



DHBW

Duale Hochschule
Baden-Württemberg
Ravensburg
Campus Friedrichshafen

KONNEKTIVITÄSTECHNOLOGIEN DES DIGITALEN WANDELS

ÜBERSICHT UND ANWENDUNGEN

Herausgeber: Prof. Dr. Heinz-Leo Dudek
DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Konnektivitätstechnologien	4
2.1 Zellularer Mobilfunk	4
2.1.1 Funktionsprinzip	4
2.1.2 Verwendung	7
2.1.3 Kosten	8
2.1.4 Vor- und Nachteile	8
2.2 Narrow Band IoT	9
2.2.1 Funktionsprinzip	9
2.2.2 Verwendung	11
2.2.3 Kosten	11
2.2.4 Vor- und Nachteile	12
2.3 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)	14
2.3.1 Funktionsprinzip	14
2.3.2 Verwendung	17
2.3.3 Kosten	17
2.3.4 Vor- und Nachteile	18
2.4 SigFox	20
2.4.1 Funktionsprinzip	20
2.4.2 Verwendung	23
2.4.3 Kosten	23
2.4.4 Vor- und Nachteile	24
2.5 Bluetooth Low Energy	26

2.5.1	Funktionsprinzip	26
2.5.2	Verwendung	29
2.5.3	Kosten.....	29
2.5.4	Vor- und Nachteile	30
2.6	ZigBee.....	32
2.6.1	Funktionsprinzip	32
2.6.2	Verwendung	34
2.6.3	Kosten.....	34
2.6.4	Vor- und Nachteile	35
2.7	Wireless Local Area Network	36
2.7.1	Funktionsprinzip	36
2.7.2	Verwendung	38
2.7.3	Kosten.....	38
2.7.4	Vor- und Nachteile	39
2.8	Satellitenkommunikation	40
2.8.1	Funktionsprinzip	40
2.8.2	Angebotene Satellitensysteme	41
2.8.3	Zusammenfassung der vorgestellten Satellitenkommunikationsgeräte.....	50
2.8.4	Vor- und Nachteile	54
2.9	Zusammenfassung der vorgestellten Übertragungsarten	56
3	Eignung der Technologien für verschiedene Anwendungsfälle	62
3.1	Fahrzeugmanagement	62
3.2	Asset-Management	65
3.3	Animal Tracking	67
3.4	Umwelt-Monitoring	69
3.5	Sport und Fitness	71
3.6	Medizin.....	73
3.7	Sicherheit: Personenlokalisierung	75

3.8	Smart Home	78
3.9	Produktion	80
3.10	Konnektivität in der Wüste	81
3.11	Maritime Umgebung	82
3.12	Luftfahrt	84
3.13	Kommunikation in Gebirgen.....	86
3.14	Breitbandzugänge im ländlichen Raum.....	87
4	Fazit	89
5	Literatur	VI

Vorwort des Herausgebers

An einer Hochschule entstehen aus studentischen Arbeiten immer wieder schriftliche Ergebnisse, die vielleicht nicht das Prädikat „hochwissenschaftlich“ oder „Fachbuch“ verdienen, aber gleichwohl für eine bestimmte gesellschaftliche Gruppe interessant sind und es daher nicht verdient hätten, im Archiv der Hochschule zu verschwinden.

Das gilt auch für das hier vorliegende Werk, in dem die unterschiedlichen Technologien zur Vernetzung mobiler Objekte dargestellt und miteinander verglichen werden. Ebenso werden typische Anwendungsfälle dieser Konnektivitätstechnologien beschrieben. Das Werk ist die Zusammenfassung diverser Studienarbeiten und Projektgruppen unserer Studierenden und Mitarbeiter.

Mitgewirkt und Beiträge geliefert haben die Studierenden

- Vanessa Bentel
- Sabrina Schuldes
- Tessa Pfeffer
- Maike Lemmermeyer
- Annabelle Sapper
- Marvin Neuhäusler
- Jascha Kreisel

sowie der DHBW-Mitarbeiter Christopher Kleiber. Ihnen allen sowie für das Review Herrn Prof. Dr. Tobias Frank sei herzlich gedankt!

Friedrichshafen, im Februar 2021

Prof. Dr. Heinz-Leo Dudek

Prorektor der DHBW Ravensburg und Dekan der Fakultät Technik

Kontakt:

DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen

Fallenbrunnen 2

88045 Friedrichshafen

Abkürzungsverzeichnis

3G	3. Mobilfunkgeneration (auch UMTS genannt)
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4. Mobilfunkgeneration (auch LTE genannt)
5G	5. Mobilfunkgeneration
AC	Alternating Current
ACE	Antarctic Circumnavigation Expedition
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance Contract
ANSP	Air Navigation Service Provider
APN	Access Point Name
ATN	Aeronautical Telecommunications Network
ATS	Air Traffic Services
BLE	Bluetooth Low Energy
DBS	Direct Broadcast Satellite
DGLR	Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg (Ravensburg Campus Friedrichshafen)

DVB-S	Digital Video Broadcasting-Satellite
DVB-SI	Digital Video Broadcasting - Service Information
EDRS	Europäischen Datenrelaissatellitensystems
ESA	European Space Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FANS	Future Air Navigation System (Iridium)
GEO	Geostationary Earth Orbit
GIoT	Global Internet of Things
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HDTV	High Definition Television
HSPA	High Speed Packet Access
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol

IPS	Internet Protocol Suite
ISM	Industrial, Scientific, Medical (Frequenzband)
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWA	Low Power Wide Area
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MEO	Medium Earth orbit
NB	NarrowBand
NB-IoT	NarrowBand Internet of Things
NFC	Near Field Communication
NGEO	Non Geostationary Earth Orbit
OSI	Open Systems Interconnection
PC	Personal Computer
RFID	Radio Frequency Identification
RTD	Round Trip Delay

SBD	Short Burst Data (Iridium)
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
T2M	Thuraya to Machine
UAV	Unpiloted Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
VPN	Virtual Private Network
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Für das Jahr 2025 werden weltweit mehr als 75 Milliarden IoT-Geräte prognostiziert (Quelle: Statista, 2016 [1]).....	1
Abbildung 2: Prinzipbild zur Vernetzung von Objekten / IoT (Quelle: Wazid, et al., 2017 [2]).....	2
Abbildung 3: Übersicht der Konnektivitätstechnologien in Bezug auf Reichweite und Datenrate (Quelle: Steinbeis-Transferzentrum Telematik)	3
Abbildung 4: Übersicht über die genutzten Frequenzbereiche (Quelle: elektronik-kompodium.de).....	5
Abbildung 5: Aufbau Mobilfunknetzwerk (Quelle: elektronik-kompodium.de)	6
Abbildung 6: GSM-Modul (Quelle: conrad.de).....	7
Abbildung 7: Netzwerkarchitektur Narrow Band IoT (Quelle: iot.telefonica.de)	10
Abbildung 8: Kleinstes NB-IoT Modul der Welt (Stand März 2018) (Quelle: murata.com)	11
Abbildung 9: Netzwerkarchitektur des LoRaWAN (Quelle: iot-design.de)	15
Abbildung 10: LoRa-Node (Quelle: amtratek.de).....	16
Abbildung 11: LoRa Gateway (Quelle: tektelic.com).....	16
Abbildung 12: Aufbau SigFox-Netzwerk (Quelle: eigene Darstellung)	20
Abbildung 13: SigFox-Modul (Quelle: murata.com).....	23
Abbildung 14: Bluetooth Architektur (Quelle: elektroniknet.de).....	26
Abbildung 15: BLE Tag (Quelle: modulink.de).....	27
Abbildung 16: Funktion BLE (Quelle: Libelium, 2013)	29
Abbildung 17: Netzwerk-Topologie [50]	33
Abbildung 18: ZigBee End-Device (Quelle: wikipedia.org)	33
Abbildung 19: WLAN-Modul (Quelle: www.farnell.com).....	38
Abbildung 20: Die Erdumlaufbahnen der Satelliten (Quelle: Baldenhofer, 2020, [68])	41
Abbildung 21: Prinzipbild des Thuraya T2M-DUAL Terminals (Quelle: Thuraya, [69]).....	42
Abbildung 22: Vergleich der Technologien im Spinnennetzdiagramm	61
Abbildung 23: Satellitenkommunikation in der Wüste zur Überwachung von Frackinganlagen	82
Abbildung 24: Satellitenkommunikation in der Antarktis bei wissenschaftlichen Expeditionen (Quelle: Iridium Satellite LLC, 2018, [154]).....	82

Abbildung 25: Satellitenkommunikation in der Antarktis bei einer Rettungsaktion (Quelle: Iridium Satellite LLC, 2018, [155]).....	84
Abbildung 26: Kommunikationsmöglichkeiten und Cockpitanwendungen mit Iridium Certus Produkten (Quelle: Iridium Satellite LLC, 2020, [157])	85
Abbildung 27: Die ADS-B Signalübertragung von Flugzeugen zu den Bodenstationen über Iridium Satelliten (Quelle: Grush, 2019, [158])	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Kosten bei GSM.....	8
Tabelle 2: Vor- / Nachteile von GSM	9
Tabelle 3: Kostenübersicht NB - IoT.....	12
Tabelle 4: Vor- und Nachteile NB - IoT.....	13
Tabelle 5: Übersicht über die Kosten bei LoRaWAN	18
Tabelle 6: Vor- / Nachteile von LoRaWAN	19
Tabelle 7: Beispiel Strukturierung SigFox-Nachricht	21
Tabelle 8: Kosten SigFox.....	24
Tabelle 9: Vor- / Nachteile von SigFox.....	25
Tabelle 10: Übersicht über die Kosten bei Bluetooth Low Energy.....	30
Tabelle 11: Vor- / Nachteile bei BLE	31
Tabelle 12: Übersicht über die Kosten bei ZigBee.....	34
Tabelle 13: Vor- / Nachteile von ZigBee	35
Tabelle 14: WLAN-Spezifikationen (Quelle: Sauter, 2018)	36
Tabelle 15: Übersicht über die Kosten bei WLAN	39
Tabelle 16: Vor-/ Nachteile von WLAN	39
Tabelle 17: Fakten des Satellitensystemanbieters Thuraya	44
Tabelle 18: Fakten des Satellitensystemanbieters Starlink	45
Tabelle 19: Fakten des Satellitensystemanbieters Iridium.....	48
Tabelle 20: Fakten des Satellitensystemanbieters Orbcomm	49
Tabelle 21: Fakten des IsatData Pro Service des Satellitensystemanbieters Inmarsat	49
Tabelle 22: Einige Thuraya und Iridium Satellitentelefone im Vergleich (Quelle: Iridium Satellite LLC, Thuraya, [114, 115]).....	51
Tabelle 23: Einige IoT-Terminals im Vergleich (Quelle: Thuraya, Orbcomm Inc., Iridium Satellite LLC, [69, 111, 118])	52
Tabelle 24: Vor- und Nachteile der Satellitenkommunikation	55
Tabelle 25: Vergleich der vorgestellten Technologien	58
Tabelle 26: Vergleich der vorgestellten Satellitennetze.....	59

Tabelle 27: Übersicht Fallszenarien Usecase Fahrzeugmanagement.....	63
Tabelle 28: Übersicht Fallszenarien Usecase Asset-Management.....	66
Tabelle 29: Übersicht Fallszenarien Usecase Animal Tracking	68
Tabelle 30: Übersicht Fallszenarien Usecase Umwelt-Monitoring	70
Tabelle 31: Übersicht Fallszenarien Usecase Sport und Fitness	72
Tabelle 32: Übersicht Fallszenarien Usecase Medizin	74
Tabelle 33: Übersicht Fallszenarien Usecase Sicherheit.....	76
Tabelle 34: Übersicht Fallszenarien Usecase Smart Home	79
Tabelle 35: Übersicht Fallszenarien Usecase Produktion	80

1 Einleitung

Für das Jahr 2025 wird prognostiziert, dass mehr als 75 Milliarden Geräte über drahtlose Kommunikation miteinander verbunden sein werden [1]. In Kombination mit dem rasanten Wachstum der Anwendung des Internet of Things (IoT) stellt sich die Frage, welche Kommunikationstechnologien hierfür verwendet werden bzw. verwendet werden können.

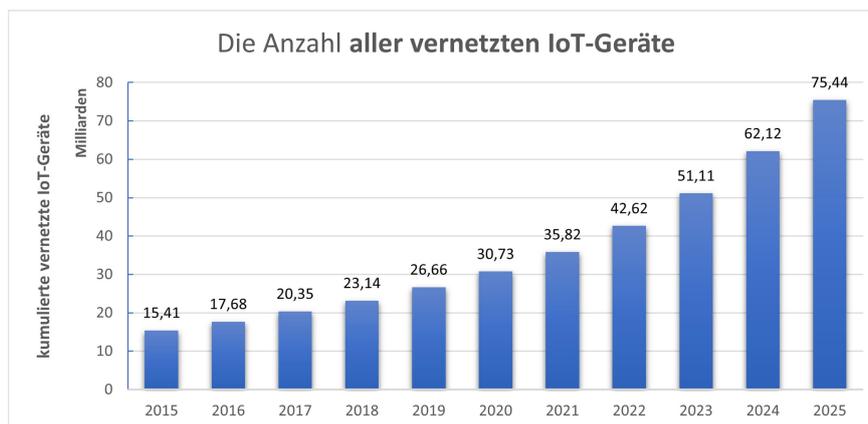


Abbildung 1: Für das Jahr 2025 werden weltweit mehr als 75 Milliarden IoT-Geräte prognostiziert (Quelle: Statista, 2016 [1])

IoT Anwendungen basieren auf der Verbindung und dem Datenaustausch zwischen –oftmals mobilen oder semi-mobilen- Objekten untereinander sowie mit Zentralen oder Leitständen, in denen eine Datenauswertung erfolgt und (semi-)automatisch Reaktionen ausgelöst werden. Ein in den Medien gern zitiertes Beispiel ist der intelligente Kühlschrank, der selbstständig erkennt, dass die Biervorräte zu Neige gehen und dann eine entsprechende Bestellung auslöst. *Ungelöst ist jedoch noch die Frage, wer die Bierkästen in die 4. Etage trägt (Anmerkung des Herausgebers)*. Nun ist gerade der Kühlschrank ein eher stationäres Gerät, das also über eine feste Verbindung kommunizieren könnte. Doch auch hierbei bietet die drahtlose Kommunikation den Vorteil, dass keine speziellen Leitungen angebracht werden müssen. Im vorliegenden Werk werden daher nur drahtlose Kommunikationstechnologien betrachtet. Zahllose Beispiele für deren Anwendung finden sich in den Bereichen Sicherheit, Transportlogistik, Landwirtschaft, Asset-Tracking, Gebäudeautomatisierung und so weiter, worauf in Kapitel 3 ausführlich eingegangen wird.

Da in der Realisierung von IoT-Anwendungen die Kommunikationstechnologie gerätetechnisch immer stärker mit der Sensorik und ggfs. notwendiger Rechenleistung am Objekt verschmilzt, wird im Folgenden nur noch der Begriff der „Konnektivität“ bzw. „Konnektivitätstechnologie“ verwendet, der in der Medizin die Verbindung von Nervenzellen und in der Informationstechnik die Schnittstellen eines IT-Geräts bezeichnet. Bei der drahtlosen Vernetzung von Objekten existieren ganz unterschiedliche Anforderungen z.B. an Reichweite und

Datenrate. Es ist daher nicht verwunderlich, dass sich verschiedene Konnektivitätstechnologien entwickeln und in der Anwendung durchgesetzt haben, die je nach Umfeld ihre technischen Stärken ausspielen können. Gemeinsam ist oft nur der Wunsch des Nutzers nach möglichst geringem Energieverbrauch sowie niedrigen Beschaffungs- und Betriebskosten. In Abbildung 2 werden einige Anwendungsgebiete von IoT dargestellt.

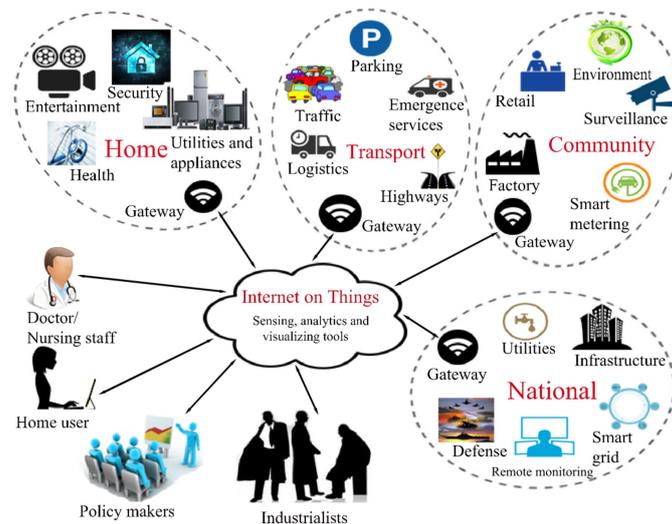


Abbildung 2: Prinzipbild zur Vernetzung von Objekten / IoT
(Quelle: Wazid, et al., 2017 [2])

Die heute üblichen Konnektivitätstechnologien werden in Abbildung 3, nach Reichweite und Datenrate, aufgeteilt. Zu berücksichtigen ist in der Darstellung, dass zellulare Systeme eine scheinbar unendliche Reichweite haben, innerhalb der so genannten Funkzelle aber nur wenige Kilometer abdecken. Die für den Nutzer relevante flächendeckende Anwendung wird durch das „Weiterreichen“ der Mobilgeräte von Zelle zu Zelle realisiert, siehe Kapitel 2.1.

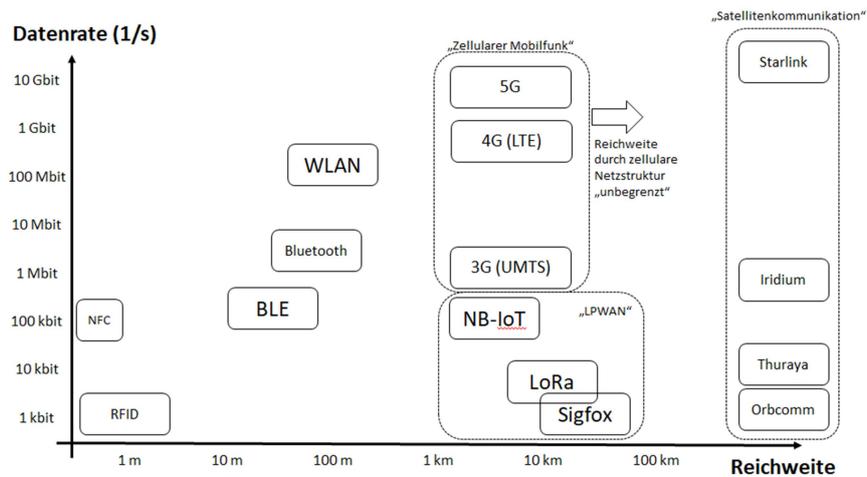


Abbildung 3: Übersicht der Konnektivitätstechnologien in Bezug auf Reichweite und Datenrate (Quelle: Steinbeis-Transferzentrum Telematik)

Im nachfolgenden Kapitel werden die Technologien mit Fokus auf Funktionsprinzip, Kosten, Verwendung sowie Vor- und Nachteilen genauer betrachtet. Anschließend folgt eine technische Gegenüberstellung mit den wichtigsten Daten wie Reichweite, Frequenzbereich und Batterielaufzeit. Im dritten Kapitel werden spezifische Use Cases beschrieben und Technologieempfehlung für den jeweiligen Anwendungsfall ausgesprochen.

2 Konnektivitätstechnologien

In diesem Kapitel werden verschiedene Konnektivitätstechnologien vorgestellt. Hierbei werden bei jeder Technologie die Punkte Funktionsprinzip, Verwendung, anfallende Kosten und die Vor- bzw. Nachteile erläutert. Abschließend werden die vorgestellten Technologien miteinander verglichen.

2.1 Zellularer Mobilfunk

2.1.1 Funktionsprinzip

Das Global System of Mobile Communication (GSM) wurde 1992 zur mobilen Sprachkommunikation in Deutschland eingeführt und definiert einen (zellularen) Mobilfunk, bei dem eine Zelle dem Empfangsbereich einer festen Sende-/Empfangseinheit entspricht und ein Mobilgerät von Zelle zu Zelle weitergereicht wird. Mit der Einführung der zweiten Generation des GSM war auch die Datenübertragung möglich. Heute ist die Struktur der Funksignale und der Aufbau des Datenaustausches weltweit in einem offenen Standard festgelegt. [3, 4]

GSM arbeitet – im Gegensatz zu späteren Generationen des Mobilfunks, wie z.B. UMTS oder LTE – „verbindungsorientiert“, d.h. es werden Verbindungen aufgebaut, gehalten und wieder abgebrochen. Spätere Generationen arbeiten „paketorientiert“, d.h. es werden Pakete verschickt, die einen Empfänger haben. . Im Laufe der Zeit hat sich das verwendete Medium für die Kommunikation immer weiter Richtung Internet gewandelt. Dabei werden Internet Protokolle (IP) verwendet, über welche Datenpakete übertragen werden können. [5]

Wie schon erwähnt, ist der zellulare Mobilfunk in verschiedenen Generationen verfügbar. Die vierte Generation wird auch als Long Term Evolution (LTE) bezeichnet. LTE ist das Ergebnis der Überarbeitung des Radio- und Kernnetzwerkes und bietet eine höhere Leistungsfähigkeit des Mobilfunknetzwerkes. Bei LTE wird ein neues Übertragungsverfahren der Radiowellen verwendet, welches den „Multipath Fading Effekt“ umgeht. Um höhere Übertragungsgeschwindigkeiten zu erreichen, muss die Breite des Übertragungskanals vergrößert und gleichzeitig die Zeit für einen Übertragungsschritt reduziert werden. Je kürzer die benötigte Zeit für die Übertragung eines Übertragungsschrittes, desto höher der Einfluss von verzögerten Kopien des ursprünglichen Signals am Empfänger, da es zu einer Erhöhung der Überlappung der einzelnen Übertragungsschritte kommt. Verzögerte Kopien entstehen, wenn Radiowellen von Objekten zwischen Sender und Empfänger abgelenkt werden und ein Teil des Signals eine längere Strecke zurücklegen muss als ein anderer Teil. Dieser Effekt wird auch „Multipath Fading Effekt“ genannt. Um diesen zu umgehen wird ein Verfahren mit der Bezeichnung „Orthogonal Frequency Division Multiplexing“ verwendet. Dabei wird ein

schneller Datenstrom in mehrere langsame zueinander orthogonale Datenströme aufgeteilt, die trotzdem gleichzeitig übertragen werden. Der „Multipath Fading Effekt“ ist geringer, da jeder einzelne Teil-Datenstrom eine langsame Übertragungsgeschwindigkeit je Übertragungsschritt hat. Um die gesamte Datenrate in der Übertragung zu erhöhen, wird die Anzahl der langsamen Teil-Datenströme erhöht. [5]

Zurzeit hat der Ausbau der fünften Mobilfunkgeneration (5G) begonnen. Dieser läuft weitestgehend parallel mit der LTE Technologie, da so der Ausbau von 5G stufenweise erfolgen kann. Mit dem 5G Standard wird sich z.B ein höherer Durchsatz, mehr Kapazität und sinkende Betriebskosten erhofft. [6]

2G/3G	4G	5G	Zukunft
		700 MHz	
	800 MHz		
900 MHz			
		1.500 MHz	
	1.800 MHz		
2.100 MHz			
		2.300 MHz	
	2.600 MHz		
		3,4 - 3,6 GHz	
			3,6 - 3,8 GHz
		26 GHz	
			31,8 - 33,4 GHz
			40,5 - 43,5 GHz

Abbildung 4: Übersicht über die genutzten Frequenzbereiche (Quelle: elektronikkompendium.de)

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über die Generationen und die jeweils verwendeten Frequenzbereiche. Jeder der Mobilfunkstandards nutzt andere Frequenzbänder, daher kann hier keine genaue Angabe eines Frequenzspektrums gegeben werden. Auch für die abrufbaren Up-/Downlink Geschwindigkeiten kann keine genaue Angabe gemacht werden, da dies von der Mobilfunkgeneration und der Stärke des Signalempfangs abhängt. Ab dem Jahr 2020 ist in mehreren Ländern geplant, die Verfügbarkeit der Mobilfunkgenerationen 2G und 3G abzuschalten und die für diese Mobilfunkgenerationen genutzten Frequenzen den Generationen LTE und 5G zur Verfügung zu stellen. [7]

Die Funktionsweise des Mobilfunks basiert auf einer Netzstruktur. Das Netz wird aus mehreren Basisstationen gebildet, in die sich das Mobilfunkmodul mittels einer Subscriber Identity Module (SIM-) Karte einwählen kann. Jede Basisstation hat hierbei einen gewissen Funkradius. Die Funkgebiete der einzelnen Basisstationen sich teilweise überlappend. Somit verliert das Mobilfunk-Modul bei einem Wechsel von zwei Basisstationen nicht die Verbindung zum Netzwerk. Der Wechsel erfolgt automatisch und der Endnutzer erhält darüber auch keine Information. [8]

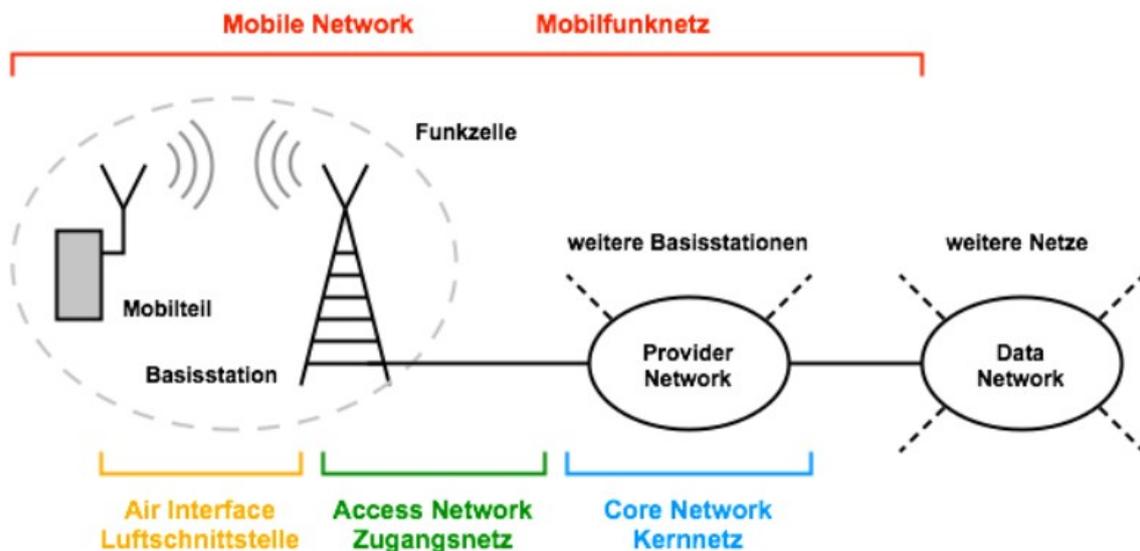


Abbildung 5: Aufbau Mobilfunknetzwerk (Quelle: elektronik-kompendium.de)

Die Reichweite der Mobilfunk-Technologie kann nicht exakt definiert werden. Wie Abbildung 5 zeigt, ist das Mobilfunknetz in mehrere Funkzellen aufgeteilt. In jeder dieser Zellen stehen eine oder mehrere Basisstationen, die von den verschiedenen Netzbetreibern betrieben werden. Der Durchmesser einer solchen Funkzelle beträgt mehrere Kilometer. Das Mobilteil bzw. das Mobilfunk-Modul wählt sich automatisch in die Basisstation ein, bei welcher die Abdeckung durch Funkwellen, ausgehend von einer Basisstation, am größten ist. Der Zugriff zwischen den verschiedenen Basisstationen wechselt situationsbedingt. Unter Idealbedingungen kann eine Reichweite einer einzelnen Funkzelle von bis zu 35 km erreicht werden. Dies wird aber nur in ländlichen Regionen ausgenutzt, da in Ballungszentren eine hohe Dichte an Basisstationen vorhanden ist. Die Mobilfunk-Technologie ist flächendeckend verfügbar, dennoch kann es zu regionalen Abweichungen in der Stärke des Signals kommen. [9]

Um die Technologie des Mobilfunks für Konnektivitätsanwendungen nutzen zu können, muss eine ausreichende Netzwerkabdeckung vorhanden sein, ein Mobilfunk-Modul und eine SIM-Karte, welche sich in das Netzwerk der gewünschten Mobilfunkgeneration einwählen kann.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein GSM-Modul. Bei diesem betragen die Maße 130 mm x 94 mm x 80,7 mm. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Mobilfunk-Module in der Breite der Funktionen und somit auch der Größe unterscheiden. [5]



Abbildung 6: GSM-Modul (Quelle: conrad.de)

2.1.2 Verwendung

Die Mobilfunk-Technologie kann für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Da im Kapitel 3 noch verschiedene Anwendungsfälle im Detail erläutert werden, folgt hier nur eine kurze Auflistung von Verwendungsfällen:

- Fernüberwachung und –steuerung von Fahrzeugen und mobilen Objekten
- Maschine zu Maschine Kommunikation
- Mensch zu Maschine Kommunikation

2.1.3 Kosten

Die anfallenden Kosten werden in Einmalkosten und laufende Kosten pro Monat unterteilt.

