authentifizierung. Zusammen mit weiteren internationalen Institutionen nutzt SWITCH dieses, um Studierenden und Hochschulangehörigen in der Schweiz und im Ausland den Zugang zu Bildungseinrichtungen zu gewähren.

Zur Veranschaulichung sind die AAA Begriffe hier nochmals mit Beispielen versehen:

- Authentisierung: Identität angeben («Mein Name lautet ..., und hier ist mein Identitätsnachweis ... »)
- Authentifizierung: Identität prüfen und verifizieren («Ihr Nachweis ist in gültig und Ihre Identität bestätigt ... »)
- Autorisierung: Zugang ermögliche («... Sie dürfen also passieren ... »)
- Accounting (Buchführung): Zugang messen, Kosten berechnen (« ... die Nutzung wird mit ... in Rechnung gestellt ... ->»)

6.3 Wireless Network Security

6.3.1 IEEE 802.1X

Der IEEE 802.1X-Standard [36] ermöglicht eine portbasierte Zugriffskontrolle, die für Festnetzverbindungen verwendet wird. IEEE 802.1x wurde für leitungsgebundene Ethernet-Netze entwickelt und für die Verwendung in drahtlosen Netzen angepasst. Ein Port ist dabei der physische Anschluss einer Leitung innerhalb der Infrastruktur. IEEE 802.1X nutzt also die physischen Eigenschaften der Infrastruktur, um Geräte zu authentifizieren, die an einen Port angeschlossen sind. Der Zugriff auf den Port wird verweigert, falls der Authentifizierungsprozess fehlgeschlagen sein sollte.

6.3.2 Wi-Fi Protected Access 2 Enterprise

Das als «Wi-Fi Protected Access 2 Enterprise» bezeichnete Verfahren ist eine Variante des Verschlüsselungs- und Sicherheitsprotokolls Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2) für drahtlose Netze [02]. WPA2 Enterprise wird häufig in Unternehmen, in denen erhöhte Sicherheit erforderlich ist, eingesetzt und ist somit also auch eine mögliche Lösung für öffentliche Verwaltungsgebäude. WPA2 Enterprise nutzt eine zentrale Authentifizierung mittels RADIUS Server. Ein von allen Nutzern verwendeter gemeinsamer Pre-Shared Key (PSK) wird nicht verwendet. Nutzer werden stattdessen mit individuellen Anmeldeinformationen (typischerweise Benutzername und Passwort, mit oder ohne MFA) authentifiziert. Oft werden auch digitale Zertifikate, die auf dem Gerät provisioniert sind, zur Authentifizierung verwendet.

6.3.3 5G Subscriber Identity Module (SIM)

5G Geräte werden mittels eingebetteter eSIM oder SIM-Karte authentifiziert. Die SIM wird vor Benutzung provisioniert, indem Profildaten und Authentifizierungsschlüssel in die SIM geladen werden. Ein Mobilfunkgerät sendet dann während des Authentifizierungsprozesses die zuvor von der SIM gelesenen Profildaten an einen Authentifizierungs-Server im Netz. Die entsprechenden Server überprüfen die übermittelten Daten und authentifizieren das Gerät. Bei korrekten Daten erfolgt die Freischaltung. SIM-basierte Lösungen werden in Mobiltelefonen, Tablets und Smart Watches verwendet. Auch moderne Notebooks können mit einer eSIM Lösung bestückt werden.

6.4 Einschätzung

Ein zentraler Authentifizierungs-Server (RADIUS) hat sich in der Vergangenheit als sichere und einfache Lösung bewährt. Die Verwendung von MFA (mittels Smartphones, biometrischer Sensoren, oder zertifizierter Zusatzgeräte) gilt heutzutage als eine wichtige Massnahme, um Missbrauch zu unterbinden. Die RADIUS Zugriffskontrolle kann beispielsweise für beziehungsbasierte individuelle Authentifizierung (ReBAC) oder einfache rollenbasierte Authentifizierung (RBAC) realisieren.

Sofern innerhalb der Verwaltungsgebäude das Ausrollen von zellularen 5G-Netzen mit Infrastruktur und Netzkomponenten gewünscht sein sollte, oder falls eine redundante Authentifizierung benötigt sein sollte, wäre die aus dem Mobilfunk bekannte SIM/eSIM-basierte Lösung zur Authentifizierung eine zusätzliche Lösung.

Es bleibt zu bemerken, dass die hier beschriebenen Konzepte zur Authentifizierung den Zugriff auf Kommunikationsdienste, nicht aber Server oder Daten ermöglichen müssen.