Tabelle 1 stellt im Anschluss die anfallenden Gebühren in einer Übersicht dar.

Bevor die Technologie implementiert wird, muss entschieden werden, welche Datenmenge pro Monat benötigt wird und auf welcher Mobilfunkgeneration der Anwendungsfall basieren soll. Da es verschiedene Faktoren gibt, die die Preise beeinflussen, sind in Tabelle 1 bei den unterschiedlichen Kostenpunkten jeweils Preisspannen angegeben.

Tabelle 1: Übersicht über die Kosten bei GSM

	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
GSM-Modul	50 – 230 €	
SIM-Karte	Tarifanschluss 15 – 20 €	Monatstarif 5 – 50 €

2.1.4 Vor- und Nachteile

Wie jede Technologie hat auch der Mobilfunk verschiedene Vor- bzw. Nachteile. Diese unterscheiden sich teilweise je nachdem welche Mobilfunkgeneration betrachtet wird.

In Deutschland ist an sich das Mobilfunknetz flächendeckend, dennoch kommt es hier zu erheblichen Unterschieden in der Signalstärke. So ist es nicht unüblich, auf dem Land wenig bis gar keinen Empfang zu haben. Auch kann dort meist nur maximal die 3. Mobilfunkgeneration empfangen werden. Der Ausbau von LTE ist in den Ballungsgebieten schon weiter vorangeschritten, dennoch ist hier noch Potential vorhanden. Der Ausbau von 5G wurde Mitte des Jahres 2019 in ausgewählten Städten in Deutschland gestartet. Um 5G nutzen zu können, wird aber ein Endgerät benötigt, welches diesen Stand der Technik unterstützt. Hierbei ist die Auswahl noch nicht sehr groß und die Kosten sind dementsprechend hoch. Ein weiterer negativer Aspekt ist, dass relativ viel Energie im Sendepack benötigt wird. Im Standby-Modus wird dagegen vergleichbar viel Energie verbraucht wie bei einem Smartphone. Der tatsächliche Stromverbrauch hängt folglich von der Nutzungsrate ab. Dennoch ist ein Stromanschluss oder ein ausreichend großer Akku notwendig. Der Energieverbrauch kommt daher zustande, da das Endgerät ständig sich mit der Funkzelle, die den besten Empfang hat, verbindet. [5, 8]

Um die Mobilfunk-Technologie nutzen zu können, werden nur wenige Netzwerkkomponenten benötigt. Daher ist die erste Inbetriebnahme einfach und kann ohne einen großen Zeitaufwand geschehen. Auch wenn LTE und 5G noch nicht flächendeckend in Deutschland verfügbar sind, können viele Anwendungsfälle innerhalb von Ballungsgebieten angewendet werden. [5, 8]

Tabelle 2 stellt die genannten Vor- bzw. Nachteile in einer Übersicht dar.

Tabelle 2: Vor- / Nachteile von des zellularen Mobilfunks

Vorteile	Nachteile
Wenige Netzwerkkomponenten notwendig	Teilweise kostspielig in der Hardware
Einfache Implementierung	mittlerer Strombedarf
	Nicht flächendeckender Empfang von LTE und 5G

2.2 Narrow Band IoT

2.2.1 Funktionsprinzip

NB-IoT ist die Abkürzung für Narrow Band – IoT und ist ein Funkstandard, um Gegenstände im so genannten „Internet der Dinge“ (Internet of Things-IoT) zu verknüpfen. NB-IoT zählt zu den „Low Power Wide Area“ LPWA – Technologien, welche aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs und relativ hoher Reichweiten in der Maschine-zu-Maschine M2M Kommunikation eingesetzt werden. Charakteristisch für NB-IoT ist die gute Netzabdeckung sowie die schmalbandige Datenübertragung. Über vorhandene Mobilfunknetze ist eine hohe Funkabdeckung möglich. Der geringe Energiebedarf der Endgeräte, welche mit kleinen Batterien lange Zeiträume funktionsfähig sind, ist der Unterschied zu herkömmlichen Mobilfunkgeräten. Man kann von einer Batterielaufzeit von über 15 Jahren ausgehen bei einer Datenrate von 200 Byte pro Tag. Auch die Funkversorgung an schlecht zugänglichen Orten, wie zum Beispiel in unterirdischen Rohrleitungssystemen ist mit NB-IoT gewährleistet. [9–11]

Narrow Band-IoT nutzt die bestehende LTE-Technologie und erfüllt die Anforderungen des von der 3GPP-Organisation definierten LTE-Standards. Dies bedeutet, dass NB-IoT standardisiert und global verwendbar ist. Realisiert wurde dieses 3GPP- Projekt von sieben Stan-

standardisierungskörperschaften, welche sich mit Telekommunikation beschäftigen. Bei dieser Standardisierung wurden Technologien wie der Funkzugriff oder Kerntransportnetze ebenso wie Sicherheit und Systemspezifikationen überarbeitet und festgelegt. [9, 12]

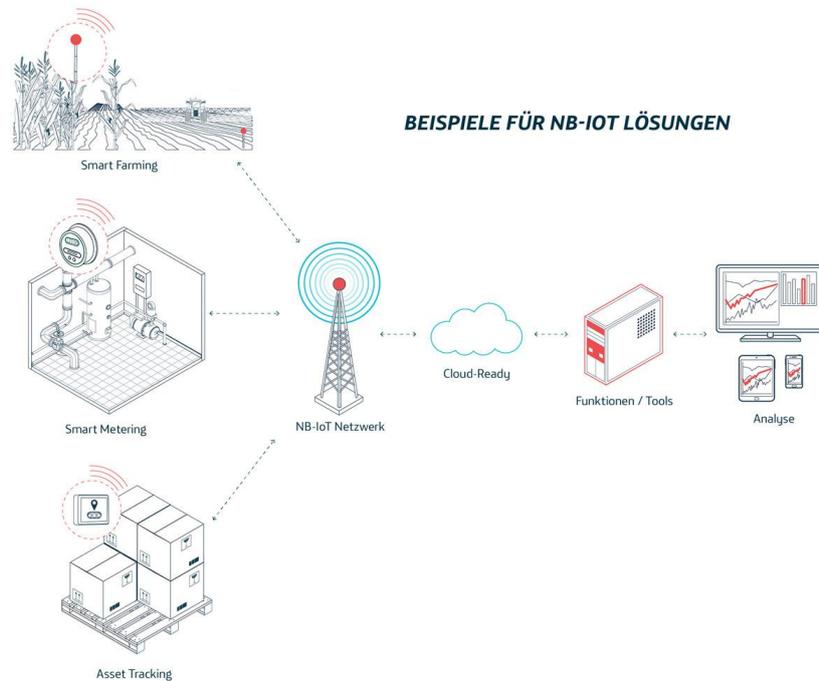


Abbildung 7: Netzwerkarchitektur Narrow Band IoT (Quelle: iot.telefonica.de)

Die typische NB-IoT-Netzwerkarchitektur ist in Abbildung 7 dargestellt. Um NB-IoT zu nutzen, müssen die Netzanbieter meist nur ein Softwareupgrade auf das vorhandene LTE-Netz aufspielen, was größtenteils in Deutschland von den Anbietern schon erfolgt ist. NB-IoT kann so ohne zusätzliche Spektrumlizenzen betrieben werden. Die Technologie nutzt das GSM- aber auch das LTE- Spektrum.

Damit der Endnutzer NB-IoT verwenden kann, muss ein spezielles Funkmodul oder ein Chipsatz, dargestellt in Abbildung 8, an den jeweiligen zu überwachenden Geräten angebracht werden. Diese Module enthalten ein physisches SIM. Somit kann das Gerät verifiziert werden. Ebenso ermöglicht dies einen Signalschutz sowie eine Datenverschlüsselung. Die SIM-Karte ist unter anderem auch nötig, um im Ausland die vorhandenen Netze zu nutzen. Die Datenübertragung zwischen dem Endgerät und APN (Access Point Name) bei NB – IoT kann IP – basiert oder nicht IP – basiert erfolgen. Im „IP Mode“ wird das User Datagram Protocol (UDP) verwendet, um Daten zu übertragen. Die Non-IP Mode Variante wird allerdings häufiger verwendet, da hierdurch das erforderliche Datenvolumen, durch Einsparen des UDP Protokoll-Overheads, reduziert werden kann. Außerdem ist diese Variante sicherer, jedoch nur mit einem privaten APN umsetzbar. [9, 10]

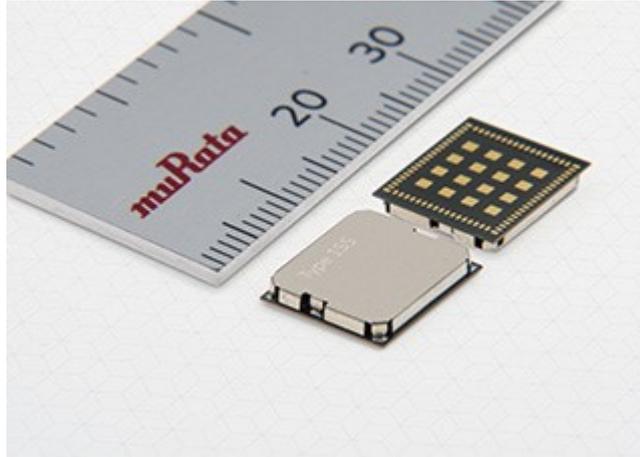


Abbildung 8: Kleinstes NB-IoT Modul der Welt (Stand März 2018) (Quelle: murata.com)

NB-IoT ermöglicht eine bidirektionale Halbduplex- Kommunikation. Dies bedeutet, dass eine Übertragung im Uplink oder im Downlink erfolgen kann jedoch nie beides zur selben Zeit. Die übliche Übertragungsrichtung stellt allerdings der Uplink dar. Die Spitzendatenrate bei einem Downlink liegt bei 200 – 250 kbit/s und bei einem Uplink bei 180 – 230 kbit/s. [9–11]

Um die gute Gebäudedurchdringung zu ermöglichen nutzt NB-IoT ein robustes und schmalbandiges Modulationsverfahren sowie Redundanzen, also wiederholte Sendevorgänge. Je nach Umgebungssituation des Endgerätes können drei Stufen eingestellt werden, um die Sende- und Empfangsvorgänge der Situation optimal anzupassen. [10]

2.2.2 Verwendung

Die Verwendung von NB-IoT ist durch den geringen Energieverbrauch und die dadurch lange wartungsfreie Verwendungszeit der Endgeräte sehr vielfältig. Die drahtlose Übertragung kleiner Datenpakete über weite Distanzen, auch durch das Erdreich oder Gebäude macht diese Technologie für Anwender interessant. Auch die einfache Umsetzung mit den damit verbundenen niedrigen Kosten, spricht viele an. [11, 13]

2.2.3 Kosten

Die Kosten für NB-IoT hängen von unterschiedlichen Faktoren ab. Verschiedene Telekommunikationsunternehmen bieten ihre eigenen Preisstrukturen an, entweder als Gesamtpaket oder als Basispaket mit zusätzlichen laufenden Kosten. Generell hängen die Kosten allerdings von der monatlichen Datenmenge ab. Die Kostenstruktur ist beispielhaft in Tabelle 3 dargestellt. [10, 13, 14]

Tabelle 3: Kostenübersicht NB - IoT

Anbieter	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
Telekom	< 5 € pro Modul	mtl. 100 KB: 0,20 € Gateway 0,19 € SIM mtl. 500 KB: 0,00 € Gateway 0,19 € SIM mtl. 1500 KB: 0,00 € Gateway 0,19 € SIM
Vodafone	Mtl. 50 MB pro Modul, Komplettpaket (Hardware, Software, Konnektivität, Cloud), 6 Monate Laufzeit: 349€ netto	

2.2.4 Vor- und Nachteile

Die Vorteile von NB-IoT liegen in den geringen Kosten, sowie im minimalen Aufwand für eine Vernetzung. Da die Chiparchitektur sehr einfach ist und die Nodes in hohen Stückzahlen produziert werden, kann ein günstiger Anschaffungspreis erzielt werden. Es erfordert keine spezielle Installation oder Wartung eines lokalen Netzes. Durch die 3GPP Industriestandards ist eine internationale standardisierte Anwendung gewährleistet. Somit bestehen eine herstellerübergreifende Kompatibilität und eine internationale Abdeckung. Aufgrund der tiefen Gebäudedurchdringung ist es möglich die Datenübertragung auch unterirdisch zu nutzen. Das bestehende Mobilfunknetz ermöglicht eine flächendeckende Netzabdeckung über große Entfernungen. Durch die geringe Energie, welche die Endgeräte benötigen, erhält man eine lange Laufzeit. Auch die Unabhängigkeit von einem bestehenden Stromnetz ist durch die Nutzung von Batterien gegeben. Die Datenübertragung erfolgt verschlüsselt und kann somit auch für sensible Services eingesetzt werden. Außerdem besteht durch die Nutzung lizenzierter Frequenzbänder ein sehr geringes Störungsrisiko. [15, 16]

Der Nachteil liegt in der geringen übertragbaren Datenmenge. Ebenso ist man abhängig von Netzanbietern, da man NB-IoT nur in Gebieten nutzen kann, welche mit einem Softwareupdate aufgerüstet wurden. Die Übertragungszeit variiert, da durch die Wiederholungen des

Sendevorgangs z.B. bei einer Gebäudedurchdringung nicht vorhergesehen werden kann, wann die Daten vollständig versendet sind. Dadurch ist auch keine Echtzeitübertragung möglich. Das durchschnittliche Datenvolumen im Monat eines Modules liegt bei max. 500 kB. Ein weiterer Nachteil ist, dass ausschließlich Daten übertragen werden können. Es können z.B. keine Bilder oder Audiodateien versendet werden. Ein weiterer Schwachpunkt des Systems ist, dass keine Kommunikation zwischen den Modulen besteht. [15, 17]

Tabelle 4: Vor- und Nachteile NB - IoT

Vorteile	Nachteile
Geringe laufende Kosten	Nur geringe Datenmengen übertragbar
Günstiger Anschaffungspreis	Anwendung nur in einem Gebiet mit Abdeckung
Minimaler Aufwand für die Inbetriebnahme	Übertragungszeit variiert
Keine spezielle Installation oder Wartung eines lokalen Netzes	Keine Echtzeitübertragung
Internationale standardisierte Anwendung	Durchschnittliches monatliches Datenvolumen pro Modul max. 500 kB
Herstellerübergreifende Kompatibilität	Ausschließlich Übertragung von Daten
Internationale Abdeckung	Keine direkte Verbindung der Module untereinander
Tiefe Gebäudedurchdringung	
Flächendeckende Netzabdeckung	
Große Entfernungen möglich	
Geringer Energieverbrauch	
Lange Laufzeiten	

2.3 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)

2.3.1 Funktionsprinzip

LoRaWAN steht für Long Range Wide Area Network, das dem LPWAN (Low Power Wide Area Network) zugeordnet werden kann. LoRaWAN ist dabei ein Schichtprotokoll, das die energieeffiziente Übertragung von kleinen Datenpaketen über große Distanzen ermöglicht. Während das LoRaWAN diese Netzwerkarchitektur und das Standard Kommunikationsprotokoll beschreibt, bildet LoRa die physikalische Schicht und energieeffiziente Funktechnik, also die Übertragungsart, wie die Daten zwischen den Endgeräten und den Gateways übermittelt werden. Generell sind LPWAN-Netze Funknetze, die einen großen Entfernungsbereich abdecken. Es werden dabei kleine Datenmengen in geringen Datenraten übertragen, wodurch der notwendige Energieverbrauch sehr gering ist. Kennzeichen von LPWAN sind eine hohe Empfangsempfindlichkeit und eine geringe Energieaufnahme. [18]

LPWAN existiert bereits seit den 90er Jahren. LoRaWAN, das darauf basiert, steht allerdings noch am Anfang. Die Technologie LoRaWAN erfährt gerade einen Aufschwung, vor allem durch die verwandte Technologie Sigfox. Eine weitere Basis der Technologie bilden SEM-TECH Chips. Sie wurden wie Sigfox in Frankreich entwickelt. Als wichtiges Element des Internet der Dinge und der aktuellen Infrastruktur gewinnt LoRaWAN an Bedeutung. [19]

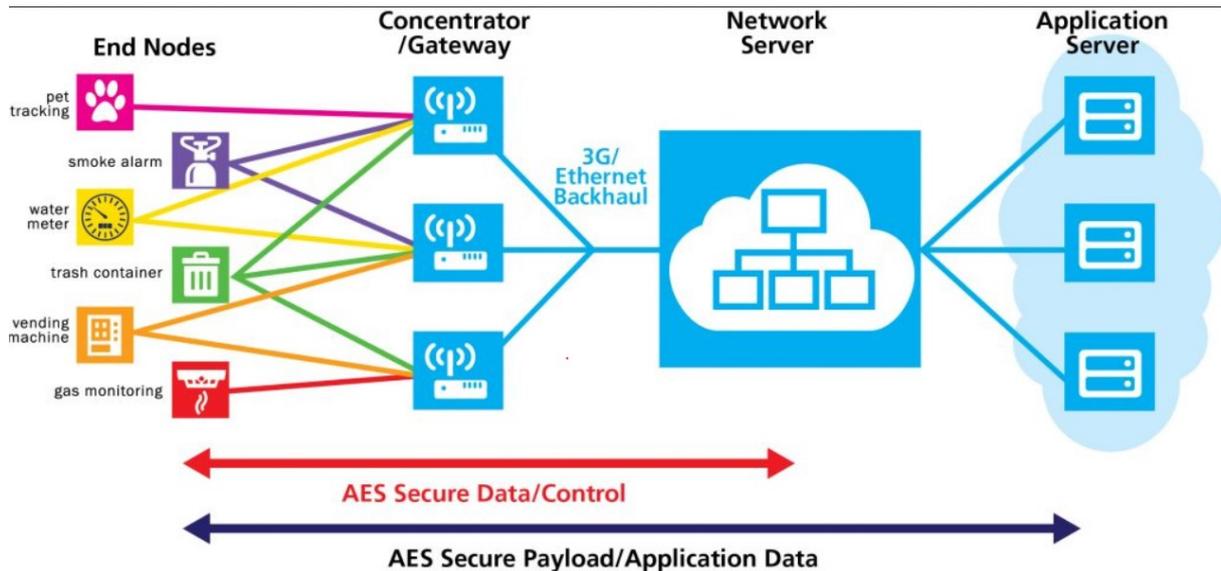


Abbildung 9: Netzwerkarchitektur des LoRaWAN (Quelle: iot-design.de)

In Abbildung 9 ist die Netzwerkarchitektur des LoRaWAN abgebildet. Dabei lässt sich auch die Topologie dieser Technologie erkennen, die Stern-Topologie. Das bedeutet, die End Nodes sind sternförmig mit den zentralen Knoten, den Gateways verbunden. Die End Nodes können nur mit dem Gateway kommunizieren und untereinander keine Daten austauschen. Der Knotenpunkt verteilt und empfängt Daten der Nodes. Die Sterntopologie ist eine einfache Vernetzungsart, die leicht erweitert werden kann und eine hohe Ausfallsicherheit bietet. [20]

Wie in Abbildung 9 außerdem zu sehen ist, besteht die gesamte Netzwerkstruktur des LoRaWAN noch aus weiteren Elementen. Die End Nodes stellen meist Sensoren dar. Sie erfassen Messdaten verschiedenster Zwecke und übermitteln diese per LoRa an eines oder mehrere Gateways in Reichweite. Die Übertragung erfolgt durch eine Single-Hop Wireless Kommunikation, in der Regel bidirektional. Ein beispielhaftes End-Node ist in Abbildung 10 dargestellt und hat eine Breite von ca. 6 cm. Die Gateways bilden das Verbindungsstück zwischen der energieeffizienten LoRa-Übertragung und der leistungsstarken Verbindung zum Netzwerkserver. Die Gateways sind über Standard IP-Verbindungen (3G, LTE, Ethernet) mit dem Netzwerkserver verbunden. Diese Netzwerkserver stellen die Daten den spezifischen Applikation-Servern zur anwendungsspezifischen Verarbeitung und Ausgabe zur Verfügung. [18, 21] Ein Gateway der Firma Tektelik ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Größe variiert jedoch stark abhängig von der Leistungsstärke, kleinere Indoor-Gateways sind kaum größer als ein Smartphone, während das abgebildete leistungsstarke Outdoor-Gateway fast 30 cm lang ist.



Abbildung 10: LoRa-Node (Quelle: amtratek.de)



Abbildung 11: LoRa Gateway (Quelle: tektelic.com)

Die energieeffiziente LoRa-Übertragung basiert auf der sogenannten Chirp Spread-Spectrum-Modulation. Durch ein Frequenzspreizverfahren und Modulation können mehrere Signale gleichzeitig empfangen werden, bei einem möglichst geringen Verbrauch an Strom. So wird bei geringen Distanzen ein geringer Spreizfaktor genutzt und folglich wenig Energie verbraucht. Bei weiten Distanzen werden höhere Spreizfaktoren genutzt, da somit die Empfängersensibilität steigt. Im Gegenzug sinkt die Datenrate, da ständig ein Spannungsfeld zwischen Reichweite, Energiebedarf und Bandbreite herrscht. Ein weiterer Vorteil neben der großen Reichweite ist, dass verschiedene durch Spreizfaktoren modulierte Signale auf demselben Frequenzkanal übermittelt werden können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Die Spreizfaktoren werden automatisch optimal gewählt. Eine damit verbundene zentrale Größe ist die Datenrate. Sie bestimmt, wie schnell die Daten übermittelt werden. Diese Einstellung erfolgt automatisch und wird mit adaptiver Datenrate betitelt. Sie wird in Abhängigkeit von Faktoren wie der Funksignalstärke optimal eingestellt, sodass eine optimale Nut-

zung des Spektrums bei optimaler Batterielebensdauer der Nodes erreicht wird. Die Übertragungsgeschwindigkeit liegt zwischen 0,3 bis 50 kbit/s. [18, 22]

Durch diese verschiedenen Parameter erreicht das LoRaWAN-Netzwerk eine große Kapazität und wird skalierbar. Somit können hohe Reichweiten von bis zu 15 km erreicht werden. Die Reichweite hängt zudem maßgeblich von Faktoren, wie Topografie, Hindernissen, Übertragungsgeschwindigkeit, Spreizfaktor, Bandbreite, Leistungsstärke der LoRa-Chips und Datenpaketgröße ab. Gleichzeitig beeinflussen die tatsächliche Reichweite, Sendeintervalle und die Datenmenge auch die Batterielebensdauer der End Nodes. [23]

LoRaWAN basiert auf einem offenen Standard. Die Technologie verwendet ein unlizenziertes Spektrum als Bestandteil des Industrial, Scientific and Medical (ISM-) Frequenzbands. In Europa ist der Frequenzbereich um 868 MHz, in Amerika um 915 MHz freigegeben. Da ein unlizenziertes (d.h. kostenfreies) Spektrum benutzt wird, kann ein neues Netzwerk leicht aufgebaut und vorhandene Strukturen genutzt werden. Zur Nutzung von LoRaWAN können eigene Netzwerke aufgebaut werden, oder vorhandene Community-basierte Netzwerke genutzt werden. Diese Netzwerke stehen meist schon großflächig regional, national oder global zu Verfügung. [23]

Die Sicherheit wird durch eine End-to-End-Verschlüsselung sichergestellt. Dies ist enorm wichtig, um die oft sensiblen Daten sicher zu übermitteln. Grundlegende Elemente sind dabei spezifische Keys und gegenseitige Authentifizierung. [24]

2.3.2 Verwendung

Grundsätzlich eignet sich LoRaWAN für Anwendungsfälle mit begrenzter Möglichkeit der Stromversorgung, physisch schwer zugängliche Standorte, Vielzahl an Endgeräten (hauptsächlich Sensoren), große Distanzen und keine Notwendigkeit einer dauerhaften Datenübertragung. Daher kommt die Technologie verstärkt bei Anwendungsfällen der Logistik (Asset Tracking), der Landwirtschaft (Bewässerung), der Produktion (Maschinendaten, Raumklima) und in Smart-Cities zum Einsatz. [24]

2.3.3 Kosten

Um LoRaWAN zu nutzen, muss eine Infrastruktur aufgebaut werden. Dazu sind mehrere Hardware und Software Komponenten notwendig. Diese sind im Detail ein Gateway, mehrere LoRa-Nodes (auch Shields genannt), Antennen und ein Gerät, auf welchem die Software installiert ist. Als Gerät reicht ein handelsübliches Smartphone aus. Laufende Kosten entstehen bei der Nutzung der LoRa-Testumgebung nicht. Die Einmalkosten unterscheiden sich je nachdem wie viele Objekte mit den Shields und Antennen ausgestattet werden. Den Großteil

der Kosten machen Gateway und die Software aus. Da zum Aufbau der LoRa-Testumgebung kein Endgerät notwendig ist, ist dieses auch nicht in den Kosten in der unten zu sehenden Tabelle 5 mit aufgenommen.

Neben einer solchen professionellen Umgebung können mit Starterkits auch kleinere, weniger leistungsstarke Testumgebungen aufgebaut werden. Sie sind in der Regel mit Indoor-Gateways ausgestattet und haben maximal wenige hundert Meter Reichweite. Solche Starterkits enthalten alle nötigen Komponenten.

Die laufenden Kosten sind nicht pauschal formulierbar. Als Application Server können fertige Lösungen genutzt werden, die die Daten aufbereiten und ausgeben. Solche Anwendungen sind allerdings auch selbst programmierbar. Netzwerkserver wie The Things Network (TTN) bieten sogar manche Auswertungen, wie zum Beispiel die Standortanzeige von Devices kostenfrei an.

Tabelle 5 gibt einen groben Überblick über die anfallenden Kosten bei einem Aufbau einer LoRa-Infrastruktur.

Tabelle 5: Übersicht über die Kosten bei LoRaWAN

	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
Gateway	Bis zu 900 €	
Dazu notwendige Komponenten:		
Antenne	30 €	
Verbindungskabel	100 €	
Software	200 €	
Device:	20 – 50 €	
Shield + Arduino (pro Stück)		
Starterkit	100 €	

2.3.4 Vor- und Nachteile

LoRaWAN bietet verschiedene Vor- und Nachteile. Die wohl größten Vorteile ergeben sich durch die adaptive Datenrate, die automatische Wahl verschiedener Spreizfaktoren und

durch die geringe Bandbreite. Diese Faktoren ermöglichen es, sehr hohe Reichweiten bei gleichzeitig geringem Energieverbrauch zu realisieren. Der Energieverbrauch ist dabei so gering, dass unter optimalen Bedingungen End Nodes bis zu 10 Jahre ohne Batteriewechsel betrieben werden können. Das führt zu sehr geringen Betriebskosten. Diesen Vorteilen gegenüber steht allerdings der Nachteil der geringen Bandbreite. Es können dauerhaft keine großen Datenmengen übertragen werden. Auch die Datenrate ist trotz Anpassungsfähigkeit limitiert. Zudem wird durch die Technologie aufgrund der typischen Anwendung für eine Vielzahl an Sensoren, die Uplink-Richtung unterstützt. Downlinks sind je nach End Node nur in sehr begrenztem Umfang möglich, oder verschlechtern stark die Batterielebensdauer. [22]

Zwei weitere Vorteile dieser Technologie, vor allem bei Blick auf das Ausrollen des IoT, ist die Basis auf einem offenen Standard, sowie die Möglichkeit der Integration und Verwaltung einer hohen Zahl an Endgeräten in einem Netzwerk. So kann unabhängig von Herstellern und ohne Lizenzkosten beinahe jeder das Netz erweitern und ausbauen. Auch die Nutzung von Community-Netzwerken spielt dabei eine wichtige Rolle. Diese helfen beim flächendeckenden Ausbau der Technologie und ermöglichen die einfache Nutzbarkeit der Technologie für Personen, die selbst kein Gateway besitzen. [18, 22]

In Tabelle 6 sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der Technologie LoRaWAN zu finden.

Tabelle 6: Vor- / Nachteile von LoRaWAN

Vorteile	Nachteile
Geringer Energieverbrauch (Batterielebensdauer Nodes bis zu 10 Jahre)	Limitierte Datenrate
Mittlere Reichweite	Downlink-Nachrichten nur eingeschränkt unterstützt
Geringe Betriebskosten	Nicht für umfangreiche Datenübermittlung geeignet
Offener Standard, ermöglicht Unabhängigkeit von Herstellern und spart Lizenzkosten	

2.4 SigFox

2.4.1 Funktionsprinzip

Die Sigfox-Netzwerkarchitektur weist eine Sterntopologie auf. Wie die Abbildung 12 zeigt besteht das SigFox Netzwerk aus zwei wesentlichen Bereichen: der Netzwerkausrüstung und dem Unterstützungssystem.

Die Netzwerkausrüstung besteht dabei aus Devices, (z.B. Sensoren oder Aktoren) welche drahtlos über Basisstationen miteinander verbunden sind. Diese sind für den Empfang von Nachrichten von Geräten und deren Übermittlung an die Sigfox-Systeme zuständig und können etwa eine Million Devices gleichzeitig verwalten.

Das Unterstützungssystem bildet das Kernnetzwerk und ist für die Verarbeitung der Nachrichten und den Versand an das Kundensystem zuständig. Dabei handelt es sich um eine Datenplattform, in welcher die empfangenen Nachrichten verarbeitet werden und weiter an den Kunden gelangen. [25]

Die SigFox S.A. wurde 2010 von Ludovic Le Moan und Christophe Fourtet gegründet. Dabei verfolgten sie die Vision, jedes Objekt in unserer physischen Welt mit dem digitalen Universum zu verbinden. Die beiden französischen Gründer bauten ein globales Netzwerk für das Internet der Dinge auf, das die Eigenschaften eines geringen Stromverbrauchs, einer großen Reichweite und kleinen Datenmengen besitzt. Mit diesen Eigenschaften ist das 0G-Netz entstanden. Das SigFox-Netzwerk wird dabei von lokalen Sigfox-Betreibern verwaltet und als reine Dienstleistung angeboten. [26]

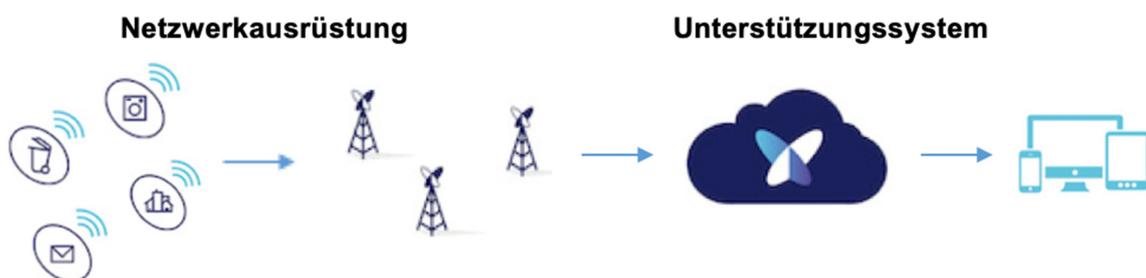


Abbildung 12: Aufbau SigFox-Netzwerk (Quelle: eigene Darstellung)

Der Lebenszyklus einer SigFox-Nachricht weist immer den gleichen Ablauf auf und durchläuft dabei die einzelnen Stationen der Abbildung 12.

1. Ein Gerät „wacht auf“ und sendet über seine Funkantenne eine Nachricht

2. Mehrere Sigfox-Basisstationen in der Umgebung empfangen die Nachricht
3. Die Basisstationen senden die Nachricht an die Sigfox Cloud
4. Die Sigfox Cloud sendet die Nachricht an die Plattform des Kunden [27]

Für die Nachrichtenübertragung verwendet SigFox, um eine hohe Reichweite zu erreichen und gleichzeitig die Sendeleistung zu begrenzen, sowohl für den Uplink als auch für den Downlink die Ultra Narrow Band-Funkübertragung. Die Übertragung ist höchst störfest und sowohl gegen reguläre Störgeräusche als auch mutwillige Störung geschützt.

Das verwendete Band hängt dabei vom Standort ab: In Europa liegt es zwischen 868 und 868,2 MHz. Sigfox nutzt dabei nur 192 kHz des öffentlich zugänglichen Bandes zum Austausch von Nachrichten. Jede Nachricht ist dabei nur 100 Hz breit und wird je nach Region mit einer Datenrate von 100 oder 600 Bit pro Sekunde übertragen. [28]

Sigfox-Nachrichten können eine Nutzlast von höchstens 12 Bytes enthalten. Die Datengröße kann somit von 0 bis 12 Bytes variieren. Trotz der begrenzten Nutzlastgröße, kann mit 12 Bytes viel getan werden.

Das folgende Beispiel in Tabelle 7 zeigt, wie 12 Bytes strukturiert werden können. Eine Nachricht kann demnach einen Satz von GPS-Koordinaten zusammen mit der Batteriespannung, der Anzahl der empfangenen Satelliten, der Erfassungszeit und der Geschwindigkeit beinhalten.

Tabelle 7: Beispiel Strukturierung SigFox-Nachricht

Byte-nummer	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Byte-Nutzung	geo. Breite			Längen-grad				Batterie-spannung	Satelliten (Anzahl empfangender Satelliten)	Erfassungszeit	Geschwindigkeit	

Somit reicht diese Größe vollkommen aus, um Sensordaten, ein Status-Event – beispielsweise einen Alarm – und Geoinformationen oder sogar Applikationsdaten zu übertragen. [29]

Da die aktuelle Version von SigFox öffentliche Funkfrequenzen verwendet, halten diese sich an Freigaberegeln der verschiedenen Regionen der Welt. Diese Bestimmungen dienen dazu, diese Frequenzbänder für alle verfügbar zu halten. In Europa beispielsweise erlaubt die

Verordnung, Geräten auf diesen Frequenzen, 1% der Zeit pro Stunde (d.h. 36 Sekunden) Nachrichten zu senden. Um den geltenden Vorschriften zu entsprechen, können Sigfox-Geräte somit nur eine Anzahl von 140 Nachrichten pro Tag senden (Uplink-Nachrichten) und zusätzlich vier Nachrichten empfangen (Downlink-Nachrichten). [26]

SigFox hat um weiter Kosten einzusparen ein eigenes Kommunikationsprotokoll für kleine Nachrichten entworfen. Die ist unterteilt in ein Protokoll für die Uplink-Nachrichten und die Downlink-Nachrichten.

Für die Uplink-Nachrichten kommt das Uplink Protocol Stack zum Einsatz. In diesem wird geregelt, wie eine Nachricht von einem Endgerät an die Basisstationen verschickt wird. Die Kommunikation wird von einem von oben nach unten laufenden Schichtmodell dargestellt. Die Nachricht startet ganz oben von der Anwendungsebene mit dem Inhalt der zu übertragenden Daten und durchläuft die Ebenen bis ganz unten zur physikalischen Übertragungsebene, in der die Informationen auf die Trägerfrequenz moduliert werden.

Der Nachrichtenempfang wird über den Downlink Protocol Stack geregelt. Entscheidend für eine Downlink-Übertragung ist, dass diese grundsätzlich von dem Endgerät eingeleitet wird, das den Download erhalten soll. Dadurch sind die Downloads im Netz energiesparend für das Device, da es nicht ständig empfangsbereit sein muss. [30]

Die Reichweite beträgt durchschnittlich 10 km in einer städtischen Umgebung und 40 km in einer ländlichen Umgebung. Die Abdeckung kann beispielsweise mithilfe von Netzwerk-Repeater oder der Micro-Base-Station weiter ausgebaut werden.

Der Energiebedarf ist im SigFox-Netzwerk sehr gering. SigFox-Kits benötigen im aktiven Betrieb zwischen 20 mA und 50 mA und im inaktiven Zustand liegt der Stromverbrauch nahe Null. Durch diese geringen Leistungswerte haben batteriebetriebene Devices die lediglich mit zwei AA-Batterien arbeiten, eine Batterielaufzeit von bis zu 10 – 15 Jahren, da sie nur aktiv werden, wenn sie eine Nachricht senden und dann direkt wieder in den Ruhezustand zurückkehren. [26]

Mit diesen Eigenschaften, hat SigFox eine Technologie und ein Netzwerk konzipiert, dass den Anforderungen von Massen-IoT-Anwendungen entspricht. In Abbildung 13 ist ein Sig-Fox-Modul zu sehen. Hierbei werden die Größenverhältnisse auch gut sichtbar.



Abbildung 13: SigFox-Modul (Quelle: murata.com)

2.4.2 Verwendung

SigFox kann in viele unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden. Einer der wichtigsten Märkte, den die Technologie vertritt, stellt dabei das Asset-Tracking in der Lieferkettenlogistik dar. [31]

Andere Einsatzmöglichkeiten sind in Smart Cities für die Suche nach einem freien Parkplatz über GPS-Daten oder für die Überwachungen der Luftqualität. SigFox ist auch für den Gebrauch im eigenen Heim geeignet. Hier können Rauchmelder oder das Halsband des Tieres verbunden werden. [32, 33]

2.4.3 Kosten

Da das SigFox-Netz als Dienstleistung bereitgestellt wird und es nicht möglich ist ein eigenes Netzwerk zu erstellen, entfallen die Gateway-Kosten komplett.

Um ein Gerät mit der SigFox Konnektivität auszustatten ist demnach nur ein Entwicklungskit notwendig, in welche die notwendige Software bereits integriert ist. Hierfür hat SigFox über 50 Anbieter und Händler, die die entsprechenden Kits verkaufen. Je nach Funktion und Funkkonfiguration für das entsprechende Land, variieren die Preise stark zwischen den Anbietern, was in der Tabelle 8 zu sehen ist. Bei einzelnen SigFox-Modulen liegt der Preis nur bei 1 - 2€, Tendenz sinkend. [34]

Bei den laufenden Kosten müssen die Netzwerkabonnements berücksichtigt werden. Das Geschäftsmodell von SigFox basiert auf jährlichen Abonnements, die von Kunden bezahlt werden, um eine Verbindung zum Service zu bekommen.

Die aktuellen Kosten beim Abonnement für die SigFox-Konnektivität hängen von zwei Hauptfaktoren ab: der Anzahl der Nachrichten, die täglich gesendet werden und der Anzahl der Geräte, die verbunden werden sollen. Die Abonnements erhält man direkt mit den Device-Kits. Dabei ist das erste Jahr immer kostenlos. Danach liegen die Kosten bei 1 bis 2€ pro Jahr und Gerät. [35]

Alles in allem ist das Sigfox-Netzwerk so konzipiert und optimiert, dass es sehr kostengünstig ist.

Tabelle 8: Kosten SigFox

Anbieter Beispiele	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
Entwicklungskit Arduino	34,64 €	0,02 – 0,16 €
Entwicklungskit Yadom Zen Technology	23,88 €	0,02 – 0,16 €
Entwicklungskit Société Nationale des Objets Connectés (SNOC)	59,40 €	0,02 – 0,16 €
SigFox - Modul	1 – 2 €	0,02 – 0,16 €

2.4.4 Vor- und Nachteile

Die größten Vorteile der Technologie sind, bei geringen Kosten und Energieverbrauch trotzdem eine extrem große Reichweite zu erreichen. Durch die Möglichkeit, dass eine Basisstation eine Verbindung zu hunderttausende Devices herstellen kann, lohnt es sich auch Objekte mit einfachen Funktionen in das Netzwerk zu integrieren. Somit können ganze Städte vernetzt werden und es entstehen Smart Cities. [26, 36]

Nachteile der Technologie sind, dass nur niedrige Datenraten und eine begrenzte Anzahl Nachrichten über die Technologie verschickt werden können. Trotz der eher kleinen Nachrichten ist nur eine langsame Übertragungszeit möglich, deshalb kann eine Nachricht vom Start bis zum Ziel bis zu 25 Sekunden brauchen.

In der Tabelle 9 sind weitere Vor- und Nachteile aufgelistet.

Tabelle 9: Vor- / Nachteile von SigFox

Vorteile	Nachteile
Geringe Kosten	Niedrige Datenrate
Mittlere Reichweite	Begrenzte Nachrichtenanzahl
Geringer Stromverbrauch	Dienstleister – kein eigenes Netzwerk kann aufgebaut werden
Geringe Infrastruktur notwendig	Abonnement notwendig
Freie Frequenzbänder können genutzt werden	Langsame Übertragungsgeschwindigkeit
Verbindung zu Hunderttausenden Devices möglich	Infrastruktur ist lückenhaft
Keine SIM-Karten notwendig	
Keine Verträge mit Mobilfunkanbietern	

2.5 Bluetooth Low Energy

2.5.1 Funktionsprinzip

Bei Bluetooth Low Energy (BLE) handelt es sich um eine Anwendung mit einem sehr geringen Energieverbrauch im Gegensatz zur herkömmlichen Bluetooth Nutzung. [37]

Das standardisierte Bluetooth wurde 1994 erstmals zusammen von den beiden Herstellern Nokia und Ericson entwickelt, um auf Kurzstrecken Daten austauschen zu können, ohne dass dabei ein großer Aufwand entsteht. Zum herkömmlichen Bluetooth zählen die Versionen 1.0 bis 3.0. [38]

Nach diesen Vorgängermodellen wurde mit den Versionen 4.0, 4.1 und 4.2 schließlich die Bluetooth Low Energy, beziehungsweise die stromsparende Variante ins Leben gerufen. [38]

Bluetooth Low Energy arbeitet auf Basis einer typischen Bluetooth-Architektur. Diese ist aufgebaut aus einem Host-CPU und einem Controller. Diese beiden Anwendungen sind über das Host-Controller-Interface (HCI) miteinander verbunden. Die Controller Hardware steht in zwei unterschiedlichen Ausführungen zur Verfügung. Zum einen die Single-Mode-Geräte. Diese Variante unterstützt lediglich die Bluetooth Low Energy Anwendung. Zum anderen die Dual-Mode-Geräte. Diese unterstützen das standardisierte Bluetooth und die Bluetooth Low Energy Anwendung. Zur Veranschaulichung sind die beiden Fälle in Abbildung 14 dargestellt. Die linke Abbildung zeigt den Single-Mode und die rechte Abbildung den Dual-Mode. [39]



Abbildung 14: Bluetooth Architektur (Quelle: elektroniknet.de)

Die Single-Modes werden zum Großteil in Sensoren eingebaut, wohingegen die Dual-Modes in Smartphones und Tablets ihren Gebrauch finden. In Abbildung 15 ist ein BLE Tag abgebildet. Die Darstellung ermöglicht eine Einschätzung, wie klein die Tags sind. [39]

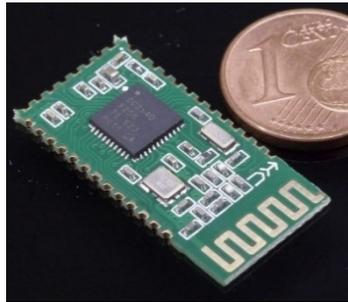


Abbildung 15: BLE Tag (Quelle: modulink.de)

BLE arbeitet abhängig von der Verbindungsart mit unterschiedlichen Rollenzuweisungen für die Geräte. Bei verbindungsloser Übertragung werden die Rollen „Broadcaster“ und „Observer“ vergeben. Der Broadcaster sendet dabei nur Anfragen aus. Der Observer ist lediglich der Empfänger für den Broadcaster. Zwischen den Beiden wird keine Verbindung initiiert. [39]

Bei verbindungsorientierter Übertragung werden die Rollen „Peripheral“ und „Central“ genutzt. Die verbindungsorientierte Variante lässt ihre Geräte entweder als Master oder Slave arbeiten. Wenn sich eine Verbindung zwischen zwei Geräten aufgebaut wurde (z.B. zwischen Smartphone und Beacon), erzeugen diese ein Wireless Personal Area Network (Piconet), bei dem eine Punkt-zu-Punkt Verbindung aufgebaut wird. Bei dieser Verbindung kann ein Austausch von Daten von bis zu acht Geräten stattfinden. Ein Gerät übernimmt dabei die „Master“ Funktion, welches die Kommunikation steuert. Diese Geräte sind in der Central Rolle und sind üblicherweise Smartphones oder Tablets. Die anderen Geräte übernehmen hingegen die „Slave“ Funktion. Bei diesen Geräten handelt es sich um die Peripheral Rolle, welche Anfragen senden, die zu einer Verbindung führen. Dabei versendet zuerst der Master an den Slave, der dann die Daten vom Slave erhält. Wird der Slave nicht angesprochen befindet er sich im Ruhezustand, um Energie zu sparen. [39–41]

Durch die neueste Version des Bluetooth 5.0 wurde ein Bluetooth-Netzwerk entwickelt. Dadurch ist es möglich mit wesentlich mehr Geräten zu kommunizieren. Dies wird erreicht durch den Einsatz von Maschennetzwerken (eine Gruppe von unabhängigen Piconets), die mindestens ein Bluetooth-Gerät gemeinsam enthalten. In diesem Netzwerk kommuniziert nicht ein zentrales Gerät mit einzelnen Geräten an der Peripherie, stattdessen wird eine Nachricht von einem Punkt des Netzwerks zu allen anderen weitergeleitet, die mehrere Knoten miteinander verbinden. Mit dieser Funktion ist es somit möglich Daten von Gerät zu Gerät zu schicken und damit Kilometerweite Netze zu realisieren. [38, 42–44]

Um die genaue Funktionsweise der BLE-Anwendung definieren zu können, ist es notwendig zwischen drei wichtigen Aspekten zu unterscheiden, welche alle zur vollständigen Funktion beitragen. Dabei handelt es sich um die sogenannten BLE-Beacons (BLE-Chips), ein Bluetooth fähiges Smartphone und die auf dem Smartphone hinterlegten Applikationen. [45]

BLE Beacons sind kleine, meist batteriebetriebene Geräte, welche die Größe einer Streichholzschachtel aufweisen und auf der Basis der BLE-Anwendung funktionsfähig sind. Diese Beacons senden ununterbrochen über Bluetooth 4.0 gleichbleibende Informationen. Die Informationen, die dabei gesendet werden, sind aus einer festen Zahlenfolge aufgebaut, durch die eine genaue Identifikation der Beacons möglich ist. [45–47]

Auch Apple hat sich mit dieser Anwendung vertraut gemacht und hat die wohl bekanntesten Beacons mit dem Namen iBeacons entwickelt. Mittels der iBeacons werden vier Nachrichten übertragen:

- Die UUID – Universally Unique identifier:
 - Hierbei handelt es sich um eine Zeichenfolge aus 32 Zeichen, welche durch Bindestriche in fünf Einheiten unterteilt werden. Dies sieht beispielsweise folgendermaßen aus „f07853-376282-34a421-er37892b-243n1“. Mit Hilfe dieser Zeichenfolge erfolgt die Zuordnung der Beacons.
- Die Zahlenwerte Major und Minor:
 - Diese Werte bestehen aus 5 Zahlen und können vom Betreiber bestimmt werden (zB. 28643 und 78923). Meist wird diese Funktion verwendet, um einzelne Untergruppen zu bilden.

Aus diesen drei genannten Werten entsteht dann die Beacon-ID. Zusätzlich wird dann ein Indikator für die Sendeleistung zugeschrieben. Diese Sendeleistung befindet sich im sogenannten TX- Power-Level und wird in Dezibel Milli-Watt angegeben. [45]

Ein Beacon kann dann an einem bestimmten Ort verwendet werden und sendet dabei dauerhaft Signale aus. Die Reichweite dieser Beacons beträgt ca. 100 Meter bei Versionen der Bluetooth 4 Reihe. Durch Verbesserungsmaßnahmen ist jedoch möglich durch die Bluetooth 5.0 Version Reichweiten von bis zu 2 Kilometer zu erzeugen. Die Reichweite ist jedoch stark von der Umgebung abhängig und kann daher variieren. [44, 45]

Die Signale, welche von den Beacons gesendet werden, können von Smartphones mit aktiver Bluetooth-Einstellung erkannt werden. Daher kann das Smartphone feststellen, welche Beacon-ID sich wo befindet. Außerdem kann die Sendeleistung mit der der Beacon sendet erkannt werden. [45]

Die Funktion lässt sich mit Hilfe folgender Abbildung 16 veranschaulichen. Einfach gesagt funktioniert BLE durch die Kommunikation zwischen dem Smartphone und der Beacons.

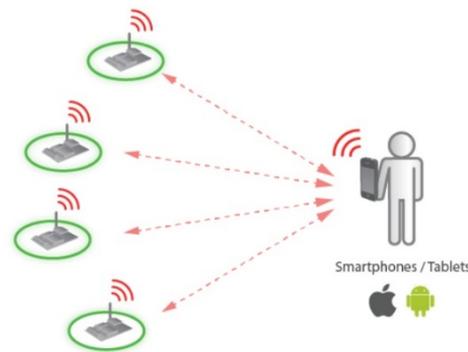


Abbildung 16: Funktion BLE (Quelle: Libelium, 2013)

BLE verwendet bei der dem Übertragungsverfahren das ISM-Band im Bereich von 2,402 und 2,48 GHz. Bei der reinen Übertragung von Sprach-Daten wird sowohl im Upload als auch im Download 432,6Kbit/s übertragen. Beim Datenaustausch hingegen (Fotos, Videos, Musik) hat die Verbindung 723,3 Kbit/ im Download und 57,6 Kbit/s im Upload. Mit der Version 5.0 ist es möglich eine Doppelte Geschwindigkeit von 1 Mbit/s auf 2 Mbit/s auszubauen. [38]

2.5.2 Verwendung

Durch den geringen Energieverbrauch ist es möglich, ein Gerät über Monate oder sogar über Jahre hinweg mit derselben Batterie zu betreiben, ohne dass diese ausgetauscht werden muss. Daher findet diese Anwendung in vielen unterschiedlichen Bereichen Gebrauch. Dazu zählen unter anderem der Fitness-, der Medizin, der Industrie- und der Sensorbereich. [38, 39]

2.5.3 Kosten

Die Kosten für eine BLE-Lösung setzen sich aus wenigen Bestandteilen zusammen, welche für die Funktion benötigt werden. Zunächst muss ein funktionsfähiges Smartphone oder Tablet mit vorhandener Bluetooth Low Energy Funktion zur Verfügung stehen. Außerdem werden die BLE Beacons oder die iBeacon Version benötigt. Des Weiteren ist es notwendig eine Software zu installieren, mit der die Daten dann letztendlich auf dem Smartphone oder Tablet ausgewertet werden. Die Kosten für die BLE Beacons, iBeacons und der Software können je nach Hersteller variieren. In Tabelle 10 ist eine Kostenübersicht für verschiedene Versionen aufgezeigt.

Tabelle 10: Übersicht über die Kosten bei Bluetooth Low Energy

	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
Hardware BLE Beacon	Von 27,50 €/ST bis 70 €/ST	
Software App		0 € - 45 €

2.5.4 Vor- und Nachteile

Die BLE-Anwendung hat sowohl einige Vorteile als auch Nachteile, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Der bedeutendste Vorteil dieser Applikation ist der geringe Energieverbrauch. Ein Verbindungsaufbau erfolgt bereits mit ca. 10 mW. Außerdem verfügt BLE über eine größere Reichweite als die herkömmliche Bluetooth Anwendung bei der man von ca. 10 Metern ausgehen kann. Die Reichweite des BLE ist zwar abhängig vom jeweilig verwendeten Chip, dennoch können dabei Reichweiten von 10 – 50 Meter erreicht werden. Des Weiteren verfügt BLE über einen sehr schnellen Datentransfer. Es dauert lediglich 3 ms um eine neue Verbindung aufzubauen. [41, 48, 49]

Ein Nachteil ist unter anderem, dass, die Reichweite stark von der Umgebung abhängig ist. So wird diese beispielsweise in der Nähe von Gebäude stark gedämpft. Im Vergleich zu anderen Technologien befindet sich BLE bezüglich der Reichweit im Mittelfeld und kann somit bei einigen Anwendungen in diesem Bereich nicht mithalten. [48]

Ein Nachteil entfaltet sich auch hinsichtlich Smartphones und Tablets die über eine Bluetooth Version verfügen, welche älter als die Version 4.0 ist. Diese Geräte haben die BLE-Funktionen nicht automatisch integriert. [38]

In der folgenden Tabelle sind die genannten Vor- und Nachteile nochmals übersichtlich dargestellt.