7 Fazit: Drahtlose Kommunikations-Infrastruktur 2030

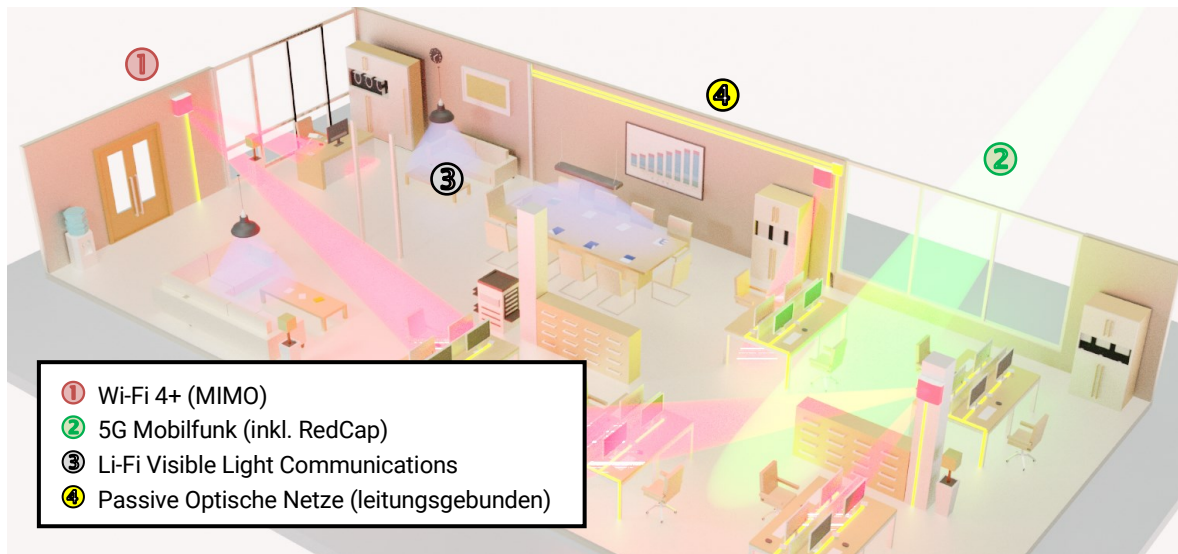


Abbildung 10: Drahtlose Kommunikations-Infrastruktur 2030. Dargestellt sind die Konzepte basierend auf Wi-Fi, 5G, Li-Fi und PON, die in verschiedenen Zusammenstellungen für die Nutzung in öffentlichen Verwaltungsgebäuden der Schweiz empfohlen werden.

Abbildung 10 stellt die empfohlenen Lösungen für die drahtlose Kommunikations-Infrastruktur konzeptionell dar. Dargestellt sind die Konzepte basierend auf Wi-Fi, 5G, Li-Fi und PON, die in verschiedenen Zusammenstellungen empfohlen werden.

Sollte zukünftig einheitlich auf eine einzige drahtlose Kommunikationstechnologie gesetzt werden müssen, ist die Wi-Fi Technologie die effizienteste und flexibelste Lösung. Zwingende Gründe für das gleichzeitige Ausrollen einer weiteren drahtlosen Infrastruktur basierend auf 5G sind für die hier verwendeten Referenzszenarien mit ihren Dienste-Anforderungen nicht identifiziert worden.

Im Folgenden werden die Kernaussagen des Projekts zusammengefasst (Kapitel 7.1) und zwei Varianten für eine Kommunikations-Infrastruktur vorgeschlagen («STANDARD» in Kapitel 7.2 und «UMFASSEND» in Kapitel 7.3).

7.1 Kernaussagen

1. Die Gebäude sollten dem Stand der Technik entsprechend mit Wi-Fi versorgt werden.
2. Indoor 5G wird nur bei hohen Anforderungen an Dienstgüte und Verfügbarkeit empfohlen, oder wenn eine sichere 5G Funkfeldabdeckung gewünscht sein sollte.
3. Eine leitungsgebundene Vernetzung mit passiven optischen Netzen wird empfohlen.
4. Li-Fi wird (sofern kommerziell verfügbar) auf Grund der hohen Datenraten und der potenziell guten Umweltbilanz als zusätzliche Lösung empfohlen, kann aber Wi-Fi nicht ersetzen.
5. Die RADIUS Authentifizierungsmethode ist eine bereits vielfach bewährte Lösung und wird daher auch hier empfohlen.

6. Polycom wird zur Realisierung von Rufsystemen nicht empfohlen, eine spätere Aus-rüstung wird aber durch die gewählten Lösungen nicht verhindert.
7. Passive optische Netze, Li-Fi und ein kontinuierliches Lifecycle Assessment haben das Potenzial die Umweltbilanz von Lösungen positiv zu prägen.
8. Zur Unterstützung von IoT Anwendungen ist das zukünftige 5G RedCap eine interes-sante zellulare Option. Für IoT und für Anwendungen der Gebäudeautomatisierung ist es interessant, ZigBee/CSA und Wi-Fi HaLow zu beobachten.

In den folgenden Abschnitten sind die beiden Varianten «STANDARD» und «UMFASSEND» für eine allgemein gültige Infrastruktur vorgeschlagen.

7.2 Infrastruktur-Variante «STANDARD»

Für weniger komplexe, kleinere Gebäude, die keine zentral koordinierte Gebäudeautomatisie-rung benötigen können die Dienste mittels einfacher Wi-Fi Systeme unterstützt werden. Da-bei ist eine leitungsgebundene Vernetzung mittels PON empfohlen.

Neben den nötigen IT- und Authentifizierungssysteme ist der Einsatz eines kontinuierlichen ökologischen Lifecycle Assessments empfohlen (Zentrale RADIUS Authentifizierung, Life-cycle Monitoring).

Die Tabelle 8 fasst die Variante «STANDARD» zusammen.

Variante «STANDARD»	Auswahlhilfen
① Wi-Fi 4+ (MIMO)	1. Kostendruck bei der Realisierung und im späteren Betrieb 2. Einfache Dienste ohne Dienstgütegarantie (Internet) 3. Eher kleinere Zahl von Arbeitsplätzen (< 100)
② -	
③ -	
④ Passive Optische Netze (Leitung)	
Zentrale RADIUS Authentifizie-rung, Lifecycle Monitoring	

Tabelle 8: Infrastruktur-Variante «STANDARD» und Auswahlhilfen.

7.3 Infrastruktur-Variante «UMFASSEND»

Tabelle 9 fasst die Variante «UMFASSEND» zusammen.

Für grössere Gebäude mit zum Beispiel mehr als einhundert Arbeitsplätzen sind aufwändi-gere Konzepte empfohlen. Zur Unterstützung von IoT Anwendungen und der Gebäudeauto-matisierung mit Hilfe zellulärer Funksysteme von aussen ist das zukünftige 5G RedCap eine interessante Option.

Indoor 5G wird nur bei hohen Anforderungen an Dienstgüte, Redundanz und Verfügbarkeit empfohlen, oder wenn eine sichere 5G Funkfeldabdeckung innerhalb des gesamten Gebäu-des gewünscht sein sollte. Grundsätzlich können die Dienste in den Verwaltungsgebäuden (auch Rufsysteme) mit Wi-Fi Systemen flächendeckend realisiert werden.

Es ist auch hier eine leitungsgebundene Vernetzung mit PON empfohlen. Wie zuvor ist auch bei der ersten Variante «STANDARD» ist der Einsatz eines ökologischen Lifecycle Assessments empfohlen.