Tabelle 11: Vor- / Nachteile bei BLE

Vorteile	Nachteile
Geringer Energieverbrauch (ca. 10 mW)	Reichweite ist stark von der Umgebung abhängig
Reichweite größer als bei der herkömmlichen Bluetooth-Anwendung (10 – 50 Meter)	Ältere Smartphone-/ Tabletmodelle verfügen nicht über die integrierte BLE-Funktion (älter als Bluetooth Version 4.0)
Schneller Datentransfer (ca. 3ms)	

2.6 ZigBee

2.6.1 Funktionsprinzip

ZigBee ist ein weit verbreiteter Standard für drahtlose Kommunikationsnetzwerke, hauptsächlich verwendet in IoT-Geräten mit geringem Stromverbrauch und niedriger Datenübertragungsrate. Die sogenannte „ZigBee Alliance“, bestehend aus über 400 Firmen, nutzt und entwickelt das ZigBee-Protokoll. Zu diesen Firmen zählen unter anderem Phillips, SiLabs und Texas Instruments. Der Name ZigBee gilt als Anlehnung an den ZickZack-Tanz von Bienen auf Nahrungssuche, da es in diesem Tanz Parallelen zum Datenverkehr bei ZigBee gibt. [50, 51]

Das ZigBee-Verfahren basiert auf der IEEE 802.15.4. Norm (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Diese befasst sich mit den Standardspezifikationen für eine Reihe von drahtlosen Netzwerken. Die Topologie, Bandbreite und mögliche Geräte werden von der Norm spezifiziert. [52]

Betrachtet man die Netzwerktopologie ist sowohl eine Stern-Topologie, als auch eine Peer-to-Peer-Topologie möglich. Unabhängig davon welche Variante gewählt wird, besitzt jedes Netzwerk einen PAN-Coordinator (Personal Area Network). Dieser eröffnet über eine Identifikationsnummer ein persönliches Netzwerk. Bei der Peer-to-Peer-Topologie fungiert, wie in der Abbildung 17 darstellt, jedes im Netzwerk verbundene Gerät jeweils als Sender und Empfänger. Somit ist jeder Teilnehmer ein Repeater für die benachbarten Geräte. Verwendet man die Stern-Topologie ist eine Kommunikation der verbundenen Geräte untereinander nicht möglich und die Geräte können nur mit dem PAN-Coordinator kommunizieren. [50]

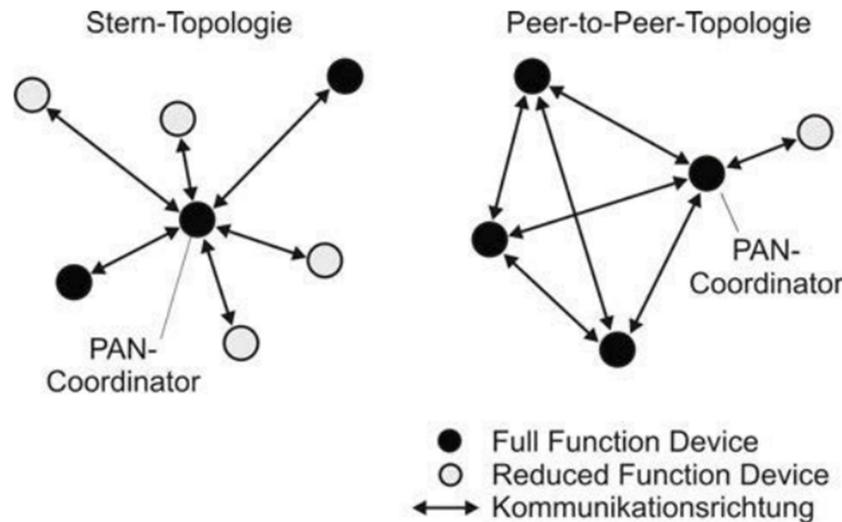


Abbildung 17: Netzwerk-Topologie [50]

In einem ZigBee Netzwerk können drei Arten von Komponenten unterschieden werden: PAN-Coordinator, Router und End Devices. Der PAN-Coordinator eröffnet wie bereits beschrieben das Netzwerk. Ein Router wird zur Vergrößerung der Reichweite des Netzwerks genutzt und gilt als Full Functional Device. Das End Device ist zumindest ein Reduced Function Device und verbindet sich mit dem Router oder direkt mit dem Coordinator. Der Router ist somit nicht zwingend notwendig und eine ZigBee-Umgebung besteht je nach Komplexität aus einem Coordinator, mehreren End Devices und wahlweise einem oder mehreren Routern. Abbildung 18 zeigt ein ZigBee End-Device im Größenvergleich. [50]

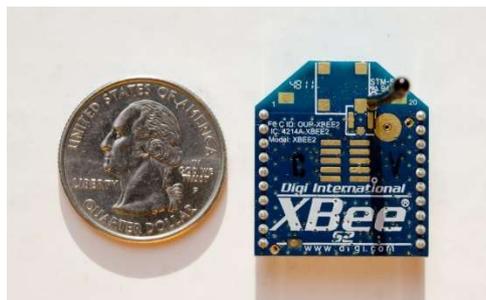


Abbildung 18: ZigBee End-Device (Quelle: wikipedia.org)

Die Funktionsweise zeichnet sich dadurch aus, dass sich nach dem Starten des Netzwerks durch den Coordinator andere Funkmodule anmelden können. Hierdurch entstehen ein großflächiges Netz und die Reichweite kann verbessert werden. Dieses großflächige Netzwerk ermöglicht auch einen Pfadwechsel im Falle von Komponentenausfällen. [53]

Die Frequenz wird im lizenzfreien Bereich auf den ISM-Bändern (Industrial, Scientific and Medical Band) 868 MHz, 915 MHz und 2,4 GHz übertragen. Die maximale Datenübertra-

gungsrates liegt bei 250 kbit/s. Die Kommunikation über ZigBee ist verschlüsselt und abhörsicher. [54]

2.6.2 Verwendung

Wie auch andere funkgesteuerte Technologien eignet sich ZigBee besonders für Sensornetze, Smart Home und medizinische Anwendungen. Vor allem im Bereich Smart Home findet ZigBee häufig Anwendung, da die meisten großen Hersteller von Haushaltsgeräten mit dieser Art der Vernetzung arbeiten. Eine aufwendige Installation ist nicht erforderlich, da die Kommunikation drahtlos erfolgt. Eine Nachrüstung oder ein Umzug stellt ebenso kein Problem dar. Ein gutes Anwendungsbeispiel für den Einsatz von ZigBee sind gesteuerte Lampen. Diese können über eine App in ihrer Intensität oder Leuchtfarbe gesteuert werden. [54]

2.6.3 Kosten

Da es sich bei ZigBee um eine Allianz aus vielen Firmen handelt, kann die Liste dieser Firmen auch größtenteils als Übersicht der Anbieter von ZigBee-Komponenten genutzt werden. Im Hinblick auf die Kosten unterscheiden sich die Teile je nach Einsatzgebiet, Sendeleistung und Frequenz. Für die kleinstmögliche ZigBee Umgebung ist ein Router nicht zwingend notwendig, dieser wird aber in der Kostenbetrachtung dennoch mit aufgeführt. Fertige SmartHome-Lösungen wie Beleuchtungssysteme fallen hingegen aus der Betrachtung, da diese nur für einen spezifischen Anwendungsfall geeignet sind.

Tabelle 12: Übersicht über die Kosten bei ZigBee

	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
Coordinator	35 € bis 500 €	
Router	20 € bis 150 €	
End-Device	Ab 10 €	
App	Kostenlos	Kostenlos
Implementierungssoftware	Kostenlos	Kostenlos

2.6.4 Vor- und Nachteile

ZigBee ist einer der energie-effizientesten Heimvernetzungs-Funkprotokolle und bietet vor allem in diesem Anwendungsfeld viele Vorteile. Es wurde speziell für einen minimalen Energieverbrauch und eine damit einhergehende lange Batterielaufzeit entwickelt. ZigBee ist nur für eine Übertragung von geringen Datenmengen ausgelegt. Damit ist die Kommunikation energieeffizient. Die Reichweite beträgt zwischen 10 und 100 m, wobei die maximale Reichweite nur im Idealfall erreicht wird. Die Reichweite ist aber für die Anwendungsgebiete vollkommen ausreichend, da es sich bei ZigBee, wie bereits beschrieben, um eine Peer-To-Peer-Topologie handelt. Dies hat als Folge, dass sich die Reichweite mit jedem weiteren Gerät vergrößert. Zudem überzeugt das gesamte Netzwerk durch eine hohe Zuverlässigkeit und Effizienz, da bei einem Ausfall eines einzelnen Datenpfades alternative Routen zur Datenübertragung genommen werden können. Die Vernetzung untereinander geschieht selbständig durch die einzelnen Komponenten. [54]

Tabelle 13: Vor- / Nachteile von ZigBee

Vorteile	Nachteile
Energieeffizient	Limitierte Datenrate
Batterielaufzeit	Geringe Reichweite
Peer-to-Peer Möglichkeit	
Zuverlässigkeit	
Selbstständige Vernetzung unter den Geräten	
Unkomplizierte Installation	
App-Steuerung möglich	
Verschlüsselt und abhörsicher	
Keine laufenden Kosten	

2.7 Wireless Local Area Network

2.7.1 Funktionsprinzip

Wireless Local Area Network (WLAN) basiert im Wesentlichen auf LAN-Standards, die für die drahtgebundene Vernetzung von Computern entwickelt wurden. Der Standard IEEE 802.11 definiert die drahtlose Übertragungstechnik. WLAN verwendet Funkwellen zur Übertragung von Daten. Dabei sendet WLAN auf dem 2,4-GHz-ISM- oder 5-GHz-Frequenzband. Neben WLAN sendet ebenfalls Bluetooth Low Energy auf dem 2,4-GHz-Frequenzband, sodass Interferenzen entstehen können. WLAN ermöglicht Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 6,93 Gbit/s im Downlink und einer geringeren Geschwindigkeit im Uplink. Dies sind die optimalen theoretischen Angaben, sodass in der Praxis, wie bei [55] gezeigt, eine Reduzierung der Geschwindigkeiten zu erfassen ist. [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#) WLAN unterstützt verschiedenste Netzwerktopologien. Im 2,4-GHz-Frequenzband existieren insgesamt vierzehn 5 MHz-Kanäle. In Europa werden 13, in den USA 11 und in Japan 14 Kanäle genutzt. Die Kanäle werden aneinandergereiht und zu einem breitbandigem 20 MHz oder breitbandigerem Kanal zusammengefasst. Da sich die Kanäle überlappen, können nicht alle Kanäle verwendet werden, sondern je nach Kanal-Verteilung nur drei oder vier bei einer Kanalbreite von 20 MHz. Neben der Kanalbreite von 20 MHz sind Kanalbreiten von 40 MHz und bei 5 GHz von 80 MHz und 160 MHz typisch für WLAN. Der Standard IEEE 802.11 definiert zahlreiche Weiterentwicklungen des in den neunziger Jahren entstandenen Standards für Wireless LAN. Alle Varianten des Standards sind mit IEEE 802.11 gekennzeichnet, gefolgt von einem oder zwei Buchstaben, die Eigenschaften wie Geschwindigkeit, Reichweite und Sicherheitsmerkmale kennzeichnen. Die Varianten unterscheiden sich in der physikalischen Schicht und somit den Eigenschaften der Übertragung. Tabelle 14 stellt die Standards mit dem genutzten Frequenzband und der maximalen Übertragungsgeschwindigkeit gegenüber. [56] [57]

Tabelle 14: WLAN-Spezifikationen (Quelle: Sauter, 2018)

Standard	Frequenzband (landesabhängig)	Theoretische Maximalgeschwindigkeit
802.11b	2,4 GHz (2,401–2,483 GHz)	1–11 Mbit/s
802.11g	2,4 GHz (2,401–2,483 GHz)	6–54 Mbit/s
802.11a	5 GHz (5,150–5,350 GHz und 5,470–5,725 GHz)	6–54 Mbit/s
802.11n	2,4 GHz (wie oben) 5 GHz (wie oben)	6–600 Mbit/s
802.11ac	5 GHz (wie oben)	bis zu 6,93 Gbit/s

Der Standard 802.11b war der Durchbruch des WLANs, mit welchem Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 11 Mbit/s erreicht werden. Die Übertragungsrate ist abhängig von

der Anzahl der Hindernisse und der Entfernung zwischen Sender und Empfänger. Das ISM-Band beschränkt die maximale Sendeleistung auf 100 mW im Frequenzband von 2,4 GHz und im Frequenzband von 5 GHz auf 1 W. Die folgenden Standards erzielen eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit und nutzen neben dem 2,4-GHz- zudem das 5-GHz-Frequenzband. Zum heutigen Zeitpunkt hat der 802.11n Standard die größte Verbreitung, wohingegen neuere Geräte bereits den 802.11ac Standard unterstützen. Die Reichweite beträgt hierbei zwischen 50 und 100 Metern. Im Jahr 2020 ist das IEEE 802.11ax, auch Wi-Fi 6 genannt, angekündigt. Dies soll die Effizienz von WLAN bei einer hohen Teilnehmerdichte verbessern und somit die Übertragungsgeschwindigkeit zur Vorgängerversion vervierfachen. [58] Insbesondere für die Maschine zu Maschine-Kommunikation wurde der Standard IEEE 802.11ah (WiFi HaLow) definiert. Dieser wird in einem Frequenzbereich von 863-868 MHz in der EU realisiert und dient zur Funkverbindung mit hoher Reichweite bis zu 1 km. Dieser Standard konkurriert somit mit BLE und ZigBee um den Einsatz im Smart Home und den Sensornetzwerken. [59] Neben diesem speziellen Standard existiert ein weiterer Standard. Der Standard IEEE 802.11s wurde für die Nutzung von Mesh-Netzwerken eingeführt. In einem Mesh-WLAN bildet jedes Gerät eine eigene Funkzelle. Jedes Gerät baut somit automatisch eine Verbindung zu den in Reichweite stehenden Geräten auf. Bei den zuvor genannten WLANs berühren sich die Funkzellen nur selten. [60]

Das Funknetzwerk beginnt meist bei einem zentralen Punkt, der sogenannten Basisstation. Diese Basisstation kann ein Access Point (AP), ein WLAN-Router oder ein Gateway sein. Bei WLAN lassen sich zwei Betriebsarten unterscheiden. Es kann zwischen dem Ad-hoc-Modus, dem Infrastruktur-Modus gewählt werden. Beim Ad-Hoc-Modus erfolgt die Kommunikation zwischen zwei Clients über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Somit weisen diese Netze keine zentrale Steuerungs- und Verwaltungskomponente auf. Der Infrastruktur-Modus verfügt hingegen über eine zentrale Basisstation, die die zentralen Funktionen übernimmt. An die Basisstationen sind die Clients in Form von Tablets, Smartphones oder anderen Endgeräten angeschlossen. Auf den Basisstationen laufen neben der zentralen Steuerung auch die Verbindungen zu drahtgebundenen Netzen und Mobilfunknetzen. [61]

Abbildung 19 zeigt ein WLAN-Modul, dessen Abmessungen 21,7 x 14,7 x 2,1 mm betragen. Da heute verschiedene Firmen Endgeräte herstellen, ist die Interoperabilität von WLAN Endgeräten sicherzustellen. Daher wurde die Wi-Fi Alliance gegründet, die Geräte zertifiziert. Hierdurch entstand das Logo „Wi-Fi“ zur Zertifizierung, weshalb WLAN auch oft als Wi-Fi bezeichnet wird. [62] [63]



Abbildung 19: WLAN-Modul (Quelle: www.farnell.com)

2.7.2 Verwendung

Der Einsatz von WLAN ist dann sinnvoll, wenn ein hoher Datendurchsatz und somit eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit gefordert sind. WLAN weist im Vergleich zu BLE oder ZigBee eine komplexere Hardware auf, die für einen höheren Energieverbrauch und Kosten sorgt. Typische WLAN-Anwendungen sind die drahtlose Vernetzung von Endgeräten in der Wohnung oder im Haus. WLAN kann zur Lokalisierung in Städten und Gebäuden, in Datenloggern oder in der Landwirtschaft und Medizintechnik angewendet werden. Es ist grundsätzlich besser für größere, stationäre Geräte, die eine direkte Verbindung zum Internet benötigen. Dies ist der Tatsache des hohen Energieverbrauches geschuldet. Für mobile Geräte mit einem begrenzten Energiebedarf ist der Standard IEEE 802.11ah im Vergleich zu den übrigen Standards am energiesparsamsten. Heutige Anwendungen von WLAN beschränken sich überwiegend auf die lokale Vernetzung von Geräten mit dem Internet.

2.7.3 Kosten

Für den Aufbau eines WLAN-Netzwerkes werden verschiedene Komponenten benötigt. Die Art der Komponenten und die Anzahl ergibt sich aus dem jeweiligen Anwendungsfall. Tabelle 15 stellt die Komponenten mit den zugehörigen Kosten dar. Laufende Kosten ergeben sich, wenn das Netzwerk mit dem Internet über Mobilfunknetze oder drahtgebundene Netze verbunden wird. Hierfür wird ein Vertrag mit einem Netzanbieter notwendig. Diese belaufen sich je nach Anwendung auf 5 bis 50 Euro im Monat.

Tabelle 15: Übersicht über die Kosten bei WLAN

	Einmalkosten	Laufende Kosten (pro Monat)
Router	40 € bis 300 €	
Access Point	30 € bis 300 €	
End-Device	10 € bis 150 €	
Internet-Nutzung		5 € bis 50€

2.7.4 Vor- und Nachteile

Die WLAN-Technologie weist sowohl Vor- als auch Nachteile auf, die im Folgenden näher erläutert werden. WLAN besitzt eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit und Bandbreite. Geräte lassen sich einfach in bereits bestehende Netzwerke integrieren. Dem Vorteil der hohen Übertragungsgeschwindigkeiten steht die starke Abhängigkeit dieser Übertragungsgeschwindigkeit von der Anzahl an verbundenen Endgeräten gegenüber. Des Weiteren benötigen Geräte, die WLAN nutzen, einen hohen Energiebedarf. WLAN ist störanfällig gegenüber anderen Geräten, die im 2,4-GHz-Frequenzband kommunizieren. Die Nutzung des 5-GHz-Frequenzbandes der neuen Standards führt hierbei in diesem Aspekt zu einer Verbesserung.

Tabelle 16: Vor-/ Nachteile von WLAN

Vorteile	Nachteile
Hohe Übertragungsgeschwindigkeit	Übertragungsgeschwindigkeit von Anzahl der verbundenen Endgeräte abhängig
Einfach Integration von neuen Geräten	Mittlerer Energiebedarf
WLAN-Schnittstelle in allen Notebooks und Smartphones	Störanfällig

2.8 Satellitenkommunikation

2.8.1 Funktionsprinzip

Die Satelliten, die unsere Erde umkreisen, können in zwei große Bereiche eingeteilt werden – wissenschaftliche Satelliten und Anwendungssatelliten. Im Folgenden geht es um die Anwendungssatelliten. In dem Bereich der Anwendungssatelliten gibt es die Kommunikations-, Fernerkundungs-, Navigations- und Positionierungssatelliten und die metrologischen Satelliten. Die globalen Kommunikationssysteme sind durch die Satellitenkommunikation effektiver, denn es können Telefon, Internet und andere IP-basierten Informationsdienste in über 200 Ländern und Territorien unterstützt werden. Diese Satellitenkommunikationssysteme machen es auch möglich, dass Schiffe, Offshore-Plattformen, Flugzeuge weltweit kommunizieren können, sogar in der Polarregion. [64, S. 4-6] Ein Satellitensystem besteht aus einem Weltraum- und einem Bodensegment. Das Weltraumsegment setzt sich aus Satelliten zusammen. Diese werden eingeteilt nach verschiedenen Erdumlaufbahnen. Es werden im Folgenden nur ein Teil der Erdumlaufbahnen genannt. Viele Satelliten befinden sich in der geostationären Umlaufbahn (GEO), deren Umlaufzeit mit der Erdrotation synchronisiert ist. Ein Beobachter auf der Erde sieht den Satelliten daher immer an der gleichen Position. Daneben gibt es diverse nicht geostationäre Umlaufbahnen (NGEO), wie etwa die mittlere Erdumlaufbahn (MEO) und die niedrige Erdumlaufbahn (LEO). [65] Die verschiedenen Erdumlaufbahnen sind drauf zurückzuführen, dass dadurch verschiedene technische Möglichkeiten genutzt werden können. So unterscheidet sich die Round-Trip-Verzögerung (RTD) in den verschiedenen Erdumlaufbahnen. Diese Verzögerung beschreibt die minimale Antwortzeit eines Netzwerks und ist abhängig von der maximalen Distanz oder der langsamsten Verbindung [66, S. 135]. Bei einer GEO-Satelliten-Verbindung ist eine RTD von 250 bis 800 ms typisch [65, 67]. Dies ist für den Echtzeitkommunikationsverkehr unerwünscht. Bei einem MEO-Satelliten ist die RTD 110 bis 130 ms und bei LEO-Satelliten sind es 20 bis 25 ms. Letzteres kann mit einer terrestrischen Verbindung verglichen werden. Bei MEO/LEO-Satellitensystemen ist die Antenne auf der Erde wesentlich kleiner als im Vergleich zu den anderen Satellitensystemen. Das liegt daran, dass die MEO/LEO-Satelliten näher an der Erdoberfläche sind. Jedoch ist die Ausleuchtzone, d. h. die Fläche auf der Erde von der man die Satellitensignale empfangen und senden kann, wesentlich geringer als bei GEO-Satelliten. Wenn die Ausleuchtzone geringer ist, werden mehr Satelliten benötigt, um eine globale Netzabdeckung zu ermöglichen. So werden zum Beispiel dafür nur drei GEO-Satelliten benötigt, aber eine Serie von LEO-Satelliten. Die kleinen LEO-Systeme sind darauf ausgerichtet terrestrische Daten- und Mobilfunknetze zu ergänzen. Die kleinen LEO-Satelliten umkreisen die Erde in Höhen von 1000 km. Die hauptsächlichen Anwendungsbe-

reiche sind in der Schifffahrt und Transport (Nachrichtenübermittlung und Standortbestimmung) sowie in Telemetrie-Anwendungen. [65]

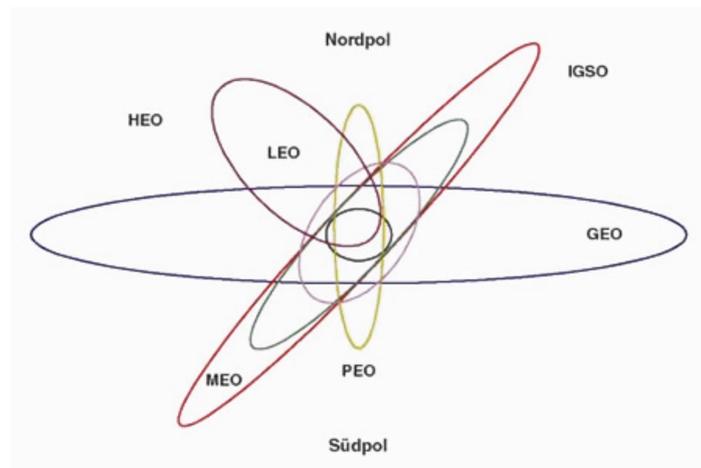


Abbildung 20: Die Erdumlaufbahnen der Satelliten (Quelle: Baldenhofer, 2020, [68])

2.8.2 Angebotene Satellitensysteme

Nachfolgend werden folgende angebotene Satellitensysteme wie Thuraya, Starlink, Iridium, Orbcomm in Partnerschaft mit Inmarsat, vorgestellt. Die dazugehörigen Produkte werden auszugsweise erwähnt. Die dazu erwähnten Preise sind nur eine Orientierung und sind bei Bedarf bei den jeweiligen Händlern nachzufragen. Am Ende der Kapitel der einzelnen Satellitensystemanbieter, werden die Fakten der Anbieter in einer Tabelle zusammengefasst.

2.8.2.1 Thuraya

Das Satellitensystem von Thuraya deckt mit zwei GEO-Satelliten mehr als 160 Länder ab [69]. Thuraya entwickelt Daten- und Sprachsatellitenkommunikationslösungen. Bei einer Verbindung zu einem GEO-Satelliten ist eine Latenzzeit von 800 Millisekunden üblich [20]. Von Thuraya sind vor allem die Satellitentelefone bekannt. So gibt es z. B. das *Thuraya XT-PRO DUAL Satellitentelefon*, dies kann im GSM-Netz kommunizieren und über Satelliten zu einem anderen Satellitentelefon oder zu jedem andern Telefon in terrestrischen Netzen [70]. Das *Thuraya XT-PRO DUAL Satellitentelefon* kostet ca. 955 € [71]. Mit *Thuraya SATSLEEVE+* ist es möglich mit herkömmlichen Smartphones über Satelliten zu kommunizieren, es kostet 509 € [72, 73] Das *Thuraya XT-LITE* ist ein reines Satellitentelefon und kostet 529 € [74]

Doch auch IoT-Lösungen können mit Thuraya verwirklicht werden. Thuraya bietet zur Fernüberwachung und -steuerung ein *T2M-DUAL-Terminal* an. Dieses Terminal ermöglicht eine automatisierte Datenerfassung sowohl über Satelliten- als auch Mobilfunk-Netzwerke (siehe Abbildung 21). Es können Daten von mehreren Punkten gleichzeitig erfasst werden. Diese

Daten können von externen Sensoren, Peripheriegeräten und Eingaben von Fahrzeugmaschinen oder Lastkraftwagen kommen. Durch das automatische Umschalten zwischen, Satelliten- und Mobilfunk-Netzwerk, wird eine stets aktive Abdeckung garantiert. Dadurch, dass die Satellitenverbindung automatisch gewählt wird (d. h. nur, wenn keine Mobilfunk-Abdeckung möglich ist oder es eine Störung im Mobilfunk-Netz gibt), werden Kosten gespart. Eine dauerhafte Satellitenverbindung ist kostenintensiver als eine hybride Lösung, wie es Thuraya bietet. Auch ist der Nutzer unabhängig von terrestrischen Mobilfunk-Netzwerken, die zwar grenzübergreifend bestehen, oftmals aber sogenannte Roaming-Kosten verursachen. So können über Satellit Fahrzeuge und Anlagen über die Grenzen hinweg verfolgt und verwaltet werden. Das erwähnte Terminal ermöglicht die Verfolgung über bereits eingebaute Navigationssysteme, diese sind GPS, Galileo, Glonass und Beidou. Des Weiteren können Protokolle des Terminals über Funk abgerufen werden. Verbindungseinstellungen können ebenfalls per Funk eingestellt werden. Mit Sensoren können die Anlagen in Echtzeit überwacht werden, in Bezug auf Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Vibration und Verschleiß. Dies alles ermöglicht den Einsatz in Anwendungsfällen, wie Flottenmanagement, Bahnverkehrefolgung, Pipeline-Überwachung (Öl und Gas), intelligentes Stromnetz und Stromzählerüberwachung (Smart Grid), Überwachung von Wetterstationen und Überwachung von Wasserkraftanlagen. [69]

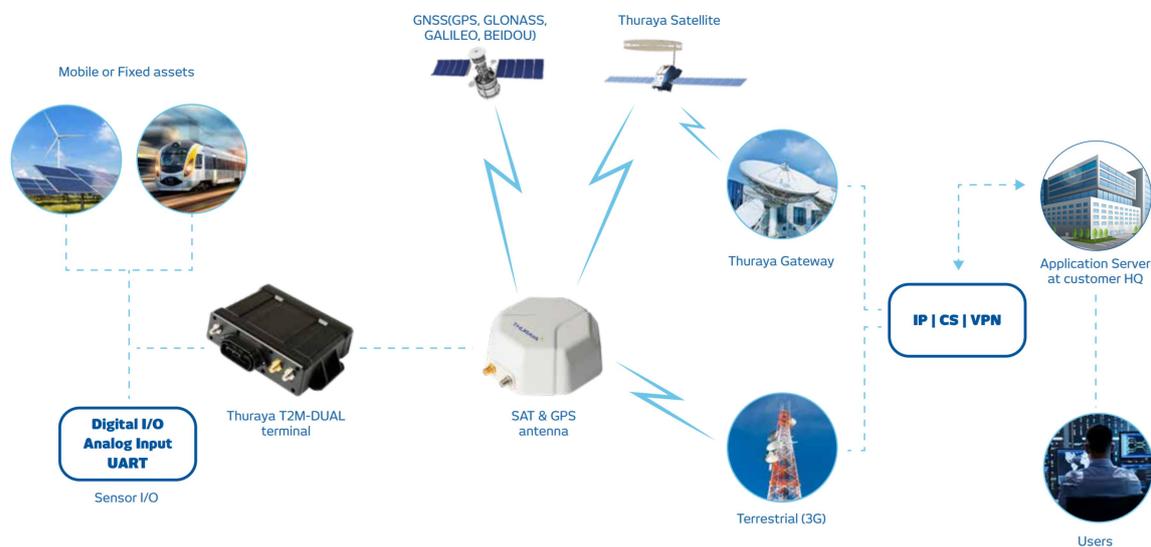


Abbildung 21: Prinzipbild des Thuraya T2M-DUAL Terminals
(Quelle: Thuraya, [69])

Das *Thuraya T2M-DUAL-Terminal* kostet bei Orbital SatCom ca. 716 € (845 US \$) und ermöglicht Datenübertragung und Ortung [75]. Für eine Internetverbindung ist das *Thuraya IP+ Satellite Broadband Terminal* verfügbar, dieses kostet ca. 2.540 € (3.000 US \$) [75]. Die mögliche Datenrate ist im Upload 404 kbit/s und im Download 444 kbit/s schnell [76]. Die

Datenpakete gibt es als monatliches Abo oder als Prepaid Pakete. Ein weiteres Produkt ist das *Thuraya Atlas IP-Satelliten-Internet-Terminal*, dies wurde für den maritimen Einsatz entwickelt. Das Schiff kann lokalisiert werden, es können Daten über Satellit ausgetauscht werden, mit der maximalen Datenrate von 444 kbit/s (Download). Es kann auch vom Land aus eine Remoteverbindung zum Schiff aufgebaut werden. Des Weiteren hat es eine Notalarmfunktion. [77] Bei *Orbital Satcom* kostet das Gerät 5940 US \$ (4837 €) [78]. Es besteht die Möglichkeit für die jeweiligen Satellitentelefone Prepaid-Guthaben zu kaufen. Die Guthaben enthalten Telefoneinheiten, SMS-Einheiten und Datentransfer-Einheiten. So kostet z. B. eine Prepaid Sim-Karte mit 90 Einheiten für Telefonate, 100 SMS-Nachrichten und 100 MB Datentransfer ca. 400 €. [79] Eine Einheit für Telefongespräche entspricht einem US-Dollar [80]. Für Gespräche gibt es Gebühren die pro angefangene Minute anfallen. Je nachdem, ob innerhalb vom Thuraya-Netz kommuniziert wird oder in andere Netze sind die Preise unterschiedlich. Dabei wird das Netz in drei Bänder aufgeteilt. Diese werden Ländern und anderen Satellitendiensten zugeordnet. Eine genaue Auflistung kann bei den Händlern erfragt werden. Im Folgenden wird sich an einer Einteilung von der *Expeditionstechnik Därr GmbH* orientiert. [81] Als Beispiel kostet eine Telefonverbindung von einem Satellitentelefon, welches sich in Deutschland befindet, zu einer Festnetz- oder Mobilfunknummer, die sich auch in Deutschland befindet, 0,90 € pro Minute. Am kostenintensivsten ist eine Verbindung von einem Land außerhalb der Zone E, zu einem Land oder Satellitenanbieter in Band 3, z. B. von USA in das Netz des Satellitenanbieters *Iridium*. Bei der Bundesnetzagentur muss in Deutschland ein Antrag auf Frequenzuteilung gestellt werden, um ein Satellitenfunknetz zu betreiben. Somit können dort die zugeteilten Frequenzen der einzelnen Anbieter eingesehen werden. Das Thuraya- System verwendet die Frequenzbereiche 1634 - 1635 MHz und 1650 - 1656 MHz für Mobilkommunikation und es kann Sprache, Daten, Fax und SMS übertragen. [82, S. 4]

Tabelle 17: Fakten des Satellitensystemanbieters Thuraya

Thuraya		
Erdumlaufbahn:	GEO	
Anzahl der Satelliten:	2	
Datenrate (Downlink/Uplink):	444 kbit/s	404 kbit/s
Latenz:	ca. 800 ms	
Mögliche Anwendungsgebiete:	IoT, Internetsurfen, Telefonie, Seefahrt, Luftfahrt	
Besonderheiten:	Dual-Modus (GSM + Satellit)	
Netzabdeckung:	160 Länder (größten Teile von Europa, Asien und Afrika)	

2.8.2.2 Starlink

Starlink ist ein Satellitennetzwerk des Raumfahrtunternehmens SpaceX. Im Januar 2015 wurde der Vorschlag von SpaceX angekündigt Satelliten-Internet anzubieten. Die ersten 60 Starlink-Satelliten wurden am 23. Mai 2019, an Bord einer SpaceX Falcon 9 Rakete, in die LEO-Erdumlaufbahn gebracht. Ziel ist es, abgelegene Standorte mit kostengünstigem Internet zu versorgen. [83] Elon Musk, der Gründer von SpaceX, sagte: „We’re really talking about something which is, in the long term, like rebuilding the internet in space“ (2015, [84]). Die US Federal Communications Commission (FCC) hat SpaceX die Erlaubnis erteilt, 12.000 Satelliten und möglicherweise sogar 30.000 zu fliegen. Laut dem Büro der Vereinten Nationen für Weltraumangelegenheiten (United Nations Office for Outer Space) wurden in der gesamten Geschichte von SpaceX nur 9.000 gestartet. [83] Für den Zweck, das Satelliten-Internet bereitzustellen, sind aktuell über 700 Satelliten im All [85].

Jeder Starlink-Satellit wiegt 500 Pfund (ca. 227 kg). Die Flughöhe der Satelliten ist ca. 550 km. Dies verschafft einen Vorteil zu der bisherigen Lösung des Satelliten-Internets. Bisher kreisen die großen Raumfahrzeuge, in einer Höhe von ungefähr 35.786 km, über einem bestimmten Punkt auf der Erde. In dieser Entfernung treten jedoch im Allgemeinen erhebliche Zeitverzögerungen beim Senden und Empfangen von Daten auf. Durch die Nähe zu unserem Planeten und die Vernetzung sollen die Satelliten von Starlink große Informationsmengen schnell zu jedem Punkt auf der Erde transportieren, sogar über die Ozeane und an extrem schwer erreichbaren Orten, an denen die Verlegung von Glasfaserkabeln teuer wäre. [83]

Erste Nutzer des Internets via Starlink-Satelliten berichten über Latenzzeiten von 20 bis 40 Millisekunden. Das ist deutlich unter dem Wert der bisherigen Technologie des Satelliten-Internets. (Bei GEO-Satelliten sind 800 Millisekunden üblich.) Jedoch werden laut Elon Musk, die Latenzzeiten noch weiter gesenkt und gleichzeitig die Datenraten erhöht. Die Datenraten erreichen bis zu 150 Mbit pro Sekunde. Der Preis liegt aktuell in der Testphase bei 99 US \$ pro Monat (ca. 85 €). In Deutschland muss man für 50 Mbit/s im Download rund 70 € bezahlen. Bereits in 2021 soll der Service weltweit zur Verfügung stehen. [67] Laut der Angabe in [86], die sich auf das Handelsregister bezieht, wurde am 27.10.2020 die Starlink Germany GmbH in Frankfurt am Main gegründet. Die Bundesnetzagentur in Deutschland hat den Frequenzbereich 14,0 - 14,5 GHz für das Starlink-System zugeteilt [87]

Die Starlink-Bodenausrüstung für Tester kostet 499 US \$ (ca. 410 €) [88]. Die Inhalte der Bodenausrüstung sind ein Phased-Array-Benutzerterminal oder eine kleine Parabolantenne, ein Montagegestativ für das Benutzerterminal und ein WLAN-Router. Das Starlink-Terminal verfügt über Motoren, die sich für den optimalen Winkel zum Satellit

selbst ausrichten. [88] Das Terminal benötigt eine freie Sicht auf den Himmel und funktioniert auch während der Bewegung, sodass es in einem Auto, Boot oder Flugzeug platziert werden kann. Das Phased-Array-Benutzerterminal ist eine dünne, flache, runde Scheibe mit integrierter Richtantenne. [89]

Tabelle 18: Fakten des Satellitensystemanbieters Starlink

Starlink		
Erdumlaufbahn:	LEO	
Anzahl der Satelliten:	Über 700	
Datenrate (Downlink/Uplink):	150 Mbit/s	N/A
Latenz:	20 - 40 ms	
Mögliche Anwendungsgebiete:	Internetsurfen, Streaming	
Besonderheiten:	<ul style="list-style-type: none"> • Smartphoneapp um die optimale Position des Terminals zu ermitteln • Automatische Ausrichtung der Antenne 	
Netzabdeckung:	globale Abdeckung	

2.8.2.3 Iridium

Bevor SpaceX eigene Satelliten, mit ihren teilweise wiederverwendbaren Raketen, ins All schickte, wurden Satelliten von anderen Satellitennetzanbietern in ihre Umlaufbahn gebracht. Am 14.01.2017 wurden die ersten zehn Satelliten von Iridium mit einer zweistufigen Falcon 9 Rakete in die LEO-Erdumlaufbahn gebracht. [90] Inzwischen umkreisen 66 Iridium-Satelliten die Erde, in einer Höhe von 780 km. Sie befinden sich in der LEO-Erdumlaufbahn und bilden ein Netzwerk mit einer Pol-zu-Pol-Abdeckung, das bedeutet, die Umlaufbahnen kreuzen sich jeweils an den Polen. Durch den kurzen Übertragungsweg sind die Signale stärker und haben deshalb eine geringere Latenz sowie eine kürzere Registrierungszeit als bei GEO-Satelliten. Die Latenzzeit ist meist 1/40 im Vergleich zu den GEO-Satelliten, also 20 ms [91]. Jeder Iridium-Satellit ist mit bis zu vier anderen Satelliten verbunden und bildet ein dynamisches Netzwerk. Dies gewährleistet eine globale Abdeckung. [92] Das Iridium-System ist das einzige System, das in den Polarregionen funktioniert [93]. Es sind Geschwindigkeiten bis zu 1408 kbit/s [92] möglich. Für das Iridium-System wurde der Frequenzbereich 1621,35 - 1626,5 MHz von der Bundesnetzagentur in Deutschland zugeteilt [87]. Die Produkte von Iridium lassen sich in drei Kategorien einteilen: IoT-Produkte und Satellitentelefone sowie spezielle Kommunikationslösungen für See- und Luftfahrt. Die IoT-Produkte sind für verschiedene Anwendungsgebiete geeignet. So können Remote-Lösungen bereitgestellt werden, um unbemannte Fahrzeugsysteme zu steuern und zu überwachen. In der Luftfahrt bietet das System zum einen die Option eine Verbindung zu Luft-Taxis und Luftfahrtsysteme für das Verkehrsmanagement aufrechtzuerhalten. Zum anderen bietet es die Option autonome Paketzustellungen zu ermöglichen. Im maritimen Bereich ist es durch das Iridium-System möglich, dass autonome Seefahrzeuge sicher auf dem Ozean navigiert werden können. Iridium bietet Lösungen, diese über Satellit zu überwachen und im Notfall zu steuern, dabei können auch Kollisionen erkannt werden. Es wird dadurch z. B. möglich das Klima zu überwachen und die Ozeanprofilierung autonom vorzunehmen. Auch in der Landwirtschaft ist eine sichere Konnektivität zu autonomen Fahrzeugen möglich. Regierungen nutzen die Systeme, um bestimmte Missionen auszuführen. Durch die weltweite Abdeckung kann in abgelegenen Gebieten das Iridium-System zu Aufklärungszwecken, Wildtierüberwachung und atmosphärischen Beobachtungen verwendet werden. [94] Das IoT-Produkt *Iridium Edge* für Asset Tracking und Flottenmanagement kann auch die Verbindung aufrecht erhalten, wenn keine Stromversorgung möglich ist, da es eine Variante mit Solarpanel gibt [95]. Je nachdem bei welchem Händler das Produkt gekauft wird, bieten die Händler auch Datenpakete an. Bei dem Händler *Whenever Communications* wird das Produkt *Iridium Edge* für 454 US \$ (ca. 407 €) verkauft [96]. Der Datentransfer basiert auf der Short Burst Data (SBD-) Technologie von Iridium. Bei dieser Technologie werden in bestimmten Abständen Kurz-

nachrichten verschickt, es werden also nicht dauerhaft Daten ausgetauscht. Bei den Datenpaketen von *Whenever Communications* fallen unterschiedlich monatliche Kosten an, je nach Wahl der inbegriffenen Datenmengen.

Iridium Pilot wurde speziell entwickelt, um die Verbindung von Schiffen bei praller Sonne, eisiger Kälte und starkem Wind auf der gesamten Erdoberfläche aufrechtzuerhalten. Dies gilt sowohl auf offenem Ozean als auch in den Polarregionen. Es ermöglicht eine Sprach- und Datenkommunikation. Bei der Datenfunktion werden u. a. E-Mail-Dienste und das Surfen im Internet unterstützt. Zusätzlich ist es möglich mit drei Telefonleitungen mehrere Gespräche gleichzeitig zu führen. [97] *Iridium Pilot* kostet 5.399 US \$ (ca. 4470 €) [98]. Zu dem Produkt *Iridium Pilot* werden Daten- und Sprachpakete mit dem Namen *Iridium OpenPort* angeboten. *Iridium OpenPort* bietet, im Gegensatz zu der SBD-technologie, eine dauerhafte Verbindung zu den Satelliten und kann eine konstante Internetverbindung bereitstellen. Um das Iridium-Netz bestmöglich zu nutzen, sollte *Iridium Certus* bevorzugt werden. Mit *Iridium Certus* sind die Geschwindigkeiten der Internetverbindung im Iridium-System am höchsten. Technisch möglich sind 1408 kbit/s [92]. Jedoch unterstützt, das für die maritime Umgebung vorgesehene Produkt, *VesseLINK by Thales* Datenraten von 352 kbit/s beim Senden und 700 kbit/s beim Empfangen. Es kostet 7.395 US \$ (ca. 6.624 €) [99]. Um *Iridium Certus* in der Luftfahrt zu nutzen gibt es das Produkt *FlytLINK by Thales* (bis dato keine Preisauskunft). Damit ist eine aktive Flugzeugverfolgung möglich. Des Weiteren können Wettervorhersagen in Echtzeit vorgenommen werden. Es besteht die Möglichkeit, Konferenzanrufe zu tätigen und einen WLAN-Zugang für die Crew oder die Passagiere anzubieten. [100]

Iridium bietet vier Modelle von Satellitentelefonen an. Darunter ist ein Modell speziell für das Militär der US-Regierung. Das *Iridium 9555* Satellitentelefon kostet 1.145 US \$ (ca. 1.026 €) [101] und bietet die Grundfunktionen, wie Telefonanrufe und SMS über das Satellitennetz. Das *Iridium Extreme 9575* bietet darüber hinaus eine Ortungsmöglichkeit und einen Notfallservice (GEOS Safety Response), um anhand gesendeter Koordinaten schnell gerettet zu werden. Es kostet 1.375 US \$ (ca. 1.231 €) [102]. Für spezielle Anwendungsfälle, bei denen das Satellitentelefon nicht in der Hand gehalten werden kann, bietet Iridium auch optional eine Push-to-Talk Variante an. Dies kann z. B. bei Feuerwehreinsätzen sehr nützlich sein. Zusätzlich wird noch ein Smartphone-Modul angeboten, das *Iridium GO!*. Hiermit können Smartphones per WLAN verbunden werden und es können alle Funktionen mit dem Smartphone genutzt werden. [Vgl. 56] Das Modul kostet 859 US \$ (ca. 706 €) [103].

Tabelle 19: Fakten des Satellitensystemanbieters Iridium

Iridium		
Erdumlaufbahn:	LEO	
Anzahl der Satelliten:	66	
Datenrate (Downlink/Uplink):	1408 kbit/s	352 kbit/s
Latenz:	ca. 20 ms	
Mögliche Anwendungsgebiete:	IoT, Internetsurfen, Telefonie, Seefahrt, Luftfahrt	
Besonderheiten:	Abdeckung der Polarregionen	
Netzabdeckung:	globale Abdeckung	

2.8.2.4 Orbcomm

Auch die Orbcomm-Satelliten wurden von dem Unternehmen SpaceX in ihre Umlaufbahn gebracht. Am 14.07.2014 wurden die ersten sechs Satelliten der OG2-Mission ins All gesetzt. [104] Am 22.12.2015 wurde die Satellitenkonstellation von Orbcomm mit elf weiteren Satelliten erweitert. Damit ist ein Satellitennetz entstanden, das ausschließlich für die Kommunikation von Maschine-zu-Maschine (M2M) vorgesehen ist. Die Satelliten befinden sich in der LEO-Erdumlaufbahn. [105] Jedoch gibt es zu dem OG2-Netzwerk von Orbcomm wenig öffentliche Informationen. Nach der *World Meteorological Organization* gibt es 16 OG2-Satelliten und 25 OG1-Satelliten. Die Upload-Geschwindigkeit beträgt 4,8 kbit/s und die Download-Geschwindigkeit beträgt 7,2 kbit/s. [106, S. 20] Orbcomm hat eine Partnerschaft mit Inmarsat. Inmarsat bietet seit 2015 ein Satellitennetzwerk mit 14 Satelliten in der GEO-Erdumlaufbahn mit globaler Abdeckung, wohingegen die Polarregionen nicht abgedeckt werden [107–109]. Aktuell bietet Orbcomm seine Terminals in Verbindung mit dem *IsatData Pro Service* von Inmarsat an. Die Datenraten sind im Download 10 kBytes/s (80 kbit/s) und im Upload 6,4 kBytes/s (51,2 kbit/s). Die Latenz beträgt 15 bis 60 Sekunden. [110] Das Produkt *IDP-782* von Orbcomm ist dafür gedacht, Standortdaten von Fahrzeugen bereitzustellen, das Fahrverhalten zu überwachen, Textnachrichten zu übertragen sowie digitale Formulare zu senden. Die Verbindung kann über das Satellitennetz von Inmarsat erfolgen oder über die Mobilfunkstandards GPRS und HSPA. Die GPS-Ortung ist auf 2,5 m genau. [111]

Das *IDP-782* Terminal von Orbcomm gibt es optional mit Reserveakku. Dieser ermöglicht den Betrieb von zusätzlichen 12 Stunden ohne Strom. Dabei wird jede Minute ein Bericht über Mobilfunk gesendet oder alle zehn Minuten über Satellit. [111] Dieses Terminal kostet

823 € bei dem Händler *CPN Satellite Services GmbH* [112]. Die Datenpakete für die Nutzung sind nach inkludierten Daten pro Monat eingeteilt. Zu dem monatlichen Preis kommen weitere Kosten hinzu. Wenn über das inkludierte Datenvolumen hinaus Daten verbraucht werden, wird ein Betrag pro weitere 1000 Bytes berechnet. Es gibt Datenpakete von 0,5 kb bis 5 MB. Zu den einmaligen Aktivierungsgebühren kommen noch monatliche Gebühren für die Echtzeitdatenerfassung (RTM) und für die IoT-Plattform von CPN. [113] Das Orbcomm-System nutzt in Deutschland den Frequenzbereich 148 - 150,05 MHz. Inmarsat nutzt hierfür *IsatData Pro* Dienst den Frequenzbereich 1626,5 - 1652,12 MHz [87].

Tabelle 20: Fakten des Satellitensystemanbieters Orbcomm

Orbcomm		
Erdumlaufbahn:	LEO	
Anzahl der Satelliten:	16(OG2), 25(OG1)	
Datenrate (Downlink/Uplink):	7,2 kbit/s	4,8 kbit/s
Latenz:	N/A	
Mögliche Anwendungsgebiete:	IoT, Bergbau, Flottenmanagement, Seefahrt	
Besonderheiten:	Dual-Modus (GSM + Satellit)	
Netzabdeckung:	Globale Abdeckung, außer Polarregionen	

Tabelle 21: Fakten des IsatData Pro Service des Satellitensystemanbieters Inmarsat

Inmarsat (IsatData Pro)		
Erdumlaufbahn:	GEO	
Anzahl der Satelliten:	14	
Datenrate (Downlink/Uplink):	80 kbit/s	51,2 kbit/s
Latenz:	15 - 60 s	
Mögliche Anwendungsgebiete:	IoT, Bergbau, Flottenmanagement, Seefahrt	
Netzabdeckung:	Globale Abdeckung, außer Polarregionen	

2.8.3 Zusammenfassung der vorgestellten Satellitenkommunikationsgeräte

Die in Kapitel 2.8.2 betrachteten Geräte für die Satellitenkommunikation lassen sich in drei Kategorien einteilen und innerhalb dieser Kategorien vergleichen. So werden nun die Satellitentelefone, IoT-Terminals und Internet Terminals sowie spezielle Terminals für die Seefahrt miteinander verglichen.

2.8.3.1 Satellitentelefone

Beim Vergleich der betrachteten Satellitentelefone von Thuraya und Iridium fällt auf, dass die Thuraya Telefone deutlich günstiger sind als die Iridium Telefone (siehe Tabelle 22). Trotz dessen sind die Akkulaufzeiten höher als bei den Iridium Telefonen. Besonders auffallend ist das *Thuraya XT-PRO DUAL* mit einer Gesprächszeit von elf Stunden und die hohen Datenraten. Dieses Satellitentelefon kann sogar über USB als Modem für den PC verwendet werden, um das Satelliteninternet zu nutzen. Die Iridium Satellitentelefone können einen WLAN-Hotspot aufbauen, um anderen Geräten Zugang zum Satelliteninternet zu ermöglichen. Jedoch ist hier die Geschwindigkeit nur 2,4 kbit/s schnell. Einen Dual-Modus für den Wechsel ins GSM-Netz unterstützen die Telefone *Thuraya XT-PRO DUAL* und *Iridium Extreme PTT*. Alle betrachteten Telefone haben GPS, wobei die Thuraya Telefone zusätzlich die Funktion „Wegpunktnavigation“ haben. Diese Funktion ermöglicht es sich zu bestimmten Koordinaten navigieren zu lassen. Für Outdoor Aktivitäten ist zu berücksichtigen, welche Geräte vor Schocks, Eindringen von Staub und Spritzwasser geschützt sind. Auch muss die Netzabdeckung berücksichtigt werden, die von dem jeweiligen Anbieter abhängig ist. Iridium bietet, im Gegensatz zu Thuraya, eine globale Netzabdeckung, d. h. inklusiv der Polarregionen. [114, 115]

**Tabelle 22: Einige Thuraya und Iridium Satellitentelefone im Vergleich
(Quelle: Iridium Satellite LLC, Thuraya, [114, 115])**

	Thuraya XT-PRO DUAL	Thuraya XT-LITE	Iridium 9555	Irdium Extreme 9575	Iridium Extreme PTT
Preis	955 €	529 €	1026 €	1231 €	1268 €
Gesprächszeit/ Standbyzeit	11 / 100 h	6 / 80 h	4 / 30 h	4 / 30 h	5 / 16.5 h
Schock/Staub/ Spritzwasser resistent	✓	—	—	✓	✓
GPS	✓ mit Wegpunktnavigation	✓ mit Wegpunktnavigation	✓	✓	✓
Datenrate	60 kbit/s (Downlink), 15 kbit/s (Uplink)	—	Circuit Switched Data: 9,6 kbit/s WLAN-Hotspot: 2,4 kbit/s		
Zusatzfunktionen	Modem für PC Dual-Modus		Hotspot für PC	Hotspot für PC	Hotspot für PC Dual-Modus

Um die Verbindungsgebühren von Thuraya und Iridium miteinander zu vergleichen, werden zwei Prepaidpakete, die ungefähr im gleichen Preisniveau liegen, miteinander verglichen. Die Prepaidpakete enthalten meist nicht nur Gesprächsminuten, sondern wie beispielsweise für Thuraya auch Datenpakete für die Modem-Funktion und SMS-Einheiten. So kostet ein Thuraya-Prepaidpaket mit 90 Gesprächseinheiten, 100 MB Daten und 100 SMS 399 €. Die 90 Gesprächseinheiten reichen innerhalb des Thuraya Netzes für ca. 105 min (0,85 €/min). Wird in andere Satellitennetze telefoniert, so kostet das 8,10 - 9,65 €/min. [79]

Für Iridium gibt es z. B. ein Prepaidpaket für ca. 247 € (299 US \$). Hier sind 150 Minuten im Iridium Netz enthalten (1,65 €/min). Eine SMS wird wie eine Minute berechnet. Für die Telefonie zu anderen Satellitennetzen, werden pro verbrauchte Minute, 12 Minuten von dem Prepaidguthaben abgezogen. [116]

Um Kosten zu sparen ist es für Expeditionen sinnvoll, wenn das gesamte Team den gleichen Satellitenanbieter nutzt. In solch einem Fall ist Thuraya, von den Gebühren pro Minute, günstiger als Iridium. Jedoch werden von Thuraya nur ca. 2/3 der Länder abgedeckt, wobei Iridium eine vollständige globale Abdeckung bietet.

2.8.3.2 IoT Terminals

Im Folgenden werden einige Terminals betrachtet, die sich für IoT eignen (siehe Tabelle 23). Wenn die IoT-Terminals z. B. für Asset-Tracking verwendet werden, ist GPS für eine genaue Ortung ein entscheidendes Merkmal. Jedoch soll *Iridium Edge* über die SBD-Technologie auch eine Ortung ermöglichen. Ob diese jedoch mit GPS vergleichbar ist, konnte nicht festgestellt werden [117]. Das *T2M-DUAL-Terminal* von Thuraya und das *IDP-782 Terminal* von

Orbcomm unterstützen GPS. Die Datenraten der Terminals sind für kleine Nachrichten, die im IoT-Bereich üblich sind, ausreichend. Wobei z. B. bei der SBD-Technologie von Iridium die Nachrichten bis zu 340 Bytes groß sind und in 20 Sekunden übertragen werden [117]. In bestimmten Situationen ist es wichtig, dass bei einem Stromausfall ein Verbindungsausfall durch eine Backupbatterie verhindert werden kann. Diese Möglichkeit bieten die betrachteten Terminals von Thuraya und Orbcomm, wohin gegen *Iridium Edge* auch mit Solarpanel erhältlich ist, um eine stetige Stromzufuhr zu ermöglichen. Um Kosten bei der Verbindung über Satellit zu sparen ist, ein Dual-Modus auch bei den Terminals von Vorteil. So kann alternativ auch eine Mobilfunk-Verbindung aufgebaut werden. Bei der Wahl eines Terminals sollte je nach Einsatzgebiet auch die Netzabdeckung berücksichtigt werden (siehe hierzu Tabelle 17, Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 21).