Variante «UMFASSEND»	Auswahlhilfen
① Wi-Fi 4+ (MIMO)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verwaltungsgebäude mit hohem Automatisierungsgrad 2. Grössere Anzahl von Arbeitsplätzen (> 100) 3. Neue Bauvorhaben, Minergie-P Gebäudehülle 4. Flexible und über die Zeit ändernde Nutzung 5. Drittnutzung und Gewerbeflächen mit Laufkundschaft 6. Öffentlich zugängliche Bauten 7. Rufsysteme (Blaulichtorganisationen, Krankenhäuser)
② 5G Mobilfunk (inkl. RedCap IoT)	
③ Li-Fi Visible Light Communications	
④ Passive Optische Netze (Leitung)	
Zentrale RADIUS Authentifizierung, Lifecycle Monitoring	

Tabelle 9: Infrastruktur-Variante «UMFASSEND» und Auswahlhilfen.

8 Handlungsempfehlung

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie bewertet in den Kapiteln 1-4 Standards der drahtlosen Kommunikation für eine langfristige Anwendung in öffentlichen Verwaltungsgebäuden. Berücksichtigt werden dabei Kommunikationsstandards von im Markt etablierten Lösungen. Ein Referenz-Szenarium wird verwendet, um Kommunikationsdienste zusammen mit ihren Dienstgüte-Anforderungen zu identifizieren. Die Lösungen werden verglichen und bezüglich ihrer Anwendbarkeit in Gebäuden der öffentlichen Verwaltung bewertet. Die Kapitel 5, 6 und 7 liefern die Kernaussagen und daraus resultierende Empfehlungen. Es werden zwei Infrastruktur-Varianten vorgeschlagen. Dieser Vorschlag einer "Drahtlose Kommunikationsinfrastruktur 2030" soll helfen, eine dem Stand der Technik entsprechenden Infrastruktur in standardisierter Form realisieren zu können. Die vorgeschlagene Lösung hat das Potenzial ökonomisch und ökologisch nachhaltig zu sein, und sie kann an die über die Zeit ändernden Bedürfnisse der öffentlichen Verwaltung angepasst werden.

8.2 Empfehlungen für ein weiteres Vorgehen

Im Anschluss an diese Studie stellt sich die Frage nach dem weiteren Vorgehen und einer möglichen Umsetzung. Mögliche Arbeiten sollten in Abstimmung mit der Strategie "Digitale Verwaltung Schweiz 2024–2027" [24] und dem darin enthaltenen Umsetzungsplan durchgeführt werden. Beispiele dafür sind im Folgenden aufgelistet.

8.2.1 Proof of Concepts und Leistungsbewertung durch Messung

Die in dieser Studie vorgeschlagenen Lösungen lassen sich sehr gut durch Prototypen überprüfen. Daher bietet es sich im Sinne eines Knowhow-Transfers an, einige der Konzepte prototypisch umzusetzen und Demonstratoren zu erstellen. Ein oder mehrere Verwaltungsgebäude können beispielhaft mit den oben beschriebenen Varianten der Kommunikations-Infrastruktur ausgestattet werden. Open-Source Last Generatoren und Monitoring Werkzeuge ermöglichen dabei eine technische Leistungsbewertung mit Hilfe von Messkampagnen. Die Eignung der Lösungen und allfällige Investitions- und Betriebskosten können anhand der Prototypen analysiert werden. Zum Beispiel können (1) die Leistungsfähigkeit von PON, (2) Wi-Fi 4 für Rufsysteme und IoT, und (3) der Nutzen von VLC Li-Fi demonstriert werden. Die beispielhaft realisierten Konzepte werden geteilt, und eine Weiterentwicklung durch interessierte Parteien wird ermöglicht.

8.2.2 Dialog mit Lieferanten

Die hier beschriebenen Lösungen sind technischer Natur und ihre Auswahl an unterschiedlichen Bedürfnissen ausgerichtet. Komplexität, sowie Investitions- und Betriebskosten spielen zudem eine grosse Rolle. Es kann daher hilfreich sein, in einem nächsten Schritt den Dialog mit Lieferanten zu suchen. Mit Hilfe der dann verfügbaren Prototypen wäre ein kritisches Feedback von Anbietern aus der Mobilfunk- und IT Branche hilfreich, um die Aussagen zu schärfen und relevante Themen (Lieferkette, Standards, Good Practices) zu überprüfen. So

kann ein Ausblick auf die zukünftigen Bedürfnisse der digitalen Verwaltung gegeben und im Dialog mit Lieferanten die Machbarkeit verschiedener Konzepte ermittelt werden.

8.2.3 Kommunikation, Webinar, Demonstration

Auf Fachkonferenzen kann mit Hilfe der Prototypen interessierten Personen, möglichen Umsetzungspartnern und der Schweizer Bevölkerung ein Einblick in die Konzepte, ihr Potenzial und die Empfehlungen für zukünftige Vorhaben gegeben werden. Ein Webinar kann helfen, dokumentierte Good Practices und die Erkenntnisse der Proof of Concepts zu kommunizieren. Auch ein Fachartikel in einer wissenschaftlichen Zeitschrift hilft, Aufmerksamkeit zu generieren und Kommentare von Experten zu erhalten.

8.2.4 Standardisierung von Lösungen

Letztlich können die Lösungen zusammen mit den Erkenntnissen der Leistungsbewertung in einer standardisierten Form dokumentiert werden. Die Nutzung des Building Information Modeling (BIM) oder ähnlicher digitaler Beschreibungssprachen sollte geprüft werden.

Anhang

A Abkürzungen

3GPP	3rd Generation Partnership Project	Mb/s	Megabit pro Sekunde
5G	Mobilfunk 5. Generation	MB/s	Megabyte pro Sekunde
6G	Mobilfunk 6. Generation	LoRAWAN	LoRa Wide Area Network
802.11	IEEE Standard von Wi-Fi	LTE	Long Term Evolution
AAA	Authentication, Authorization, Accounting	LTE-M	LTE Machine Type Communication
ABAC	Attribute-Based Access Control	MFA	Multi-Factor Authentication (Mehrfaktor Authentifizierung)
AI	Artificial Intelligence	MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
AP	Arbeitsplatz	mMTC	massive Machine Type Communications
BACNet	Building Automation and Control Network	MU-MIMO	Multi-User MIMO
BYOD	Bring Your Own Device	NB-IoT	Narrow Band IoT
CSA	Connectivity Standards Alliance	NFV	Network Function Virtualization
DIAMETER	(extension of RADIUS)	NR	New Radio
DVS	Digitale Verwaltung Schweiz	NR-U	New Radio Unlicensed
eMBB	enhanced Mobile Broadband	OAuth	Open Authentication
eSIM	embedded SIM	PoE	Power over Ethernet
FH	Frequency Hopping	POL	Passive Optical LAN
FTTH	Fiber to the Home	PON	Passive Optical Network
Gb/s	Gigabit pro Sekunde	PSK	Pre-Shared Key
GSM	Global System for Mobile Communications	PSTN	Public Switched Telephone Network
IAB	Integrated Access and Backhaul	RADIUS	Remote Authentication Dial-In User
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	RBAC	Role-based Access Control
IIoT	Industrial Internet of Things	ReBAC	Relationship-based Access Control
IMT	International Mobile Telecommunications	RedCap	Reduced Capability
IoT	Internet of Things	SDN	Software Defined Networking
IP	Internet Protocol	SIM	Subscriber Identity Module
ISDN	Integriertes Sprach- und Datennetz	SNIR	Signal-to-Noise plus Interference Ratio
IT	Informationstechnologie	SNR	Signal-to-Noise Ratio
ITU	International Telecommunication Union	TCO	Total Cost of Ownership
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	TSN	Time Sensitive Networking
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren	UE	User Equipment
KI	Künstliche Intelligenz, engl. AI	UKV	Universelle Kommunikationsverkabelung
LAN	Local Area Network	URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
LCA	Life Cycle Assessment	V2X	Vehicle to Anything
LDAP	Lightweight Directory Access Protocol	VLC	Visible Light Communication
Li-Fi	Light Fidelity (IEEE 802.11 VLC)	WAN	Wide Area Networking
LoRa	Long Range	Wi-Fi	Wireless Fidelity
		WLAN	Wireless LAN
		WPA2	Wi-Fi Protected Access 2

B Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Referenzgebäude und -raum. Dieses fiktive Gebäude hat drei Stockwerke mit jeweils acht Räumen. In jedem Raum befinden sich eine Anzahl von Standard-Arbeitsplätzen mit Teilnehmeranschlüssen und einem Kollaborationsbereich. Das Gebäude wird mit redundanter Glasfaser, Richtfunk, oder Mobilfunk versorgt.....	8
Abbildung 2: Wi-Fi 4 Versorgung mit mehreren Access Points im Raum. Wi-Fi 4 unterstützt MIMO mit mehreren Antennen, kann also Signale in bestimmte Richtungen fokussieren (Konzeptdarstellung).....	13
Abbildung 3: Wi-Fi 6 / 7 / 8 (Konzeptdarstellung). Im vorderen Raumbereich ist dargestellt, wie zwei Access Points das gleiche Endgerät mittels Multi-User MIMO versorgen.	14
Abbildung 4: Gebäudeversorgung mit zellulärer 4G Basisstation, und Versorgung der Umgebung. Je nach Beschaffenheit der Aussenwände und Fenster ist eine Versorgung der Innenräume nur mit geringer Datenrate zu erreichen.....	15
Abbildung 5: Passive optische Vernetzung mit Lichtwellenleitern und optischen Splitttern (Konzeptdarstellung).....	17
Abbildung 6: Vergleich der Lösungen für Datenverkehr. Kosten, Eignung und Standardisierung haben hohe Priorität. Eine Kombination von PON und Wi-Fi erscheint als vielversprechende Lösung.....	23
Abbildung 7: Vergleich der Lösungen für IoT Automatisierung. Kosten, Eignung und Standardisierung haben hohe Priorität. Die Nutzung von ZigBee, einer Infrastruktur basierend auf Wi-Fi 4, und eventuell eine Nutzung von 3GPP RedCap erscheinen als vielversprechende Lösungen.....	24
Abbildung 8: Vergleich der Lösungen für Rufsysteme. Kosten, Eignung und Standardisierung haben hohe Priorität. DECT, Wi-Fi4, 3GPP RedCap, und Tetrapol/Tetra sind vielversprechende Lösungen. Bei einer Lösung basierend auf Tetrapol/Tetra werden höhere Kosten auf Grund von Lizenzgebühren angenommen.....	25
Abbildung 9: Li-Fi Visible Light Communications. Li-Fi Systeme nutzen die in Gebäuden vorhandenen Beleuchtungssysteme für die drahtlose Kommunikation aus. Dies kann, sofern Endgeräte mit optischen Transceivern ausgestattet sein sollten (was bisher für Mobiltelefone und Notebooks nicht der Fall ist), einen Beitrag ökologischen Nachhaltigkeit leisten. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese vielversprechende Technologie im Konsumentenbereich durchsetzen wird.....	31
Abbildung 10: Drahtlose Kommunikations-Infrastruktur 2030. Dargestellt sind die Konzepte basierend auf Wi-Fi, 5G, Li-Fi und PON, die in verschiedenen Zusammenstellungen für die Nutzung in öffentlichen Verwaltungsgebäuden der Schweiz empfohlen werden.....	37

C Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen zum Referenzmodell.....	7
Tabelle 2: Daten-Dienste und ihre Dienstgüte-Anforderungen pro User / Arbeitsplatz (AP) und Raum. Es wird nicht zwischen Up- und Downlink unterschieden. Es wird angenommen, dass Dienste in ortsfesten Szenarien genutzt werden.....	9
Tabelle 3: IoT Dienste und Dienstgüte-Anforderungen von Sensoren und Aktuatoren in einem Raum. IoT Geräte werden häufig mit langem Betriebszyklus (Duty Cycle) betrieben (periodisches Messen im Minutentakt). Relevant ist daher eher das Bedürfnis nach hoher Verfügbarkeit und weniger der Durchsatz.....	9
Tabelle 4: Rufsystem-Dienste und ihre Dienstgüte-Anforderungen in einem Raum. Rufsysteme sind vor allem in Hospitälern und Pflegeheimen in Betrieb. Die Kommunikation findet nur innerhalb des Gebäudes statt, eine Verbindung an das Weitverkehrsnetz ist nicht nötig. Wichtig sind die Verfügbarkeit und vollständige Funkabdeckung im gesamten Gebäude.....	10
Tabelle 5: Bewertungskriterien und ihre Prioritäten. Für einen Vergleich wird im Folgenden ein Zahlenwert zur Einschätzung und Visualisierung verwendet (siehe Abbildung 6 - Abbildung 8). Dabei bedeutet 10 ≈ Die Lösung hat das Potenzial, das Kriterium zu erfüllen, und 0 ≈ Kriterium wird unter den gegebenen Voraussetzungen nicht erfüllt.....	11
Tabelle 6: Die Release Roadmap des 3GPP Standardisierungs-Gremiums für Mobilfunk, [01], [25], [26], [27]. Die Abkürzungen sind auf Seite 43 definiert.....	15
Tabelle 7: Klassifizierung von 5G Anwendungen, entsprechender Dienstgüte-Anforderungen, und dem Marktpotenzial. Zellulares 5G ist eine Mobilfunk-Technologie und nicht primär für die Versorgung von	

Innenräumen mit ortsfesten Geräten entwickelt worden. Daher liegt der Fokus auf mobilen Anwendungen [33], [34].....	16
Tabelle 8: Infrastruktur-Variante «STANDARD» und Auswahlhilfen.....	38
Tabelle 9: Infrastruktur-Variante «UMFASSEND» und Auswahlhilfen.....	39

D Kostenberechnung - Total Cost of Ownership, TCO

Da eine präzise Kostenberechnung in diesem Projekt nicht durchgeführt wird, sind hier die Grundsätze zusammengefasst. Für Details wird auf [66] verwiesen.

Eine Kostenberechnung ermittelt die Netto-Gesamtkosten (Kosten ohne Steuern oder Abgaben), die während der Lebensdauer einer Kommunikations-Infrastruktur anfallen. Die Kosten beinhalten sowohl direkte Beschaffungskosten als auch (indirekte) Betriebskosten. Entsorgungskosten werden oft in die Beschaffungskosten eingerechnet. Die so ermittelte Total Cost of Ownership (TCO) wird unter Berücksichtigung von Preissteigerung und Diskontierung auf einen Investitionszeitpunkt umgerechnet, da Ausgaben während der Lebensdauer zu unterschiedlichen Zeiten anfallen. Das Verhältnis von Beschaffungskosten zu Betriebskosten wird geringer, je länger die Lebensdauer eines Systems gewählt werden kann [66].

E Umweltbilanz - Life Cycle Assessment, LCA

Wie schon bei der Kostenberechnung ist die präzise Bestimmung der Umweltbilanz in diesem Projekt nicht geplant. Im Folgenden werden daher nur die Grundsätze zusammengefasst.

Eine Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) umfasst eine relativ komplexe und auch fehleranfällige Bewertung der Umweltauswirkungen des gesamten Lebenszyklus eines Produkts, Systems, oder Dienstes (zum Beispiel Gebäude, Kommunikations-Infrastruktur, oder Rechenzentrum). Dabei wird die Herstellung der Systemkomponenten und deren Nutzung einschliesslich Rückbau und/oder Entsorgung berücksichtigt. Die typischen Aspekte einer Lebenszyklusanalyse sind:

- 1. Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport:** Sende- und Empfangsanlagen sind elektronische Geräte, die typischerweise mit Hilfe von Erdöl, Kohle, Kupfer, Eisen und Aluminium hergestellt werden. Lithium, Kobalt, und viele weitere als «seltene Erden» bezeichnete Metallverbindungen werden eingesetzt.
- 2. Nutzung:** Infrastrukturen werden aktiv betrieben, um zum Beispiel drahtlose Netzwerkverbindungen bereitzustellen. Der Energieverbrauch für die Geräte und die Datenübertragung hat grossen Einfluss auf die Umweltbilanz: Bei den nutzungsrelevanten Systemen wie zum Beispiel Funksystemen, welche üblicherweise elektrische Energie konsumieren, entstehen die Umweltwirkungen hauptsächlich durch den Bedarf an elektrischer Energie während Sende- und Empfangszeiten. Die Wirkungen sind dabei unter anderem von der ökologischen Qualität des Stroms (Strommix mit spezifischen Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung) in der Schweiz abhängig.
- 3. Betrieb:** Die Ressourcen, die für die Instandhaltung, Reparatur und Aktualisierung der Geräte benötigt werden, sowie die damit verbundenen Umweltauswirkungen, werden in dieser Bilanz berücksichtigt.

- 4. Rückbau und Entsorgung:** Am Ende ihrer Lebensdauer müssen Funksysteme entsorgt werden. Dies kann die Entsorgung von elektronischem Abfall umfassen, der ordnungsgemäss recycelt oder behandelt werden muss, um negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit zu vermeiden. Die ordnungsgemässe Entsorgung und das Recycling von Geräten kann helfen, den Ressourcenverbrauch zu minimieren.

Das Ziel der Lebenszyklusabschätzung für Gebäude und Funksysteme ist, eine umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen zu erhalten und die Architektur entsprechend zu optimieren. Es sollen gegebenenfalls nachhaltigere Alternativen identifiziert, um den ökologischen Fussabdruck von Systemen zu reduzieren.

Eine Bewertung der Umweltbilanz drahtloser Kommunikationssysteme darf die Energieeffizienz der Kommunikation nicht vernachlässigen. Die Energieeffizienz bezieht sich auf die Menge der Informationsbits, die an einen User übertragen werden, pro Einheit des Energieverbrauchs des Netzes und Geräts (in Bit pro Joule) [43].