Tabelle 23: Einige IoT-Terminals im Vergleich
(Quelle: Thuraya, Orbcomm Inc., Iridium Satellite LLC, [69, 111, 118])

	Iridium Edge	Thuraya T2M-DUAL-Terminal	Orbcomm IDP-782 Terminal
Preis	449 €	716 €	823 €
Schock/Staub/ Spritzwasser resistent	✓	✓	✓
GPS	—	✓	✓
Datenrate	136 bit/s nur einzelne Kurznachrichten	9.6 kbit/s	80 kbit/s (Downlink), 51,2 kbit/s (Uplink)
Alternative Stromquelle	optional Solarpanel	Backupbatterie	Backupbatterie
Dual-Modus (GSM/Sat)	—	✓	✓

Die Nutzung des *Iridium Edge*, mit der SBD-Technologie, kostet mit 17 KB Datenvolumen ca. 21 € (24.95 US \$) im Monat. Pro weitere KB werden ca. 1,19 € (1,44 US \$) berechnet. [119] Zu den Thuraya Terminals gibt es ebenfalls monatliche Datenpakete, jedoch sind diese eher für eine Internetnutzung zu empfehlen und nicht für reine IoT Anwendungen. Ein Verbrauch von 15 GB pro Monat ist für reine IoT Nutzung nicht realistisch. Selbst die Prepaidpakete von Thuraya enthalten in der kleinsten Einheit 32 MB und kosten ca. 152 € (184 US \$) [120]. Sollten wirklich 32.000 KB benötigt werden, so ist die Thuraya-Verbindung zu empfehlen. *Iridium Edge* mit der SBD-Technologie ist für diese Datenmenge nicht vorgesehen. Der *Isat-Data Pro Service* von Inmarsat, in Verbindung mit dem *IDP-782 Terminal* von Orbcomm, ist mit den Datenpaketen vergleichbar. Ein *IsatData Pro* Paket mit 15 KB kostet 13,79 € pro Monat. Jedes weitere KB kostet 1,15 €. Für 17 KB im Monat würden für die Nutzung ca.

18,15 € berechnet. Somit ist der *IsatData Pro* Service günstiger als die Nutzung des Netzes von Iridium. Zusätzlich bietet *IsatData Pro* eine höhere Datenrate als Iridium im IoT-Bereich.

2.8.3.3 Internet Terminals

Die betrachteten maritimen Terminals nutzen in den jeweiligen Netzen unterschiedliche Datenraten. Die Abrechnungen, für das Nutzen von Daten, sind sehr unterschiedlich. Es sind verschiedene monatliche Abonnements mit unterschiedlichen inklusiven Datenmengen bei den Händlern verfügbar. Um die Geräte mit ihren zugehörigen Abonnements vergleichen zu können, wurden die Kosten pro verbrauchtes Megabyte, innerhalb der inklusiven Datenmengen, berechnet (siehe Tabelle 26). Es wurden jeweils die monatlichen Abonnements gewählt, die die technisch mögliche maximale Datenrate der Geräte nutzen. Die Datenpakete für Thuraya Geräte bieten maximal eine Geschwindigkeit von 444 kbit/s im Download und 404 kbit/s im Upload [76]. Das Datenpaket mit 30 GB inklusivem Datenvolumen kostet ca. 3.173 €. [120] Dies entspricht ca. 0,11 € pro Megabyte. Das *Iridium Pilot*, das mit dem *Iridium OpenPort* Service verfügbar ist, unterstützt eine Geschwindigkeit von 134 kbit/s im Download und im Upload. Ein Datenpaket für dieses Gerät mit 250 MB inklusivem Datenvolumen kostet ca. 933 € (1.132 US \$). [98] Daraus folgt, dass ca. 3,37 €/MB anfallen. Das Gerät *Ves-seLINK by Thales* ist ebenfalls für maritimen Einsatz vorgesehen. Bei diesem Gerät wird der Service *Iridium Certus* angeboten. Es sind Datenraten bis zu 700 kbit/s im Download und 352 kbit/s im Upload möglich. Wobei ein Datenpaket mit 10 GB inklusivem Datenvolumen ca. 1.970 € (2.390 US \$) im Monat kostet. [99] Somit entstehen Kosten von ca. 0,20 €/MB. Werden die betrachteten Internet Terminals der Satellitenkommunikation verglichen, so ist Starlink mit der hohen Datenrate von 150 Mbit/s und den niedrigen monatlichen Kosten von ca. 85 € auffallend günstig [67]. Wobei auch noch keine Limits für die Begrenzung des Datenvolumens gesetzt wurden. [121]. Dieses Terminal wird als eine Alternative für das terrestrische Breitband angeboten und ist nicht mit den bereits erwähnten Terminals zu vergleichen. Da das Angebot von Starlink in Deutschland erst 2021 startet und es auch nur vereinzelt Testberichte gibt, ist abzuwarten, wie zuverlässig die hohen Datenraten zur Verfügung stehen [122]. Auch muss überprüft werden, wie es tatsächlich in Bewegung eingesetzt werden kann, da die Phased-Array-Antenne des Terminals optimal in Richtung Satellit ausgerichtet werden muss. [89]

2.8.4 Vor- und Nachteile

Außer der Satellitenkommunikation gibt es weitere wichtige Konnektivitätstechnologien, die aber terrestrische Netzwerke nutzen, um eine Kommunikation zu ermöglichen. Diese sind in Tabelle 25 im Vergleich zu sehen. Die Satellitenkommunikation stellt eine besondere Konnektivitätstechnologie dar. Sie ist unabhängig von terrestrischen Netzwerken und kann je nach Anbieter, durch eine vollständige globale Abdeckung, eine Sicherheit in der Kommunikation bieten. Wenn terrestrische Netze ausfallen, kann durch die Satellitenkommunikation immer noch (global) kommuniziert werden. Zudem sind die angebotenen Geräte weltweit nutzbar. Es müssen nicht zusätzliche Geräte gekauft werden, um in anderen geografischen Zonen zu kommunizieren. (Im Mobilfunk ist dies nicht immer gegeben, hier gibt es beispielsweise Smartphones nur für bestimmte geografische Zonen, z. B. werden andere Modelle für die Nutzung in Europa verkauft als wie in den USA.) Jedoch fallen bei der Nutzung dieser Technologie, verglichen mit den anderen Technologien, höhere Kosten an, sowohl in der Anschaffung als auch während der Nutzung (Vergleiche Tabelle 25 mit Tabelle 26). Starlink bietet ab ca. 2021 ein Satellitennetzwerk an, das aber bis jetzt noch nicht komplett ausgebaut ist. Auffallend hierbei sind die niedrigen Anschaffungskosten und die mittelmäßigen monatlichen Kosten, wenn bedacht wird, dass die mögliche Datenrate terrestrischen Netzen in privaten Haushalten gleicht. Der Downlink im Starlink Netzwerk beträgt ca. 150 Mbit/s. Die anderen Satellitennetze (Thuraya, Iridium Certus, IsatData Pro) haben wesentlich geringere Datenraten. Die Werte der Downlinks dieser Netze befinden sich zwischen 80 kbit/s und 1408 kbit/s. Durch die Übersicht der Tabelle 26 fällt auf, dass die Netze, deren Satelliten sich in der LEO-Erdumlaufbahn befinden, eine geringe Latenzzeit haben, im Vergleich zu den Netzen der GEO-Satelliten. Auch ist zu sehen, wenn eine globale Abdeckung erreicht werden soll, dass ein Satellitenetz der LEO-Erdumlaufbahn mehr Satelliten benötigt als ein Satellitenetz der GEO-Umlaufbahn. Dies liegt daran, dass die GEO-Erdumlaufbahn weiter von der Erde entfernt ist und die Satelliten so eine größere Fläche mit Netzempfang abdecken können [123, S. 36, 37]. Die Batterielaufzeit der Kommunikationsgeräte via Satellit entspricht statt mehreren Jahren, wie es bei den anderen Technologien der Fall ist, nur einige Stunden. Die Akkulaufzeit des *Thuraya T2M-DUAL* Terminals beträgt bis zu 24 Stunden, während die Akkulaufzeit des *Orbcomm IDP-782* Terminals nur 12 Stunden beträgt. Bei den Satellitentelefonen ist die Akkulaufzeit des *Thuraya XT-PRO DUAL* mit 11 Stunden Gesprächszeit und 100 Stunden Standbyzeit am höchsten. Um einen aussagekräftigen Vergleich in dieser Eigenschaft zu machen muss die Batteriekapazität berücksichtigt werden, jedoch kann generell von den Satellitenkommunikationsgeräten ein höherer Stromverbrauch erwartet werden, als von den Endgeräten der Konnektivitätstechnologien in Tabelle 25. Werden Geräte für die Satellitenkommunikation angeschafft, so kann davon ausgegangen werden, dass sie längere

Zeit einsatzbereit sind als Endgeräte in Mobilfunknetzen. Das liegt an den langen Lebenszyklen der Satellitennetzwerke, die meist über 20 Jahre erhalten bleiben und mit den Geräten der Satellitenanbieter abwärtskompatibel sind. Satelliten-IoT-Netzwerke bieten eine hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit, da diese in der Regel als proprietäre, geschlossene Systeme angeboten werden. [124] Die beschriebenen Vor- und Nachteile der Satellitenkommunikation sind in Tabelle 24 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 24: Vor- und Nachteile der Satellitenkommunikation

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Globale Abdeckung u. Zuverlässigkeit • Geräte weltweit nutzbar • Abwärtskompatibel • Keine lokale Infrastruktur notwendig • Proprietär u. hohe Sicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Batterielaufzeit • Hohe Anschaffungskosten • Hohe laufende Kosten • Geringe Uplinks/Downlinks (für IoT ausreichend) • Hohe Kosten bei Kommunikation in andere Satellitennetze

Erwähnt werden sollte noch ein weiterer Nachteil, der sich aus der notwendigen Sichtverbindung zwischen Satellit und Sender/Empfänger am Boden ergibt. In ungünstiger Topographie (z.B. enge Schlucht) oder innerhalb von Gebäuden ist die Kommunikation nicht oder nur schlecht machbar. In solchen Fällen sind ggfs. „Repeater“ einzusetzen.

2.9 Zusammenfassung der vorgestellten Übertragungsarten

In den vorhergehenden Kapiteln 2.1 bis 2.8 wurden verschiedene Technologien im Detail erläutert. Nun werden diese miteinander verglichen auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

Bitte beachten Sie, dass in Tabelle 25 der Begriff „GSM“ stellvertretend für alle Mobilfunkgenerationen verwendet wird. (Anmerkung des Herausgebers)

Bezogen auf die Technologien in Tabelle 25 wurden die anfallenden Kosten hier in die Bereiche Einmalkosten des Systems, Einmalkosten pro Device, laufende (Basis-) Kosten pro Monat und laufende Kosten pro Device pro Monat untergliedert. Hierbei ist auffällig, dass nur zwei der vorgestellten Technologien laufende Basiskosten aufweisen. Laufende Kosten pro Device sind dagegen bei drei Technologien zu finden. Interessant ist, dass bei der Technologie NB-IoT beide Arten von laufenden Kosten anfallen. Auffallend ist zudem auch, wie breit das Spektrum der Kosten ist. Dieses erstreckt sich von 20 € bis 1000 €. Dieser Preisunterschied kann damit begründet werden, dass es bei jeder Technologie die Möglichkeit gibt ein High-End Gerät sich zu beschaffen und damit die Kosten ansteigen.

Unterschiede bestehen auch in der Reichweite der jeweiligen Technologie. Hierbei schwankt das Spektrum von weniger als 50 m bis zu 35 km. Die dargestellten 35 km Reichweite bei der Technologie GSM sind dabei aber nur in Ausnahmefällen auf dem Land zu erreichen. Dagegen NB-IoT weist durch eine gute Gebäudedurchdringung in den meisten Fällen eine Reichweite von mehr als 10 km auf. Eine exakte Angabe kann hier nicht getroffen werden. Es kann aber gesagt werden, dass NB-IoT in vielen Fällen eine bessere und weitere Reichweite als GSM und LTE haben.

Auffallend ist, dass neben der Mobilfunk-Technologie nur die Satellitenkommunikation weltweit verfügbar ist. Die anderen Technologien sind nur in einzelnen Ländern bereits flächendeckend verfügbar oder im Aufbau.

Bei der Batterielaufzeit kann bei den meisten Technologien nur ein grober Zeitrahmen gegeben werden. Dies ist dem Grund geschuldet, dass der Energieverbrauch von der Menge der gesendeten Daten pro Tag und der Anzahl der Devices abhängt.

Da die Satellitenkommunikation unabhängig von terrestrischen Netzwerken ist, stellt diese eine besondere Konnektivitätstechnologie dar. So wird keine lokale Netzinfrastruktur lokal benötigt. Des Weiteren ist sie den anderen Technologien in der globalen Abdeckung überlegen. Mobilfunk ist zwar weltweit verfügbar, jedoch nicht in den Polarregionen oder auf dem offenen Ozean. Die Satellitennetze sind meist mit älteren Geräten des Satellitensystem-

anbieters kompatibel, somit lohnen sich Anschaffungen für längere Zeit. Die Satellitennetze werden proprietär angeboten, d.h. ein Gerät, das für beispielsweise Iridium vorgesehen ist funktioniert nicht im Thurayanetz. Jedoch kann in andere Satellitennetze kommuniziert werden, was meist aber hohe Kosten verursacht. Auf den Energiebedarf bezogen sind die anderen Technologien in Tabelle 25 ressourcenärmer. Die Anschaffungskosten sind höher als bei den anderen Technologien. Dies liegt unter anderem daran, dass die Geräte meist auch für extreme Bedingungen geeignet sind. Auch ist der Transfer der Satelliten in die GEO-Erdumlaufbahn sehr teuer. Die Uplinks und Downlinks sind beispielsweise für IoT- und Sprachkommunikation ausreichend. Lediglich Starlink übertrifft alle der betrachteten Satellitennetze. Das Anwendungsgebiet hierbei ist, Breitbandinternet für abgelegene Gebiete. Jedoch ist das Starlink Terminal nicht für IoT geeignet, da das Terminal im Vergleich zu anderen mobilen Kommunikationslösungen zu groß ist.

Tabelle 25: Vergleich der vorgestellten Technologien

Technologie Eigenschaften	GSM	NB IoT	LoRaWAN	SigFox	BLE	ZigBee	WLAN
Reichweite	< 3,5 km	> 10 km	Bis zu 15 km	10 km Stadt; 40 km Land	< 50 m (Ausnahmefälle bis 100 m)	< 100 m	< 100 m (bei IEEE 802.11ah bis 1 km)
Regionale Abdeckung/ Verfügbarkeit	Flächendeckend verfügbar; es kann zu regionalen Abweichungen in der Stärke des empfangbaren Netzwerkes kommen	Flächendeckend verfügbar; in zehn europäischen Ländern sowie der USA flächendeckend verfügbar; in anderen Ländern gerade im Aufbau	Bislang sehr lückenhaft, befindet sich im Aufbau; vorreitende Länder: Niederlande, Schweiz, Deutschland holt auf hat aber grobe Lücken	Lückenhaft, befindet sich im Aufbau; in 70 Ländern im Einsatz; 85% Abdeckung in Deutschland; Frankreich und Dänemark komplett abgedeckt; beschränkt sich in den USA nur auf Ballungszentren, alle wichtigen Flughäfen sind weltweit abgedeckt	Bisher sehr lückenhaft, befindet sich im Aufbau, besonders durch Corona kann es flächendeckend zum Einsatz kommen für Kontaktverfolgung	Bisher sehr lückenhaft in immer mehr neuen Bauprojekten verwendet, nicht für regionale Abdeckung vorgesehen	Weit verbreitet in privaten Netzen, nicht für regionale Abdeckung vorgesehen
Topologie	Netzstruktur	Netzstruktur	Sterntopologie	Sterntopologie	Sterntopologie	Netzstruktur	Ring-, Maschen-, Stern- & Baumnetze
Frequenzspektrum	900 MHz - 2,6 GHz	703 MHz - 2,17 GHz	EU 868 MHz USA 915 MHz	EU 868 -868,2 MHz USA 902 - 928 MHz	2,402 GHz - 2,48 GHz	868 MHz, 915MHz und 2,4 GHz	863-868 MHz, 2,4 GHz und 5 GHz
Uplink	Bis zu 50.000 kbit/s	180 - 230 kbit/s	0,3 - 50 kbit/s	0,3 - 22 kbit/s	Sprachdaten: 432 kbit/s andere Daten: 57 kbit/s	230 kbit/s	< 6,93 Gbit/s
Downlink	Bis zu 300.000 kbit/s	200 - 250 kbit/s	*	*	Sprachdaten: 432 kbit/s andere Daten: 723 kbit/s	*	Bis zu 6,93 Gbit/s
Einmalkosten System	Bis zu 230 €	Von 5€ bis 349€ netto	Von 100€ bis 2200€	20€	Von 20€ bis 40€	Von 50€ bis 1000€	Ab 40€
Einmalkosten pro Device	Bis zu 20 €	2€ bis 5€	20 - 50€	1-2€	Von 27€ bis 70€	5-35€	30 - 150€
Laufende (Basis-) Kosten (pro Monat)	—	Von 0,19€ bis 0,39€	—	—	Bis 45€	—	5-50€
Laufende Kosten pro Device (pro Monat)	Bis zu 50€	(Nicht darstellbar, da die laufenden Kosten nach Datenmenge abgerechnet werden)	—	0,02 bis 0,16€	—	—	—
Energieverbrauch	mittel	Sehr gering	Sehr gering	Sehr gering	Sehr gering	Sehr gering	mittel
Typische Batterielaufzeit Endgerät	5 Jahre bei zwei Übertragungen pro Tag	Bis zu 10 Jahre	2-10 Jahre abhängig von Geräteklasse & Häufigkeit der Übertragung	10-15 Jahre abhängig von Geräteklasse & Häufigkeit der Übertragung	Bis zu 3 Jahre	2 Jahre	Bis zu 1,5 Jahre
Offener Standard / proprietär	Offener Standard	Offener Standard	Offener Standard	Offener Standard	Offener Standard	Offener Standard	Offener Standard

*Technologie unterstützt vorzugsweise Uplinks, für Geschwindigkeiten der Downlinks keine ausreichenden Informationen verfügbar

Tabelle 26: Vergleich der vorgestellten Satellitennetze

Technologie Eigenschaften	Satellitenkommunikation			
	Iridium Certus	Starlink	Thuraya	IsatData Pro
Satellitennetz	Iridium Certus	Starlink	Thuraya	IsatData Pro
Erdumlaufbahn	LEO		GEO	
Anzahl der Satelliten	66	Über 700	2	14
Referenzgeräte	VesseLINK by Thales	Phased-Array-Benutzerterminal	Thuraya T2M-DUAL	Orbcomm IDP-782
Regionale Abdeckung	Globale Abdeckung	Globale Abdeckung	160 Länder (größten Teile von Europa, Asien und Afrika)	Globale Abdeckung, außer Polarregionen
Topologie	Sterntopologie	Mesh-Netzwerk	Linien-Netzwerk	N/A
Frequenzspektrum	1621,35 - 1626,5 MHz	14,0 - 14,5 GHz	1634 - 1635 MHz und 1650 - 1656 MHz	1626,5 - 1652,12 MHz
Latenz	Ca. 20 ms	20 - 40 ms	Ca. 800 ms	15 - 60 s
Uplink	352 kbit/s	N/A	404 kbit/s	51,2 kbit/s
Downlink	1408 kbit/s	150 Mbit/s	444 kbit/s	80 kbit/s
Einmalkosten System	ca. 6.600 € (maritim)	ca. 410 €	ca. 716 €	ca. 823 €
Laufende (Basis-) Kosten (pro Monat)	ab 120 €/Monat	ca. 85 €/Monat	ab ca. 2327 €/Monat	ab 3,07 € / Monat
Kosten/MB (innerhalb des max. inkl. Datenvolumens)	Ca. 0,239 €/MB (10 GB)	Ca. 0,000276 €/MB (unbegrenzt, 308 GB avg.)	Ca. 0,106 €/MB (30 GB)	Ca. 83,13 €/MB (5 MB)
Typische Batterielaufzeit Endgerät	(AC - Stromquelle)	(AC - Stromquelle)	Bis zu 24 h	Bis zu 12 h
Offener Standard / proprietär	proprietär	proprietär	proprietär	proprietär

Ein weiterer Vergleich der vorgestellten Technologien ist in Abbildung 22 zu sehen. Hier werden die Technologien in den Punkten Servicequalität, Batterielebensdauer, Latenzzeit, Energieverbrauch, Abdeckung, Reichweite und Kosten miteinander verglichen. Die Kriterien wurden ausgewählt, da mit diesen gut die Unterschiede in den Haupteigenschaften aufgezeigt werden können.

Gut zu erkennen ist, dass vor allem die Technologien Mobilfunk und SigFox in einzelnen Punkten herausstechen. Mobilfunküberzeugt mit der (scheinbar) großen Reichweite, Abdeckung, der geringen Latenzzeit und der Servicequalität. SigFox ist der Vorreiter im Bereich der Kosten und der hohen Batterielebensdauer. Anzumerken ist die vergleichsweise schlechte Abdeckung von BLE und die geringe Batterielebensdauer bei WLAN.

Wird die Satellitenkommunikation mit einbezogen, so ist zu sehen, dass Starlink, außer in den Bereichen Batterielebensdauer bzw. Energieverbrauch, führend in den Eigenschaften ist. In der Reichweite so wie in der Abdeckung sind alle Satellitennetze führend. Jedoch schneidet Thuraya als Satellitennetz relativ schlecht ab. Die Kosten sind hier hoch obwohl die Abdeckung nicht global ist. Auch die Latenz ist im Vergleich zu anderen Technologien nicht hoch. Iridium Certus ist für IoT, für den maritimen Einsatz und in der Luft, das beste Satellitennetzwerk.

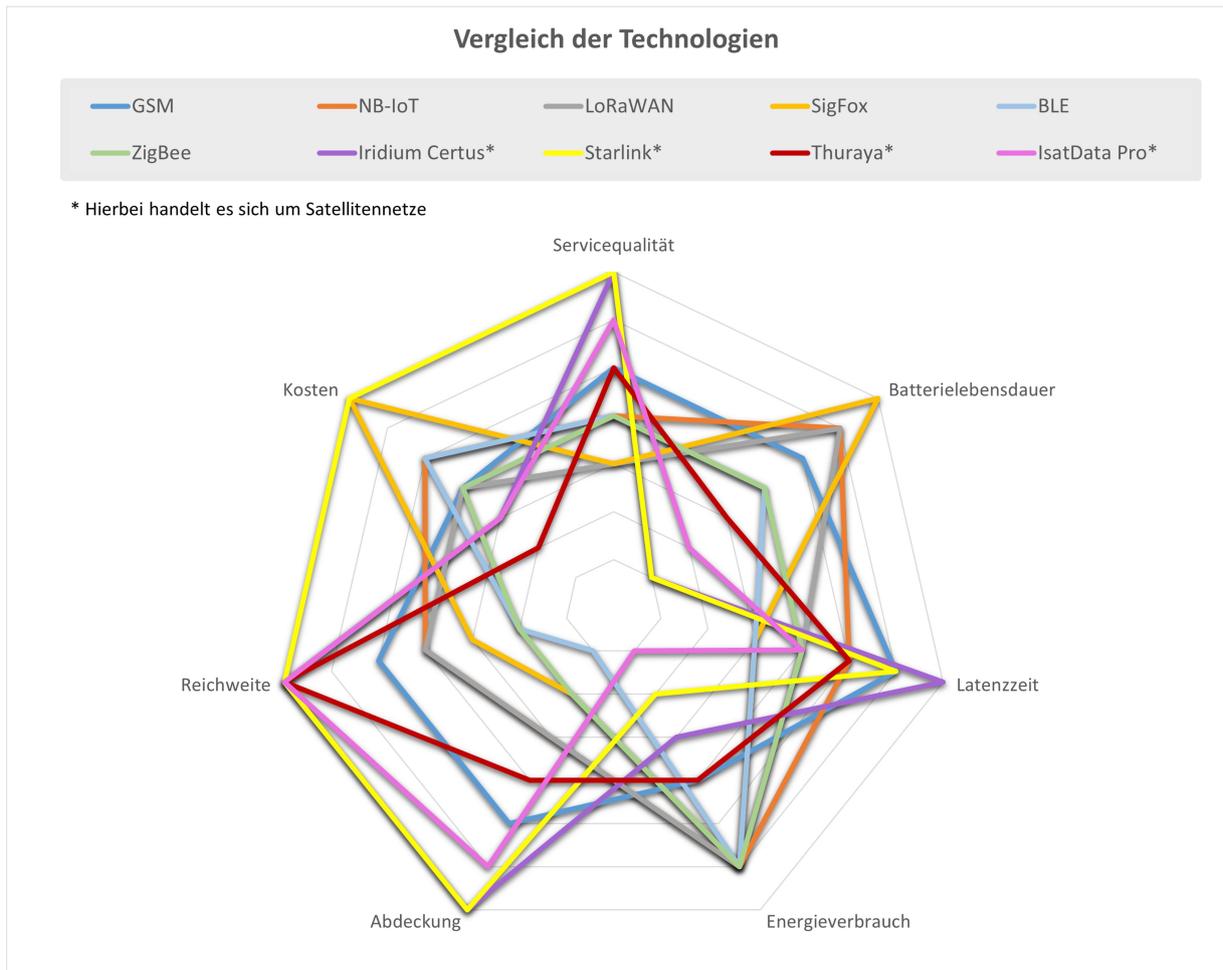


Abbildung 22: Vergleich der Technologien im Spinnennetzdiagramm

3 Eignung der Technologien für verschiedene Anwendungsfälle

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Anwendungsfälle definiert und ausgearbeitet. Abschließend erfolgt eine Bewertung dieser und eine Empfehlung über die Auswahl der entsprechenden Technologie. Hierbei werden nur Anwendungsfälle für die in Kapitel 0 vorgestellten Technologien berücksichtigt.

3.1 Fahrzeugmanagement

Nahezu jedes Unternehmen hat einen eigenen Fuhrpark. Darunter fallen PKWs, LKWs aber auch Flurförderfahrzeuge. All diese Fahrzeuge benötigen eine regelmäßige Wartung, geschieht diese nicht, verschmälert sich der Fuhrpark auf eine ungeplante und unkontrollierte Art und Weise. Nicht nur die Wartung ist wichtig bei einem Fuhrpark, auch die Möglichkeit die Fahrzeuge zu lokalisieren ist von Bedeutung. Mit diesem Wissen können Routen geplant, aber auch im Zweifel Mitarbeiter bei Problemen unterstützt werden.

Das Fahrzeugmanagement umfasst sehr viele verschiedene Parameter. Das Fahrzeugmanagement ist ein bedeutender Teil des gesamten Fuhrparkmanagements. Es werden verschiedene Kennzahlen während des Fahrzeugbetriebes gesammelt und ausgewertet. Anhand von den Auswertungen kann der Fahrzeugbetreiber Optimierungen vornehmen, welche sich positiv auf sein Geschäftsergebnis auswirken. Darunter fallen Aspekte wie vorausschauende Wartung, Auswertung der Fahrprofile auf Geschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch und vorausschauendes Fahren. Nicht nur der Fuhrparkinhaber erhält Vorteile bei der Nutzung eines Fahrzeugmanagementsystems, auch jeder einzelne Mitarbeiter, der die Fahrzeuge benutzt. So kann beispielsweise das Fahrtenbuch automatisch erstellt werden. [125, 126]

Mit dem Fahrzeugmanagement besteht nicht nur die Möglichkeit Fahrzeugparameter zu sammeln, und die Daten auszuwerten, vielmehr können die verschiedenen Fahrzeuge lokalisiert werden. Dabei ist es unabhängig, ob die Lokalisierung auf dem eigenen Werksgelände oder im Straßenverkehr vorgesehen ist.