ISO 14040 und ISO 14044 sind die zentralen internationalen Standards für eine LCA Durchführung [40], [41], [61]. Sie wurden vom Technical Committee ISO/TC 207, Environmental Management, erarbeitet. ISO 14040 legt Prinzipien und den Rahmen für die LCA fest, und ISO 14044 definiert detaillierte Leitlinien und Anforderungen für jede Phase einer LCA-Studie, einschliesslich Ziel- und Umfangsdefinition, Bestandsaufnahme, Auswirkungsabschätzung und Interpretation der Ergebnisse.

Literatur

Letzter Zugriff aller angegebenen Internetquellen: Oktober 2023.

- [01] 3GPP (2023) **The 3GPP's System of Parallel Releases**. Release Timeline. 3rd Generation Partnership Project. [3gpp.org/specifications-technologies/releases](https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases)
- [02] Adnan A. H. et al. (2015) **A comparative study of WLAN security protocols: WPA, WPA2**, 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh, 2015, pp. 165-169, <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2015.7506822>
- [03] ATIS Next G Alliance (2022) **Roadmap to 6G: Building the Foundation for North American Leadership in 6G and Beyond**. White Paper, ATIS Next G Alliance, Feb 2022. [nextgalliance.org/white_papers/roadmap-to-6g](https://www.nextgalliance.org/white_papers/roadmap-to-6g)
- [04] BAKOM (2012) **Technische Richtlinien betreffend FTTH-Installationen in Gebäuden. Physikalische Medien der Schicht 1, Ausgabe 3.0**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. März 2012. [bakom.admin.ch/dam/bakom/de/dokumente/tc/technische_richtlinienbetreffendftth-installationenin-gebaeudenph.pdf.download.pdf/technische_richtlinienbetreffendftth-installationenin-gebaeudenph.pdf](https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/de/dokumente/tc/technische_richtlinienbetreffendftth-installationenin-gebaeudenph.pdf.download.pdf/technische_richtlinienbetreffendftth-installationenin-gebaeudenph.pdf)
- [05] BAKOM (2015a) **Faktenblatt GSM**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2015. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/gsm.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/gsm.html)
- [06] BAKOM (2015b) **Faktenblatt TETRA**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2015. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/tetra.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/tetra.html)
- [07] BAKOM (2016) **Faktenblatt TETRAPOL**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2016. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/tetrapol.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/tetrapol.html)
- [08] BAKOM (2020) **Faktenblatt 5G**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2020. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/5g.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/5g.html)
- [09] BAKOM (2022) **WLAN / RLAN Geräte und Anlagen**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2022. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/geraete-anlagen/besondere-geraete/wlan-rlan.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/geraete-anlagen/besondere-geraete/wlan-rlan.html)
- [10] BAKOM (2023) **Faktenblatt WLAN**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2023. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/wlan.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/technologie/wlan.html)
- [11] BAKOM (2023) **Nationaler Frequenzzuweisungsplan**. Bundesamt für Kommunikation, Schweizerische Eidgenossenschaft. 2023. [bakom.admin.ch/bakom/de/home/frequenzen-antennen/nationaler-frequenzzuweisungsplan.html](https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/frequenzen-antennen/nationaler-frequenzzuweisungsplan.html)
- [12] Bluetooth SIG (2023) **Bluetooth Core Specification Version 5.4**. Bluetooth Special Interest Group, Feb 2023. [bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-4](https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-4)
- [13] Chen, S. et al. (2020) **Wireless powered IoE for 6G: Massive access meets scalable cell-free massive MIMO**. China Communications, vol. 17, no. 12, pp. 92-109, Dez 2020. doi.org/10.23919/JCC.2020.12.007
- [14] Cisco (2022a) **Cisco Annual Internet Report (2018–2023)**. White Paper. Cisco Systems Inc. [cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html](https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html)
- [15] Cisco (2022b) **Cisco New York PENN1 Look Book - Smart Building Technology and Hybrid Work Solutions**. Cisco Systems Inc. [cisco.com/c/m/en_uk/solutions/hybrid-work/workplace-solutions/penn1-lookbook/the-penn1-story.html](https://www.cisco.com/c/m/en_uk/solutions/hybrid-work/workplace-solutions/penn1-lookbook/the-penn1-story.html)
- [16] CSA (2022) **CSA-IOT Technology and Solutions**. Connectivity Standards Alliance, 2022. [csa-iot.org/all-solutions/](https://www.csa-iot.org/all-solutions/)
- [17] CSA (2023a) **Zigbee Specification, Revision 23**. Connectivity Standards Alliance, März 2023. [csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf](https://www.csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf)
- [18] CSA (2023b) **Matter Specification Version 1.1**. Connectivity Standards Alliance, Mai 2023. [csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/05/22-27349-002_matter-1-1-core-specification.pdf](https://www.csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/05/22-27349-002_matter-1-1-core-specification.pdf)
- [19] CSA (2023c) **Matter Application Cluster Specification Version 1.1**. Connectivity Standards Alliance, Mai 2023. [csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/05/matter-1-1-application-cluster-specification.pdf](https://www.csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/05/matter-1-1-application-cluster-specification.pdf)

- [20] DECT Forum (2023a) **Introduction to DECT-2020 NR (DECT New Radio +, NR+)**. White Paper. dect.org/nrplus
- [21] DECT Forum (2023b) **New 5G standard for professional IoT applications**. White Paper. dect.org/nrplus
- [22] Du, R. et al. (2022) **An Overview on IEEE 802.11bf: WLAN Sensing**. Juli 2022. arxiv.org/pdf/2207.04859.pdf
- [23] DVS (2022) **Kantonale Digitalisierungsstrategien**. Digitale Verwaltung Schweiz. Nov 2022. digitale-verwaltung-schweiz.ch/Kantonale-Digitalisierungsstrategien
- [24] DVS (2023) **Strategie Digitale Verwaltung Schweiz**. Definition von Handlungsfeldern und strategischen Schwerpunkten. Entwurf. https://www.digitale-verwaltung-schweiz.ch/download_file/550/1556
- [25] Ericsson (2020) **Cellular IoT in the 5G era**. White Paper, Feb 2020. Ericsson AB. wcm.ericsson.net/48ff1f/assets/local/reports-papers/white-papers/Cellular_IoT_in_5G_whitepaper_AW.pdf
- [26] Ericsson (2022) **Ericsson Mobility Report**. White Paper, Nov 2022. Ericsson AB. ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report
- [27] Ericsson (2023) **Ericsson Mobility Report update: global 5G subscriptions top one billion**. White Paper Amendment, Nov 2022. Ericsson AB. ericsson.com/en/news/2023/2/emr-february-2023-update
- [28] Europäische Kommission (2022) **Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) Research and Innovation Program**, Horizon Europe Strategic Plan, 2022. smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2022/12/sns_ri_wp_2023-24.pdf
- [29] Felten, B. (2017) **Passive Optical LAN Opens Up Opportunities for B2B Service Providers**. White Paper. Diffraction Analysis, Nov 2017. onestore.nokia.com/asset/201776
- [30] Freeman Z. (2023) **Wi-Fi HaLow and LoRaWAN: How do the technologies compare?** The Beacon, Wi-Fi Alliance, Feb. 2023. wi-fi.org/beacon/y-zachary-freeman/wi-fi-halow-and-lorawan-how-do-the-technologies-compare
- [31] Galati-Giordano, L. et. al. (2023) **What Will Wi-Fi 8 be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability**. doi.org/10.48550/arXiv.2303.10442
- [32] Garcia-Rodriguez, A. et al. (2021) **IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back**. IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 4, pp. 102–108, 2021. doi.org/10.1109/MCOM.001.2000711
- [33] Huawei (2023a) **5G Applications Market Potential & Readiness Matrix**. White Paper. Huawei Technologies Co., Ltd. huawei.com/en/huaweitech/industry-insights/outlook/mobile-broadband/xlabs/insights-whitepapers/5g-applications-market-potential-readiness-matrix
- [34] Huawei (2023b) **5G Unlocks a World of Opportunities - Huawei Industry Insights**. White Paper. Huawei Technologies Co., Ltd. huawei.com/en/huaweitech/industry-insights/outlook/mobile-broadband/insights-reports/5g-unlocks-a-world-of-opportunities
- [35] IEEE (2018) **IEEE 802.11 Launches Standards Amendment Project for Light Communications (LiFi)**. IEEE Project 802 standardization editorial, 2018. standards.ieee.org/beyond-standards/ieee-802-11-launches-standards-amendment-project-for-light-communications-lifi
- [36] IEEE (2020) **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Port-Based Network Access Control," in IEEE Std 802.1X-2020 (Revision of IEEE Std 802.1X-2010 Incorporating IEEE Std 802.1Xbx-2014 and IEEE Std 802.1Xck-2018)**, vol., no., pp.1-289, 28 Feb. 2020, doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9018454
- [37] IEEE (2021a) **IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)**, vol., no., pp.1-7524, Feb 2021. doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9999411
- [38] IEEE (2021b) **IEEE/ISO/IEC International Standard-Telecommunications and exchange between information technology systems – Requirements for local and metropolitan area networks – Part 3: Standard for Ethernet AMENDMENT 9: Physical layer specifications and management parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s passive optical networks. ISO/IEC/IEEE 8802-3:2021/Amd.9:2021(E)**, vol., no., pp.1-270, Dez 2021. doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9650819
- [39] Ikpehai A. et al. (2019) **Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review**. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, pp. 2225-2240, Apr 2019. doi.org/10.1109/JIOT.2018.2883728

-
- [40] ISO (2006a) **ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. International Organization for Standardization ISO, Schweizer Norm SN EN ISO 14040, Ed. 2006. Geneva, Switzerland. [iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en)
- [41] ISO (2006b) **ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. International Organization for Standardization ISO, Schweizer Norm SN EN ISO 14044, Ed. 2006. Geneva, Switzerland. [iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en)
- [42] ITU-R (2014) **Future technology trends of terrestrial IMT systems**. Report ITU-R M.2320-0, Nov 2014. [itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2320-2014-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2320-2014-PDF-E.pdf)
- [43] ITU-R (2015) **IMT-Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**. Recommendation ITU-R M.2083-0, Sep 2015. [itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf)
- [44] Jacquenet, C. et al. (2008a) **The RADIUS Protocol and its Extensions**. Service Automation and Dynamic Provisioning Techniques in IP / MPLS Environments, Wiley, 2008, pp.27-59, <https://doi.org/10.1002/9780470035146.ch3>
- [45] Jacquenet, C. et al. (2008b) **The Diameter Protocol**. Service Automation and Dynamic Provisioning Techniques in IP / MPLS Environments, Wiley, 2008, pp.61-90, <https://doi.org/10.1002/9780470035146.ch4>
- [46] KBOB (2012) **Universelle Kommunikationsverkabelung (UKV)**. Empfehlung der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB). März 2012. [kbob.admin.ch/dam/kbob/de/dokumente/Publikationen/gebraeudetechnik/Universelle Kommunikationsverkabelung \(Maerz 2012\).pdf](https://www.kbob.admin.ch/dam/kbob/de/dokumente/Publikationen/gebraeudetechnik/Universelle%20Kommunikationsverkabelung%20(Maerz%202012).pdf)
- [47] KBOB (2021) **BACnet Anwendung**. Empfehlung der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB). V2.0. Jul 2021. [kbob.admin.ch/dam/kbob/de/dokumente/Publikationen/gebraeudetechnik/Universelle Kommunikationsverkabelung \(Maerz 2012\).pdf](https://www.kbob.admin.ch/dam/kbob/de/dokumente/Publikationen/gebraeudetechnik/Universelle%20Kommunikationsverkabelung%20(Maerz%202012).pdf)
- [48] Keysight (2022) **Boost IoT with 5G NR RedCap: Optimized design meets use case requirements for low cost and power consumption**. Keysight White Paper. [keysight.com/us/en/assets/7122-1119/white-papers/Boost-IoT-with-5G-NR-RedCap.pdf](https://www.keysight.com/us/en/assets/7122-1119/white-papers/Boost-IoT-with-5G-NR-RedCap.pdf)
- [49] Khalifeh, A. et al. (2019) **A Survey of 5G Emerging Wireless Technologies Featuring LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT and LTE-M**. 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 2019, pp. 561-566. doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032817
- [50] Kirkpatrick, K. (2022) **The road to 6G**. Communication of the ACM 65, 9, Sep 2022. doi.org/10.1145/3546959
- [51] Liu, G. et al. (2020) **Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030**. China Communications, vol. 17, no. 9, pp. 92-104, Sep 2020. doi.org/10.23919/JCC.2020.09.008
- [52] Medina-Acosta G. A. et al. (2022) **3GPP Release-17 Physical Layer Enhancements for LTE-M and NB-IoT**. IEEE Communications Standards Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 80-86, Dez 2022. doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100099
- [53] Microsoft (2022) **Digital Transformation in Government**. White Paper. Microsoft Corp. [microsoft.com/de-ch/industry/government](https://www.microsoft.com/de-ch/industry/government)
- [54] Nugehalli P. (2016) **LTE-WLAN aggregation [Industry Perspectives]**. IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 4, pp. 4-6, Aug 2016. doi.org/10.1109/MWC.2016.7553017
- [55] Pachler, N. et al. (2021) **An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband**. 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, pp. 1-7, Juni 2021. <https://doi.org/10.1109/IC-CWorkshops50388.2021.9473799>
- [56] Palattella, M. R. et al. (2016) **Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 3, pp. 510-527, März 2016. doi.org/10.1109/JSAC.2016.2525418
- [57] Rahman I. et al. (2021) **5G evolution toward 5G advanced: An overview of 3GPP releases 17 and 18**. Ericsson Technology Review. Okt 2021. [ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-evolution-toward-5g-advanced](https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-evolution-toward-5g-advanced)
-