Zentral für die Funktion eines Fahrzeugmanagements ist die Implementierung einer OnBord Unit in jedem Fahrzeug. Diese erfasst, speichert und gibt die Daten zur Auswertung an ein Rechenzentrum, also eine Software, weiter. Eine solche Hardware wird meistens dann verwendet, wenn die Hauptaufgabe des Fahrzeugmanagementsystems die Lokalisierung des Fahrzeuges ist. Sollen noch zusätzliche Parameter erfasst werden, müssen entsprechende Sensoren an den jeweiligen Fahrzeugkomponenten befestigt werden. Es ist möglich, dass die Sensoren auch über die OnBord Unit mit dem Rechenzentrum kommunizieren. Damit wird nur eine Schnittstelle zur auswertenden Software benötigt. [127]

Ziel des Fahrzeugmanagements ist die Verwaltung, Planung und Steuerung des Fuhrparks, mit dem Fokus auf der Nachhaltigkeit, Effizienz und Kostenorientiertheit. Es können für jeden Anwendungsfall eigene Auswertungen gefahren werden. Vor allem mit der Kombination des Fahrzeugmanagements mit dem Asset-Management, s. Kapitel 3.2, können diverse Vorteile für die gesamte Supply Chain erreicht werden. [128]

Tabelle 27: Übersicht Fallszenarien Usecase Fahrzeugmanagement

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Lokalisierung: Werksgelände	GNSS-Tracker	Erfassen von Standortdaten	Beschränkt auf wenige Kilometer	Genauigkeit und gute Gebäudedurchdringung	Lokalisierung von Flurförderfahrzeugen
Lokalisierung: Straßenverkehr	GNSS-Tracker	Erfassen von Standortdaten	Mehrere Kilometer	Genauigkeit, globale Erfassung von Standortdaten	Lokalisierung von LKWs und PKWs
Fahrzeugüberwachung	GNSS-Tracker mit zusätzlichen Sensoren	Erfassen von Fahrzeugparametern über verschiedene Sensoren	Mehrere Kilometer	<ul style="list-style-type: none"> - Kompaktes Modul - Resistent gegen Verschmutzung, Temperaturschwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung der Stillstandszeiten durch vorausschauende Wartung - Auswertung von Fahrverhalten und damit einhergehend Abnutzung der Fahrzeuge
Routenplanung	GNSS-Tracker Software	Erfassen von Standortdaten und Reaktion auf Verkehrsbedingungen	Mehrere Kilometer	Echtzeitanalyse	<ul style="list-style-type: none"> - Bessere Auslastung von Transporter - Routenaktualisierung bei Verkehrsbedingten Problemen

Ein Fahrzeugmanagementsystem kann mit verschiedenen Konnektivitätstechnologien aufgebaut werden.

Beim Anwendungsfall der Lokalisierung auf dem Werksgelände wird eine gute Gebäudedurchdringung benötigt. Dieses sehr wichtige Kriterium erfüllt die Technologie NB-IoT am besten. Da die benötigte Reichweite nicht sehr groß ist, könnte die Verwendung von LoRa-WAN auch in Betracht gezogen werden.

Für die anderen Anwendungsfälle ist die Erfassung von Standortdaten in einem weitläufigen Gebiet notwendig. Daher ist hier die Verwendung von GSM zu empfehlen, da diese Technologie global die stärkste Netzabdeckung hat und somit die Fahrzeuge global verfolgt werden können.

3.2 Asset-Management

Das Verfolgen und Überwachen von wertvollen Vermögenswerten gehört zu einer der wichtigsten Aufgabengebiete der Konnektivität und gewinnt dabei immer mehr an Bedeutung in unserer Gesellschaft, vor allem in Unternehmen. Waren und Güter müssen mit großer Sorgfalt und unter bestimmten Bedingungen transportiert werden, damit diese ihren vorgesehenen Zustand beibehalten. Zusätzlich sollen dabei die Ortung und Lokalisierung dieser Objekte gewährleistet werden. Unter Vermögenswerte fallen dabei nicht nur Waren und Güter, sondern auch Container und Gepäckstücke. Um diese Objekte weitestgehend zu kontrollieren, ist eine Lokalisierung des Standortes sowie eine Überwachung des Zustandes der Fracht sowohl auf dem Land-, See- und Luftweg notwendig.

Das Asset-Management konzentriert sich dabei auf das Erfassen und Übertragen von Zustandsinformationen entlang des gesamten Transportweges. Dabei wird über GNSS-Tracker der genaue Standort über ein GNSS-Signal (GPS) ermittelt. Die GNSS-Tracker bieten zahlreiche Informationen zur Weiterverarbeitung. Somit wird zusätzlich zur genauen Ortung, ein Wiederfinden des Objektes möglich. Dadurch ist der Schutz des Produktes gewährleistet, da bei unerlaubter Bewegung oder Verlassen des vorgesehenen Standortes ein Alarm generiert werden kann. Außerdem ist eine volle Transparenz gewährleistet, da Informationen über den Transportfortschritt gesammelt und der genaue Aufenthaltsort übertragen wird. [129]

Für die Zustandsermittlung des Objektes bieten die Module zum Teil zusätzliche Sensoren, um weitere Funktionen abzudecken. Diese können beispielsweise über einen Lichtsensor verfügen. Hiermit wird überprüft, ob die Gepäckstücke, während eines Fluges oder am Flughafen von jemandem geöffnet wurden. Des Weiteren können die Tracker eine Temperaturüberwachung besitzen. Diese Lösung übermittelt die Temperatur des Objektes, an dem der IoT Sensor angebracht ist, was in einem Tankcontainer oder bei Kühlgut sehr sinnvoll sein kann. [130]

Die Ziele des Asset-Managements sind zusammengefasst zum einen die Lokalisierung und zum anderen die Überwachung der Güter. Je nach Anwendungsfall kann gezielt auf das einzelne Objekt eingegangen werden. Die Endnutzer oder Unternehmen können die aufgezeichneten Daten dann auf der jeweiligen Endplattform wie z.B. einer Cloud oder App auslesen.

Tabelle 28: Übersicht Fallszenarien Usecase Asset-Management

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Lokalisierung: Waren, Güter, Container und Gepäckstücke	GNSS Tracker	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> für Befestigung an z.B. Koffer	Lokalisierung der Objekte
Zustandserfassung: Temperatur	GNSS Tracker mit Temperatursensor	Erfassen und Ermitteln der Temperatur	Entfernung zwischen Tracker und Objekt	Kompaktes Modul	Zustandsermittlung der Objekte für z.B. Tankcontainer, Kühlgut
Zustandserfassung: Öffnen des Objektes	GNSS-Tracker mit Lichtsensor	Erfassen und Ermitteln des Öffnens der Objekte	Entfernung zwischen Tracker und Objekt	Kompaktes Modul	Ermittlung, ob Objekt geöffnet wurde z.B. fremdes Öffnen eines Gepäckstückes

Bei der Standortlokalisierung und Zustandsermittlung beim Asset-Management sind die gefragtesten Anforderungen die Gerätekosten und die Batterielebensdauer. Zur technischen Realisierung können in diesem Fall die Technologien NB-IoT, SigFox und LoRaWAN betrachtet werden. Diese bieten Module, die zusätzlich zur Lokalisierung, die Temperatur oder die Erschütterung eines Produktes übermitteln können. Durch diese Technologien ist ein globales Tracken, mit einer lückenlosen Überwachung der Objekte, auf Schiffen, Flugzeugen und Fahrzeugflotten möglich. Doch vor allem LoRaWAN bietet neben den geringen Kosten und langen Batterielebensdauer die zuverlässigste mobile Kommunikation, weshalb diese Technologie für diese Anwendung am besten geeignet ist. [131–133]

3.3 Animal Tracking

Durch die Globalisierung und dem Wandel in unserer Gesellschaft gewinnt die Sicherheit unserer Umwelt immer mehr an Bedeutung. Mit Hilfe des Einsatzes von Konnektivitätstechnologien kann dabei durch einfache implementierbare Lösungen, zum Schutz der Umwelt beigetragen werden. Hierbei ist es möglich ein Überwachungssystem für Tiere aufzubauen und deren Standort zu lokalisieren. Dies ist nicht nur für Nutztiere und Haustiere nützlich, sondern kann vor allem bei gefährdeten Wildtieren eingesetzt werden.

Die Hauptaufgabe des Animal-Trackings ist dabei das Erfassen und Übertragen des genauen Standortes der Tiere. Dabei findet über GNSS-Tracker oder Bluetooth eine Lokalisierung der Position statt. Die gewonnenen Daten werden dann in Form einer mobilen Karte zur Verfügung gestellt. Damit können die Halter oder Ranger direkt über die Bewegungen und den genauen Aufenthaltsort des Tieres informiert werden. [134]

Die Tracker können bei Nutz –und Haustieren in Form eines Halsbandes oder als Halfter am Tier befestigt werden. So können Schafherden, die ansonsten oft tageweise gesucht werden müssen, sofort über das Signal gefunden werden. Außerdem kann durch den übermittelten Verlauf, wo sich die Tiere aufgehalten haben, eine Kontrolle erfolgen, welche Flächen bewirtschaftet und genutzt werden. Zudem kann sobald ein Tier einen abgrenzenden Bereich verlässt, ein Alarm generiert werden. Auch im privaten Haushalt, findet der Tracker für ausreisende Katzen und Hunde Einsatz. [135]

Bei Wildtieren stehen neben der Lokalisierung noch weitere Aspekte im Vordergrund. Somit eignet sich die GNSS-Technik beispielsweise dafür die Lebensräume, das Verhalten sowie die Bewegungen von beispielsweise Wölfen und Luchsen zu überwachen. Diese Ergebnisse dienen für verschiedene Forschungszwecke. Die Tiere werden entweder direkt nach der Geburt mit einem Tracker ausgestattet oder kurzzeitig dafür eingefangen. Auch bei vom Aussterben bedrohten Tieren eignet sich diese Methode. Dementsprechend kann ein Tracker im Horn eines Nashorns eingebettet werden. Dadurch können Ranger frühzeitig Gefahrenstellen erkennen und eingreifen sowie die Wilderei durch die übermittelten Informationen eindämmen. [136]

Zusammengefasst ist das Ziel des Animal-Tracking die Überwachung der Tiere. Dies bietet eine Erleichterung der Nachverfolgung, wodurch Zeit eingespart werden kann. Außerdem können die gewonnenen Ergebnisse für Forschungszwecke dienen und zum Schutz gegen aussterbende Tierarten eingesetzt werden.

Tabelle 29: Übersicht Fallszenarien Usecase Animal Tracking

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Lokalisierung: Nutztiere	GNSS Tracker in Halsband / Halfter integriert	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis von mehreren Kilometern	Kompaktes Modul -> integriert in Halsband / Halfter	Lokalisierung der Nutztiere, die bestimmten Bereich verlassen
Lokalisierung: Haustiere	GNSS Tracker in Halsband integriert	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis von mehreren Kilometern	Kompaktes Modul -> integriert in Halsband	Lokalisierung der Haustiere, die entlaufen sind
Lokalisierung: Wildtiere	GNSS Tracker	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis von mehreren Kilometern	Kompaktes Modul	Lokalisierung der Wildtiere für das Schützen der Tiere oder Forschungszwecke

Zur technischen Realisierung von Animal-Tracking bei Nutz- und Haustieren eignet sich vor allem die Technologie BLE. Diese bietet die Möglichkeit von integrierten GNSS-Trackern in Halsbändern und durch den schnellen Datentransfer kann eine durchgehende Überwachung der Tiere sichergestellt werden. Zum anderen sind für die Anwendung SigFox und LoRaWAN ideal, da diese eine langlebige Batterielebensdauer aufweisen, was in der Landwirtschaft oftmals erforderlich ist. [137]

Bei der Lokalisierung von Wildtieren kann die Technologie SigFox eingesetzt werden. Das Unternehmen hat diesbezüglich eine Stiftung gegründet, die sich für die Entwicklung von Technologie-Lösungen für das Animal-Tracking einsetzt und Ergebnisse diesbezüglich bietet. Hierfür stehen Module zum Einsatz, die für den direkten Einsatz bei Wildtieren geeignet sind, da diese einen sehr niedrigen Energieverbrauch aufweisen und somit eine lange Lebenszeit gewährleisten können. [138]

3.4 Umwelt-Monitoring

Konnektivität ist in den unterschiedlichsten Bereichen von Vorteil. Auch in der Land- und Forstwirtschaft ist die digitale Vernetzung nicht mehr wegzudenken. Verschiedenste landwirtschaftliche Geräte kommunizieren miteinander, um so effizient zu arbeiten und optimale Erträge zu erzielen.

Es ist möglich mit Sensoren das Wachstumsstadium der Pflanzen in Echtzeit abzurufen. Dies ermöglicht den Landwirten effizient zu reagieren. Es wird genau zum optimalen Zeitpunkt geerntet und so der Ertrag gesteigert. Durch die Beobachtung der Pflanzen in Kombination mit der Analyse der Wetterdaten ist das Risiko minimiert, dass die Frucht zerstört wird. Ebenfalls lässt sich dadurch die Arbeitsplanung besser anpassen. Die optimale Nutzung der Arbeitsmaschinen verringert die Umweltbelastung durch unnötig ausgestoßenem CO₂. Ebenfalls lässt sich durch Sensoren der Stickstoffbedarf der Pflanzen ermitteln. So können Landwirte die Menge des Düngers anpassen und sparen so Ressourcen ein. Auch Pflanzenschutzmittel lassen sich durch Sensoren an den Pflanzen gezielter einsetzen, was auch die Umwelt schützt.

Eine weitere Anwendung in der Landwirtschaft ist die Analyse des Bodens, auf dem die Pflanzen wachsen. Durch die Feuchtigkeitssensoren lässt sich ermitteln, ob genügend Wasser vorhanden ist oder der Boden zu trocken für die Pflanze ist. Auch die Regenmenge ist erfassbar und hilft den Landwirten die Bedingungen für eine gute Ernte zu beobachten. Hierbei hilft auch die Temperaturüberwachung des Bodens. [139]

In der Forstwirtschaft bringt die Bodenanalyse ebenfalls Vorteile. Auch die Wettersensoren können helfen. So lässt sich die Windrichtung zu jeder Zeit bestimmen. Auch bei Busch- und Waldbränden lässt sich die Rauchentwicklung sofort analysieren und bestimmen. So lässt sich frühzeitig die Gefahr erkennen und die Ausbreitung des Brandes besser bekämpfen. [140]

Im Katastrophenschutz sind die Konnektivitätstechnologien von großem Vorteil. Wenn Sturzfluten auf Land und Zivilisation treffen, ist diese oft nicht vorbereitet. Feuerwehr und Katastrophenschutz reagieren meistens erst, wenn Alarme von Menschen eingehen. Mit Pegelsonden lassen sich Wasserstände regelmäßig überprüfen und melden Unregelmäßigkeiten, welche Menschen zu spät bemerken würden. So können die Helfer schon bevor die Katastrophe eingetreten ist, ausrücken und reagieren. Die gleiche Alarmierung wird bei Erdbeben eingesetzt. Drucksensoren im Erdreich übermitteln Daten kontinuierlich. Falls sich kleinste Bewegungen im Erdreich messen lassen, wird ein Alarm ausgelöst. Menschen sowie Rettungskräfte können frühzeitig reagieren. [141]

Tabelle 30: Übersicht Fallszenarien Usecase Umwelt-Monitoring

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Erfassen von Daten	Sensoren Sendemodul	Erfassen und Übermitteln von Daten	Große Entfernungen	Lange Batterielaufzeiten	Optimierung von land- und forstwirtschaftlichen Prozessen
Alarmierung	Sensoren Sendemodul Alarmierungssystem	Erfassen von Daten und erforderliche, notwendige Funktion ausführen	Große Entfernungen	Lange Batterielaufzeit, zuverlässige Datenübermittlung	Regulieren von Medikamenten, Auslösen eines frühzeitigen Alarm im Katastrophenfall

Bei diesen Anwendungsfällen kann NB-IoT die optimalen Voraussetzungen bieten. Durch Module, welche eine sehr gute Durchdringung von Objekten aufweisen, wie zum Beispiel das Erdreich und eine sehr lange Lebensdauer haben, kann diese Technologie in diesem Fall eingesetzt werden. Durch die Verwendung des Mobilfunknetzes haben die Module eine sehr gute Funkabdeckung.

3.5 Sport und Fitness

In der heutigen Zeit zählt Sport zu einem immer wichtiger werdenden Bestandteil, des Alltags vieler Menschen. Vielen Personen ist wichtig einen Ausgleich des Arbeitsalltags durch Bewegung und Fitness zu schaffen. Dabei werden häufig Fitness – Tracker verwendet, um die sportlichen Daten festzuhalten und zurückgelegte Strecken zu Lokalisieren. Durch diese ist es möglich Zahlreiche Informationen, über die eigene Fitness zu generieren.

Die Tracker bieten zahlreiche spezifische Einstellungen für nahezu jede Sportart. Außerdem verfügen diese über Funktionen wie Schrittzähler, Herzfrequenzmessung, Schlafüberwachung, Kalorienverbrauch, Streckenüberwachung, Intensitätsminuten, Stresslevel, Höhenmesser und viele weitere. All diese Daten, können außerdem durch eine Datensynchronisierung per App auf das Smartphone oder Tablet übertragen werden. Genau an dieser Stelle kommt das Thema der Konnektivität ins Spiel, welche die Lokalisierung und Datensynchronisierung möglich macht. [142]

Die Anforderungen zur Lokalisierung, beziehungsweise zur Streckenüberwachung sind bereits durch das Produkt an sich gegeben. Die Tracker verfügen über eine Funktion, mit der die zurückgelegte Strecke aufgezeichnet werden kann. Auch die Anforderungen für die Datensynchronisierung sind durch wenige, einfache Punkte erfüllt.

Im ersten Schritt benötigt der Anwender den Tracker an sich. Dies ist in den Meisten Fällen ein Fitness-Armband, beziehungsweise eine Fitness-Uhr. Diese verfügt selbst über ein eingebautes Modul, welches für die Datensynchronisierung benötigt wird. Im nächsten Schritt wird ein Smartphone oder Tablet benötigt, auf welches die Daten übertragen werden sollen. Der Benutzer kann dafür das Smartphone verwendet, dass er bereits für den täglichen Gebrauch nutzt. Der letzte Schritt ist das Herunterladen der zugehörigen App, mit der der jeweilige Tracker kommuniziert. Je nach Anbieter fallen für das Herunterladen der App geringe Kosten an. Die meisten Anbieter stellen die App jedoch kostenlos zur Verfügung. [143]

Die Ziele dieser Konnektivitäts-Anwendung beziehen sich darauf, dem Nutzer, von der Tracking-Uhr aufgezeichnete Daten auf sein Smartphone oder Tablet zu übertragen. Der Nutzer kann dadurch seine sportlichen Leistungen analysieren, aber auch gesundheitliche Daten wie beispielsweise Herzfrequenz oder Schlafrhythmus unter Betracht ziehen. Zudem ist es möglich die gewonnen Fitness-Daten mit seiner Ernährung in Verbindung zu stellen und zum Beispiel durch den angegebenen Kalorienverbrauch sein Gewicht regulieren. Es dient somit dazu, die eigenen Leistungen des Körpers überwachen zu können.

Tabelle 31: Übersicht Fallszenarien Usecase Sport und Fitness

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Datensynchronisierung	Tracker Endgerät App	Erfassen und Übermitteln von Daten	Wenige Meter zwischen Tracker und Endgerät	Kompaktes Modul -> integriert in Uhr / Armband	Datenübertragung zur Leistungsanalyse und gesundheitlichen Überwachung
Lokalisierung	Tracker	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> integriert in Uhr / Armband	Auswertung sportlicher Aktivität

Informationen darüber, welche Technologie dafür besonders geeignet ist, wird im Folgenden Abschnitt näher erläutert.

Die Anwendung deckt grundlegend die beiden Funktionen „Standortlokalisierung“ und „Datensynchronisierung“ ab. Die Lokalisierung des Standorts kann erfahrungsgemäß sehr gut durch GNSS (GPS) aufgezeichnet werden. Um letztendlich die Daten des Tracking-Moduls (z.B. Uhr / Armband) auf ein mobiles Endgerät zu übertragen eignet sich die Bluetooth Low Energie Anwendung hervorragend. Durch die stromsparende Funktion wird die Akkulaufzeit während einer Sport-Aktivität nicht negativ beeinflusst und die Kosten eines BLE- Chips halten sich in einem geringen Rahmen.

3.6 Medizin

Die stationäre Pflege und Versorgung in Heimen und Krankenhäusern ist ein sehr großer Kostenpunkt im Gesundheitswesen. Deshalb sind die Bemühungen hoch, die Patienten so lange wie möglich im häuslichen Bereich zu pflegen und zu versorgen. Mit Konnektivitätstechnologien lässt sich dies vereinfachen und leichter umsetzen.

Um die Überwachung bei den Patienten zu Hause zu gewährleisten kommen verschiedenste Sensoren zum Einsatz. Sturzsensoren, welche in Teppichen eingewebt sind, übermitteln sofort, wenn ein Patient gestürzt ist. So kann schnell reagiert werden, damit den Patienten geholfen werden kann. Mit Überwachungskameras sollen Gesundheitsprobleme erkannt werden und voll automatisch gemeldet werden. Dadurch spart man sich wichtige Zeit und kann schneller reagieren und die Menschen behandeln. Über die Aktivität des Briefkastens können auch Abweichungen des Tagesablaufes aufgezeichnet und gemeldet werden. So kann ein Pflegedienst einen Kontrollbesuch durchführen. Auch Bewegungs- und Feuchtigkeitssensoren in Betten können dem Pflegedienst hilfreich sein.

Ebenso ist es möglich intelligente Medikamenten-Dispenser zu benutzen. Diese überprüfen, ob die notwendigen Medikamente genommen wurden und übermitteln dies den Ärzten. Sensoren im Kühlschrank oder in der Toilette überprüfen die Ernährungsvorschriften und welche in Fitnessarmbänder die Aktivitätsempfehlungen der Ärzte und Therapeuten. Diese können sie die Pläne individuell und einfacher an die Patienten anpassen.

Dank neuester Technologien lassen sich auch Langzeit-EKG-Untersuchungen oder das Schlafverhalten in der häuslichen Umgebung untersuchen. Tragbare Blutdruck- oder Blutzuckermessgeräte sind dank Konnektivitätstechnologien immer abrufbar und kontrollierbar. Diese können auch rechtzeitig bei schlechten Werten Alarm geben. Auch Waagen lassen sich vernetzen, womit Diagnosen leichter zu stellen sind, da der Gewichtsverlauf ständig unter Beobachtung steht. Zahnbürsten, welche den Speichel analysieren sind gerade in der Entwicklung, werden aber in naher Zukunft auf den Markt kommen. [144]

Eine weitere Anwendung der Konnektivitätstechnologien in der Medizin liegt auch in der Logistik. Die Medizingeräte und Instrumente werden mit Sensoren und Daten ausgestattet. So kann eine lückenlose Dokumentation erfolgen, wo sich Geräte oder zum Beispiel Operationsbesteck befinden und verwendet werden. Auch kann kontrolliert werden, ob die Instrumente desinfiziert worden sind. Die Planung und Organisation, welche Geräte wann und an welchem Ort eingesetzt werden sollen, lässt sich mit Konnektivitätstechnologien ebenfalls übersichtlicher realisieren. So lassen sich Abläufe und Prozesse in den Kliniken optimieren. [145]

Tabelle 32: Übersicht Fallszenarien Usecase Medizin

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Controlling	Tracker Endgerät App	Erfassen und Übermitteln von Daten	Wenige Meter zwischen Tracker und Endgerät	Kompaktes Modul -> integriert in Alltagsgegenstände	Datenübertragung zur Körper- / Krankheitsbildanalyse und gesundheitlichen Überwachung
Monitoring	Tracker Endgerät	Erfassen von Daten und erforderliche notwendige Funktion ausführen	Wenige Meter zwischen Tracker und Endgerät	Kompaktes Modul für unterwegs Stationär keine Anforderung an die Größe	Regulieren von Medikamenten, Auslösen eines Alarms
Lokalisierung	Tracker	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> integriert in Uhr / Armband / Medizinischen Geräten	- Auswertung vermisster, verunfallter, verwirrter Patienten - lokalisieren und kontrollieren von medizinischen Geräten

Um die Anwendungen im Bereich des Controllings und Monitoring zu realisieren kann BLE verwendet werden. Die relativ geringen Kosten sowie die gute Übertragung an die Endgeräte ist eine ausgezeichnete Voraussetzung für die Anwendungsfälle. Das Tracking der Patienten oder medizinischen Geräte wird mit GSNN realisiert. [145]

3.7 Sicherheit: Personenlokalisierung

Die Lokalisierung von Personen spielt im Bereich der allgemeinen Sicherheit eine wichtige Rolle. Durch neue Anwendungen von Konnektivitätstechnologien ist es möglich den genauen Standort von Personen zu Tracken. Dadurch ist es in vielen Bereichen möglich mehr Sicherheit für bestimmte Personengruppen zu gewährleisten. Dazu zählen unter anderem ältere (dement kranke) Personen, Personal, Kinder oder auch Personen in gefährlichen Berufen (zum Beispiel in Bergwerken oder Bohrinself).

Die Anwendung der Lokalisierung älterer (dement kranker) Personen wird in den meisten Fällen über ein Armband geregelt. Dieses wird von der zu überwachenden Person getragen. Befindet sich diese in einem Alten- oder Pflegeheim wird ein Alarm beim Verlassen des Geländes ausgelöst. Befindet sich die Person in einem normalen Wohnhaus, kann ebenfalls beim Verlassen des Grundstücks oder ab einer bestimmten Entfernung zum Grundstück ein Alarm aktiviert werden. Der jeweilige Tracker kann somit für jeden Anwendungsfall persönlich angepasst werden. [146]

Die Verwendung der Sicherheitsüberwachung kann auch bei Personal in verschiedenen Bereichen Anwendung finden. Dabei steht nicht im Vordergrund einen Alarm beim Verlassen eines bestimmten Bereichs auszulösen, sondern es soll dem Personal ermöglicht werden bei Gefahren selbst einen Alarm auslösen zu können. Dadurch ist es dem Wachpersonal dann möglich direkte Informationen über den Standort der Person zu erhalten, welche sich in Gefahr befindet. Für diese Anwendung werden ebenfalls Armbänder angewendet. Diese verfügen über einen Druckknopf, mit dem der Alarm ausgelöst werden kann. [146]

Die Lokalisierung kann auch für Kinder angewandt werden, wenn Eltern beispielsweise sichergehen wollen, dass ihr Kind sicher den Weg zur Schule oder dem Sportverein übersteht. Hierfür können die Tracker beispielsweise am Schulranzen, an der Jackentasche oder am Fahrrad des Kindes angebracht werden. Darüber hinaus werden Apps zum Tracken des Standorts der Kinder angeboten. Dabei benötigt sowohl das Kind als auch ein Elternteil die notwendige App. Den Eltern wird beim verwenden der App ermöglicht, den aktuellen Standort des Kindes zu erkennen. [147, 148]

Das Sicherheits-Tracking kann auch für Personen, die in ihrem Beruf vielen Gefahren ausgesetzt sind, wie beispielweise Tunnelarbeiter oder Personal in Bergwerken, eingesetzt werden. Für diese Anwendung können die Tracker in den Schutzhelmen oder der Arbeitskleidung der Personen platziert werden. Gefahrenbereiche werden zudem mit einem Node bestückt, der mit dem Tracker kommunizieren kann. Befindet sich eine Person in der Nähe ei-

nes Gefahrenbereichs wird ein Alarm ausgelöst. Außerdem erfolgt eine Lokalisierung des Standorts, was bei Arbeitsunfällen zu schnelleren Hilfsmöglichkeiten dient. [149]

Das Ziel der Personenlokalisierung ist die Generierung einer verbesserten Sicherheit für bestimmte Personengruppen. Je nach Anwendungsfall kann gezielt auf die Sicherheit des einzelnen eingegangen werden. Dadurch ist möglich das Verschwinden von Senioren oder Kindern zu vermeiden, Personen in Notsituationen (beispielsweise sexuelle Belästigung am Arbeitsplatz) Hilfe zu leisten oder Arbeitsunfälle durch frühzeitige Warnsysteme einzudämmen.