- [58] Rahman I. et al. (2022) **5G Advanced: Evolution towards 6G**. Ericsson White Paper, Jun 2022. ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g
- [59] Rathgeb, M. and Mangold, S. (2023) **Wireless-Kommunikationsinfrastruktur der Zukunft, Teil 2: Fahrplan – Ziele – Diskussion**. OneVoice Konferenz, Olten, Schweiz. Digitale Verwaltung Schweiz. Juni 2023. <https://www.digitale-verwaltung-schweiz.ch/onevoice-2023>
- [60] Raza U., Kulkarni P. and Sooriyabandara M. (2017) **Low Power Wide Area Networks: An Overview**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, 2017. doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320
- [61] Ruiz, D. et al. (2022) **Life cycle inventory and carbon footprint assessment of wireless ICT networks for six demographic areas**. Resources, Conservation and Recycling, Volume 176, 2022. doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105951
- [62] Samsung (2022) **6G Spectrum Expanding the Frontier**. White Paper, Samsung Research, May 2022. codeground.org/nsr/downloads/researchareas/2022May_6G_Spectrum.pdf
- [63] Sathya, V. et al. (2022) **A Comparative Measurement Study of Commercial WLAN and 5G LAN Systems**. IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), London, United Kingdom, pp. 1-7, 2022. doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10013019
- [64] Schmid, S. et al. (2013) **LED-to-LED Visible Light Communication Networks**. In Proceedings of the Fourteenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '13). ACM, 1-10. Juli 2013. dx.doi.org/10.1145/2491288.2491293
- [65] Schmid, S. et al. (2015) **Linux Light Bulbs: Enabling Internet Protocol Connectivity for Light Bulb Networks**. Proceedings of the 2nd International Workshop on Visible Light Communications Systems (VLCS '15). ACM, 3-8. März 2015. dx.doi.org/10.1145/2801073.2801074
- [66] Steinemann, M. et al. (2016) **Potenzial einer ökologischen öffentlichen Beschaffung in der Schweiz**. Bundesamt für Umwelt, Schweizerische Eidgenossenschaft. Nov 2016. bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/oekologische-oeffentliche-beschaffung.html
- [67] Unwala, Z. et al. (2018) **IoT Security: ZWave and Thread**. IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Austin, TX, USA, 2018, pp. 176-182. doi.org/10.1109/GreenTech.2018.00040
- [68] Veedu, S.N.K et al. (2023) **RedCap - expanding the 5G device ecosystem for consumers and industries**. Ericsson White Paper, Feb. 2023. ericsson.com/493d70/assets/local/reports-papers/white-papers/redcap-5g-iot-for-wearables-and-industries.pdf
- [69] Wang, Y.-P. E. et al. (2021) **What is reduced capability (RedCap) NR and what will it achieve?** Ericsson Blog, Feb 2021. ericsson.com/en/blog/2021/2/reduced-cap-nr
- [70] Wi-Fi Alliance (2021a) **Wi-Fi CERTIFIED HaLow - Technology Overview**. Technical Report, Wi-Fi Alliance, Nov 2021. 20524844.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/20524844/Wi-Fi_CERTIFIED_HaLow_Technology_Overview_20211102.pdf
- [71] Wi-Fi Alliance (2021b) **Wi-Fi CERTIFIED HaLow - Wi-Fi for IoT applications**. Technical Report, Wi-Fi Alliance, Nov 2021. 20524844.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/20524844/Wi-Fi_CERTIFIED_HaLow_paper_20211102.pdf
- [72] Wi-Fi Alliance (2023) **Generational Wi-Fi User Guide**. Technical Report, Wi-Fi Alliance. Apr 2023. wi-fi.org/download.php?file=/sites/default/files/private/Generational_Wi-Fi_User_Guide_202304.pdf
- [73] Yegin, A. et al. (2020) **TS001-1.0.4 LoRaWAN L2 1.0.4 Specification**. LoRa Alliance Technical Specification, Oct 2020. resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification
- [74] Zheng, Y. et al. (2017) **Low latency passive optical node for optical access network**. 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, China, 2017, pp. 1-2, 2017. doi.org/10.1109/ICOON.2017.8121485
- [75] ZigBee Alliance (2010) **ZigBee RF4CE Specification Version 1.01**. ZigBee Alliance, Jan 2010. csa-iot.org/wp-content/uploads/2022/01/095262r01ZB_zigbee_rf4ce_sc-ZigBee_RF4CE_Specification_public.pdf