Tabelle 33: Übersicht Fallszenarien Usecase Sicherheit

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Lokalisierung: ältere Personen	Tracker	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> integriert in Uhr / Armband	Personenlokalisierung für mehr Sicherheit älterer Personengruppen -> Schutz vor dem Verlaufen
Lokalisierung: Personal	Tracker mit Notruffunktion	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> integriert in Uhr / Armband	Standortlokalisierung um Sicherheit am Arbeitsplatz zu generieren und bei Gefahr einen Notruf auslösen zu können
Lokalisierung: Kinder	Tracker Endgerät (Smartphone, Tablet) App	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> integriert in Schulranzen, Jackentasche	Personenlokalisierung um mehr Sicherheit für Kinder zu schaffen, indem Eltern den Standort des Kindes überwachen können
Lokalisierung: Personen in gefährlichen Berufsgruppen	Tracker Endgerät (Node)	Erfassen von Standortdaten	Standortbestimmung im Umkreis mehrerer Kilometer	Kompaktes Modul -> integriert in der Kleidung oder Helm	Personenlokalisierung um Arbeitsunfällen vorzubeugen; Hinweis auf Gefahrenbereiche

Informationen darüber, welche Technologie dafür besonders geeignet ist, wird im Folgenden Abschnitt näher erläutert.

Die Lokalisierung von älteren Personen in Altenheimen, Krankenhäusern oder Zuhause, sowie die Ortsbestimmung von Personal finden in den meisten Fällen im Indoor-Bereich statt. Mit Hilfe des LoRaWan's ist besonders das Indoor-Tracking gut möglich. Dieses verfügt über einen niedrigen Energieverbrauch und eine lange Haltbarkeitsdauer der Tracker. Dadurch ist es möglich die Anwendung über eine möglichst lange Zeitdauer zu verwenden. Zudem eignet sich die Nutzung von Bluetooth Low Energy. Bei dieser Funktion liegen ebenfalls ein niedriger Energieverbrauch und die Tracker lassen sich besonders gut in Armbändern oder Uhren integrieren.

Für die Standortlokalisierung von Kindern kann das Verwenden von GSM empfohlen werden. Durch kleine GSM-Module, welche an Kleidung, Schulranzen oder anderen Gegenständen angebracht werden, kann der Standort der Kinder ermittelt werden. Der wesentliche Vorteil dieser Technologie ist eine Reichweite von bis zu 35 Kilometer und kann sowohl im Indoor- als auch im Outdoorbereich angewendet werden.

Bei der Lokalisierung von Personen in gefährlichen Berufsgruppen ist die Wahl der Technologie stark von der Reichweite abhängig. Befinden sich die Personen weit in einem großen Umfeld verteilt eignet sich auch bei dieser Anwendung die GSM-Technologie. Reichen kleinere Reichweiten aus kann auch die BLE-Technologie angewandt werden.

3.8 Smart Home

Einer der bedeutendsten und lukrativsten Bereiche, in dem Konnektivitätstechnologien angewendet werden ist die Gebäudeautomatisierung. Hierbei geht es um die Steuerung, Regelung und Überwachung der technischen Geräte eines Gebäudes. Oft wird diese Gebäudeautomation unter dem Begriff Smart Home, also übersetzt intelligentes Zuhause, zusammengefasst und vermarktet. Durch die Vernetzung der einzelnen Geräte werden vor allem für die Bereiche Beleuchtung, Sicherheit und Klimasteuerung Optimierungen geschaffen. [150]

Intelligente Beleuchtungssysteme die durch Sensoren, Sprachsteuerung oder per App reguliert werden können ermöglichen dem Kunden eine sehr hohe Benutzerfreundlichkeit und eine Vielzahl an persönlichen Anpassungen. Auch der Umweltaspekt kommt durch Energieeinsparungspotenzial nicht zu kurz.

Im Bereich Sicherheit haben Konnektivitätstechnologien ebenfalls einen hohen Stellenwert, um Kameras und Bewegungsmelder miteinander und mit einer Schaltzentrale zu verbinden. Alarm- und Brandmeldeanlagen sind außerdem oft direkt mit den Einsatzzentralen von Polizei und Feuerwehr verbunden, um eine schnellstmögliche Rettung zu erhalten. So werden im Notfall die zuständigen Behörden und der Eigentümer des Gebäudes schnellstmöglich mit den benötigten Informationen versorgt. Da es hierbei oft auf jede Minute ankommt können Konnektivitätstechnologien in diesem Bereich sogar Leben retten.

Bei der Klimasteuerung setzen Smart Home Anwendungen nicht nur auf eine vereinfachte Steuerung, sondern werben auch mit Energieeinsparungen, welche den Kunden finanziell entlasten. Diese Kombination aus Energieeffizienz und Komfort für den Benutzer machen die Klimasteuerung zu einem der wichtigsten Anwendungsfelder von Konnektivitätstechnologien im Smart Home Bereich. Die Vernetzung von Heizung, Kühlung, Lüftung, Luftentfeuchtung und Verschattung ermöglicht den Zugriff auf die Steuerung per App. Des Weiteren ist durch stetige Kontrolle über Sensoren eine selbstständige Anpassung der Temperatur über das System möglich. Durch Zeitschaltungen kann eine automatische Klimasteuerung außerdem viel Energie einsparen, wenn beispielsweise nur bei Bedarf geheizt wird. [150]

Zusammenfassend steht bei Smart Home Anwendungen eine Vernetzung verschiedener Endgeräte zur gemeinsamen Steuerung im Vordergrund. Hierbei erfolgt die Steuerung über eine Schaltzentrale, durch das System selbst oder auch über ein mobiles Endgerät.

Tabelle 34: Übersicht Fallszenarien Usecase Smart Home

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Beleuchtungssteuerung	Schaltzentrale Endgerät App (evtl.)	Übertragung von Befehlen	Abdeckung innerhalb eines Gebäudes	Kompatibilität der Lampen mit der verwendeten Technologie	Vereinfachung der Beleuchtungssteuerung
Gebäudesicherung	Sensoren Endgerät Schaltzentrale	Information an Behörden und Eigentümer im Alarmfall	Abdeckung innerhalb eines Gebäudes	Hohe Zuverlässigkeit	Schnellstmögliche Hilfe bei Brand oder Einbruch
Klimasteuerung	Sensoren Endgerät Schaltzentrale	Temperaturanpassung in Gebäuden	Abdeckung innerhalb eines Gebäudes	Verbindung zu unterschiedlichen Geräten	Energieeinsparung durch automatische Temperaturregulation

Zur technischen Realisierung von Smart Home Anwendungen eignet sich die Technologie ZigBee sehr gut, da diese von den führenden Herstellern für diesen Anwendungsfall entwickelt wurde. Da ZigBee von verschiedensten Firmen verwendet wird, ist auch die Vernetzung unterschiedlicher Geräte gewährleistet. Für die Zukunft wird ein Einstieg von BLE in den Smart Home Bereich vorausgesagt, der durch die Weiterentwicklung von BLE vorangetrieben wird. [151]

3.9 Produktion

Im Zuge der Industrie 4.0 wird die Überwachung von Produktionsmaschinen und das Sammeln möglichst vieler Daten hierzu immer wichtiger. Auch in diesem Anwendungsfall bieten Konnektivitätstechnologien eine Vielzahl von Lösungen an.

Eine Maschinenüberwachung in Echtzeit verhindert den Ausfall von industriellen Produktionslinien und ermöglicht die Fernsteuerung zur Verbesserung der Effizienz. Bei Unternehmen, beispielsweise in der Automobilindustrie, bedeutet der Ausfall einer Produktionslinie für nur wenige Stunden bereits hohe Verluste. Um Probleme an Maschinen frühzeitig zu erkennen und Ausfälle der Anlagen zu verhindern, setzen viele Unternehmen bereits auf Konnektivitätstechnologien. [152]

Die gesammelten Daten werden verwendet, um beispielsweise Wartungsintervalle konkret und maschinenspezifisch zu planen. Eine wichtige Rolle kommt hierbei den Sensoren zu, die große Datenmengen in Echtzeit übermitteln und in komplexe Produktionssysteme integrierbar sein müssen. Gleichzeitig ist aber auch ein energiesparendes Arbeiten wichtig. Da die Sensoren oftmals Schwingungen oder Vibrationen messen, um hierüber eine Aussage über den Maschinenzustand machen zu können, müssen sie auch äußerst robust sein. [153]

Tabelle 35: Übersicht Fallszenarien Usecase Produktion

Fall	Notwendige Komponenten	Funktion der Konnektivität	Entfernungsradius	Anforderungen	Ziele
Zustandserfassung	Sensor Gateway	Erfassen von Vibration oder Schwingung	Abdeckung einer Produktionshalle durch ein oder mehrere Gateways	Robust, energieeffizient, schnell	Vorausplanung von Wartungsintervallen
Automatisierung	Sensor Gateway Endgerät	Automatische Weitergabe von Daten zwischen mehreren Maschinen	Abdeckung einer Produktionshalle durch ein oder mehrere Gateways	Robust, energieeffizient, schnell	Erhöhung des Automatisierungsgrades durch „Machine-to-Machine“ Kommunikation

Bei der Auswahl der Technologie gibt es zwei verschiedenen Szenarien. Sollten häufige Kommunikation und hochwertige Serviceleistungen benötigt werden, ist NB-IoT die beste

Technologie. Liegt der Fokus auf Batterielaufzeit und preiswerten Sensoren sind Sigfox oder LoRaWAN zu empfehlen. Auch eine Kombinationslösung aus mehreren der genannten Technologien ist möglich.

3.10 Konnektivität in der Wüste

Die in Kapitel 2.8.2.3 erwähnten *Iridium Edge* Geräte können verwendet werden, um z. B. Verbindungen zu Wassertanks und Pumpen in der Wüste herzustellen. Zu solch einem Szenario gibt es eine Fallstudie von Iridium [119]. In dieser Fallstudie bestand die Herausforderung darin, die Füllstände der Wassertanks von den Ölplattformen im argentinischen Neuquén-Becken regelmäßig zu kontrollieren sowie die Einstellungen der Frackinganlagen vorzunehmen. Einige dieser Anlagen sind zwei bis drei Fahrstunden voneinander entfernt. Die beteiligten Unternehmen waren die *Tesacom Group*, die Kommunikationslösungen im Bereich IoT über Satelliten anbietet und das Unternehmen *Exemys*, das Erfassungsgeräte zur Überwachung entfernter Anlagen entwickelt. Das *Exemys GRD* ist ein kleines elektronisches Gerät für die Fernüberwachung von Industrieanlagen. Es kann mit dem Internet verbunden werden, um den Status von Anlagen, wie Wassertanks und Pumpen zu aktualisieren und den Arbeitern die Möglichkeit zu geben, Einstellungen aus der Ferne vorzunehmen. Diese an den Anlagen angebrachten Geräte benötigen eine zuverlässige Verbindung, zu einem stabilen Netzwerk mit flächendeckender Verfügbarkeit. Einige Erdölunternehmen verwenden dabei Mobilfunk. Dabei werden jedoch Antennen mit einer Höhe von drei oder vier Metern an jedem Standort erforderlich. Auch müssen diese Antennen in die entlegenen Gebiete transportiert und aufgebaut werden, dies verursacht hohe Kosten. [119]

Um mit ihren Geräten zu kommunizieren suchte *Exemys* einen Dienstanbieter, der einfach zu installierende Geräte bieten konnte sowie eine gute Netzabdeckung. *Tesacom* empfahl ihnen ein *Iridium Edge* Gerät. In Kombination mit der mobilen Telemetrieausstattung von *Exemys* war es möglich, eine Verbindung mit den entfernten Anlagen über den SBD-Service von *Iridium* aufzubauen. Es konnten nun Daten abgerufen und Einstellungen aus der Ferne vorgenommen werden. Dabei war es nicht nötig Antennen aufzustellen und so konnten die Geräte von *Exemys* schneller in Betrieb genommen werden als wie über Mobilfunk. Durch das zusätzliche Solarpanel der *Iridium Edge* Geräte bleibt die Verbindung erhalten, auch wenn das Stromnetz ausfällt. Ölgesellschaften, die mit *Exemys* zusammenarbeiten, müssen nun niemanden mehr beauftragen, um ihre Tankfüllstände manuell zu überprüfen und ihre Anlagen zu konfigurieren, da eine Fernwartung ohne Mobilfunk möglich ist. [119]



Abbildung 23: Satellitenkommunikation in der Wüste zur Überwachung von Frackinganlagen mit Wassertanks (Quelle: Iridium Satellite LLC, 2018, [119])

3.11 Maritime Umgebung



Abbildung 24: Satellitenkommunikation in der Antarktis bei wissenschaftlichen Expeditionen (Quelle: Iridium Satellite LLC, 2018, [154])

Polarexpeditionen sind wichtige wissenschaftliche Unternehmungen. Das Klima der Erde wird unter anderem von den Bedingungen an den Polen beeinflusst. Daher sind Umweltwissenschaftler daran interessiert die Antarktis zu erforschen. Im Folgenden wird das Projekt *Antarctic Circumnavigation Expedition (ACE)* beschrieben, das in dem Zeitraum von Dezember 2016 bis März 2017 stattfand. ACE war das erste Projekt des Swiss Polar Institute (SPI), welches sich mit einer internationalen Mission der Erforschung der Polargebiete und anderer

extremer Umgebungen widmete. Das Forschungsteam befand sich auf dem russischen Forschungsschiff und Eisbrecher *Akademik Tryoshnikov*. Auf der Reise wurden mehrere Inseln im Südpolarmeer und der arktische Kontinent besucht. Bei der Durchführung war eine zuverlässige Datenkommunikationslösung erforderlich. Das Team sollte während der Expedition mit heimischen Forschungsteams sowie Freunden und Familien in Verbindung bleiben. Mit GEO-Satelliten ist jedoch eine zuverlässige Netzabdeckung schwer zu erreichen. Da GEO-Satelliten sich nicht über dem Äquator befinden, ist die Netzabdeckung an den Polen mit GEO-Satelliten nicht stabil (siehe Abbildung 20). Durch die Satellitenkonstellation von *Iridium* ist es möglich auch die Polarregionen abzudecken. Die 66 Satelliten befinden sich in der LEO-Erdumlaufbahn (Vgl. Kapitel 2.8.2.3). Es wird keine große und teure Antenne benötigt, um die Verbindung zu den Satelliten aufrecht zu erhalten. Das Schiff wurde mit zwei *Iridium Pilot* Terminals ausgestattet. Mit den Terminals wurde eine Bandbreite von 256 kbit/s verwendet, dies war mehr als genug, um die Daten der Experimente zu senden und zu empfangen. Auch wurde das E-Mail-System restrukturiert, um effizient die Nachrichten im Netzwerk zu übermitteln. Die beiden Hubschrauber des Schiffs waren mit Ortungsgeräten des Iridium Partners *Spidertracks* ausgestattet, so konnte die Besatzung die Flugobjekte jederzeit orten. Die Wissenschaftler, die an Land gingen, waren mit *Iridium GO!* Geräten in Kombination mit ihren Smartphones mit anderen Besatzungsmitgliedern und mit ihren Heimatlaboren in Kontakt. Im Notfall konnten sie auch ihre Position kennzeichnen. Zu guter Letzt ermöglichten die sechs Telefonleitungen der *Iridium Pilot* Terminals die Kommunikation mit ihren Familien auf der anderen Seite des Globus. [154]

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von einem *Iridium Pilot Terminal* in maritimer Umgebung, ist ein Rettungseinsatz, der sich ebenfalls in der Antarktis ereignete. Im März 2018 ist eine Gruppe von fünf Amerikanern auf Joinville Island gestrandet, nahe der Spitze der antarktischen Halbinsel. Sie konnten nicht zu ihrem eigenen Forschungsschiff zurückkehren, da eine Eiswand ihren Weg versperrte. Die Wissenschaftler kontaktierten das US-Antarktisprogramm, welches daraufhin das argentinische Partnerbüro kontaktierte. Das argentinische Außenministerium ermöglichte eine Rettungsmission aus der Ferne, indem es den Marineeisbrecher *Admirante Irizar* kontaktierte. Dieser hatte ein *Iridium Pilot* Terminal an Bord und so konnte der Kontakt bis zum Ende der Rettungsaktion aufrechterhalten werden. Durch die drei Telefonleitungen des *Iridium Pilot* Terminals konnte mit mehreren Gruppen gleichzeitig kommuniziert werden. Dies war für die Rettungsaktion entscheidend, da *Irizar* mit dem argentinischen Außenministerium, der gestrandeten Gruppe sowie ihrem Forschungsschiff in Verbindung bleiben mussten. Dank der zuverlässigen Kommunikation über das *Iridium-Netzwerk* wurden fünf Leben gerettet. Ein Hubschrauber brachte das Team auf

die *Irizar*, auf der sie blieben, bis die Wetterbedingungen die Rückkehr auf ihr eigenes Schiff erlaubten. [155]



**Abbildung 25: Satellitenkommunikation in der Antarktis bei einer Rettungsaktion
(Quelle: Iridium Satellite LLC, 2018, [155])**

3.12 Luftfahrt

Das Unternehmen *Thales* stellt Avionik bereit und kann mit der Partnerschaft von Iridium den Konnektivitätsservice für *Iridium Certus* anbieten. Das *Iridium Certus*-basierte *FlytLINK* Terminal wurde von *Thales* entwickelt. Nun kann das Unternehmen sowohl *Iridium Certus* Terminals als auch *Iridium Certus*-Konnektivitätsdienste für Business Jets, Verkehrsflugzeuge, Drehflügler, die allgemeine Luftfahrt und UAVs (Unpiloted Aerial Vehicle) anbieten. *Iridium Certus* ist die einzige L-Band-Plattform, die eine globale Konnektivität bietet (siehe Anhang A für Frequenzbänder). Die Terminals bieten der Luftfahrt eine hochmoderne Lösung für die Zwei-Wege-Kommunikation im Cockpit und in der Geschäftskabine. Die Flugsicherheitsdienste werden durch *Iridium Certus* aufgewertet. Das Ziel von *Thales* ist die Bereitstellung von Iridium Future Air Navigation System (FANS)-Anwendungen, wie Standard- und „Enhanced-“ ADS-C, Controller-Pilot-Datenlink-Kommunikation und ATS Safety Voice. *Iridium Certus* stellt Internetfunktionen für das Cockpit und die Business-Kabine bereit. So bietet es beispielsweise die Möglichkeit elektronische Flugtaschen, visuelle Wetteranimationen, Black-box-Streaming, E-Mail, Kreditkartenabwicklung, VPN-Zugang und Social Media Posting und Überwachung des Cockpits bereitzustellen. Die *Iridium Certus*-Plattform erfüllt die Anforderungen an Abdeckung, Kosten und Fähigkeiten für die neue Generation der Flugzeugkommunikation. Die hybride *FlytLINK*-Lösung von *Thales*, kombiniert die *Iridium Certus*-Fähigkeiten mit den traditionellen Narrowbanddiensten von Iridium und bietet zusätzliche Sicherheitsdienste. *Iridium Certus* hat sowohl eine geringe Latenzzeit als auch überlegene Leistungsmerkmale und ist daher eine ideale Lösung für das Aeronautical Telecommunications Network (ATN) Open Systems Interconnection (OSI). Außerdem arbeitet Iridium eng

mit großen internationalen Luftfahrtorganisationen und ANSPs (Air Navigation Service Provider) an der Entwicklung der ATN Internet Protocol Suite (IPS) zusammen. Im Gegensatz zu den anderen bestehenden Optionen für Flugzeuge bietet Iridium eine effizientere und leistungsfähigere Alternative. [156]



Abbildung 26: Kommunikationsmöglichkeiten und Cockpitanwendungen mit Iridium Certus Produkten (Quelle: Iridium Satellite LLC, 2020, [157])

Jeder Iridium Satellit ist mit einem ADS-B Empfänger (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) ausgestattet, um jedes einzelne Flugzeug rund um den Globus zu verfolgen. Die Empfänger empfangen die Informationen, die viele Flugzeuge in Echtzeit senden. Dazu gehören der Standort, die Geschwindigkeit und die Höhe des Flugzeugs. Die Satelliten übertragen die Informationen an ein von dem Unternehmen *Aireon* betriebenes Rechenzentrum in Virginia. Von dort aus wirft *Aireon* redundante Nachrichten aus, da möglicherweise mehrere Satelliten dieselben Informationen von einem Flugzeug empfangen. Das Unternehmen bestimmt dann, in welchem Luftraum sich ein Flugzeug befindet und sendet die Informationen an die entsprechende Flugsicherungsorganisation. Der gesamte Prozess dauert weniger als zwei Sekunden. So können die Fluggesellschaften und Länder Informationen erhalten wohin jedes Flugzeug fliegt. Jahrzehnte lang wurde die ADS-B Technologie ohne Empfänger im Weltraum verwendet. Obwohl sich mehr als 600 Empfangstürme auf der ganzen Erde befinden konnte nicht jede Sendung von jedem Flugzeug empfangen werden. Das galt vor

allem für die Flugzeuge über dem Ozean oder über den Kontinenten mit wenig Empfangstürmen. Die Iridium Satelliten können jedoch jede Datensendung von jedem Flugzeug empfangen. Wenn ein Flugzeug über einen ADS-B-Out-Transponder verfügt, sendet es automatisch und kontinuierlich Informationen über seine Koordinaten aus, die alle über die GPS-Satelliten der Luftwaffe berechnet werden. Dies ist laut FAA normalerweise genauer als Radar. Auf der Abbildung 3.10 auf Seite 41 ist der gesamte Prozess der Signalübertragung der Flugzeuge, über die Iridium Satelliten, an das Unternehmen *Aireon* zu sehen. *Aireon* überträgt die Informationen dann von ihrem Rechenzentrum an die Automatisierungsplattform der Flugsicherung. [158]

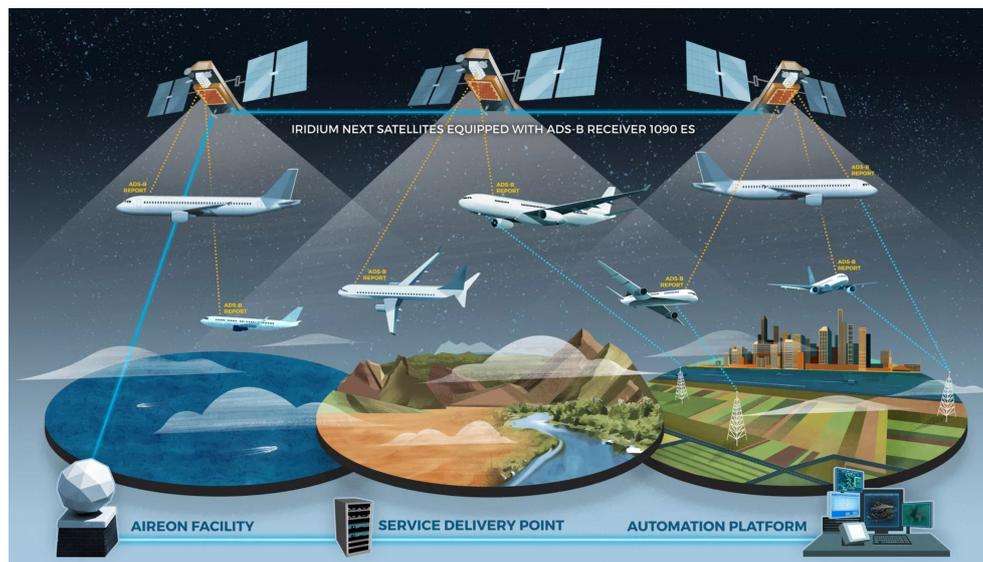


Abbildung 27: Die ADS-B Signalübertragung von Flugzeugen zu den Bodenstationen über Iridium Satelliten (Quelle: Grush, 2019, [158])

3.13 Kommunikation in Gebirgen

Die Thuraya-Technologie ermöglicht es geologischen Expeditionsteams unerforschte, abgelegene Bergregionen und Höhlensysteme zu kartieren und zu vermessen. Beispielsweise liefert Thuraya lebenswichtige Kommunikationsverbindungen für außergewöhnliche Vermessung abgelegener Höhlensysteme in Kirgisistan. Das Tian Shan-Gebirge umfasst eine sehr große Wildnis, die seit Jahrtausenden von Menschen fast unberührt geblieben ist. Da es in diesen Gebieten keine Mobilfunkabdeckung gibt und ein Zwei-Wege-Funk aufgrund der Berge und Täler nur über kurze Distanzen funktioniert, ist die Thuraya-Satellitenausrüstung und das absolut zuverlässige Thuraya-Netzwerk ideal. Die Sicherheit des Forscherteams und die Aufrechterhaltung des Kontakts mit dem Team zu Hause ist nur dann möglich, wenn zuverlässige Technologien, wie die von Thuraya, eingesetzt werden. Die Berge stellen ein großes Hindernis für Kurzwellenfunksignale dar. Für die Thuraya-Satellitentelefone war es jedoch kein Problem, da es einfach war eine direkte Sichtlinie zum Thuraya-Satelliten in der geosta-

tionären Umlaufbahn zu finden. Die *Thuraya XT-PRO* Satellitentelefone ermöglichten dem Team, jederzeit mit dem Basislager in Kontakt zu bleiben. Für die Sicherheit und die Projektkommunikation eines Teams ist dies ein wichtiger Faktor. Im Basislager diente das *Thuraya IP+ Broadband* Terminal als Kommunikationszentrale. Das Expeditionsteam nutzte es, um den E-Mail-Kontakt über das Projekt aufrechtzuerhalten und um sich über anstehende Aufgaben auf dem Laufenden zu halten. Das *Thuraya IP+* wurde benutzt, um Fotos und Berichte über die Arbeit in Kirgisistan an National Geographic zu senden und um diese in den sozialen Medien sowie auf der Website des Teams zu veröffentlichen. Das Team kartierte etwa 60 Höhlen, von denen die meisten bisher unbekannt waren. Thuraya garantiert eine zuverlässige Netzabdeckung und Datenkonnektivität auch in abgelegenen und bergigen Gegenden, mit hervorragender Sprachqualität und Akkulaufzeit. [159]

3.14 Breitbandzugänge im ländlichen Raum

Im ländlichen Raum ist ein schneller Internetzugang, der immer mehr für private Zwecke erforderlich ist, oft nur mangelhaft vorhanden [160, S. 8]. Die Nachfrage nach Bandbreite und geringer Latenz steigt immer mehr. Es werden hochauflösende Filme heruntergeladen und gestreamt, Online-Spiele gespielt und immer mehr Nutzer kaufen zur selben Zeit online ein. Die Serviceerwartungen von Nutzern sind gestiegen. Nur Personen mit eingeschränkten Konnektivitätsoptionen akzeptieren eine geringere Leistung. [161] Mit terrestrischen Lösungen kommen die Netzbetreiber mit der Aufrüstung in diesen Regionen nicht schnell genug nach. Eine Lösung bieten die Satellitensysteme, die auf optische Übertragung setzen. Diese Satellitengeneration wird „Very High Throughput Satellites“ genannt. Millionen Haushalte können mit einer Downloadgeschwindigkeit von mindestens 50 Mbit/s versorgt werden. [160, S. 8]

Neue LEO-Satellitenkonzepte, die die Erde in Höhen von 500 bis 2.000 Kilometer umkreisen, bieten eine schnellere Kommunikation (geringere Latenz) und eine höhere Bandbreite, pro Benutzer, als mit GEO-Satelliten. Wie das Projekt von Starlink zeigt (siehe Kapitel [2.8.2.2](#)), erfordert eine Konstellation mit LEO-Satelliten eine hohe Anzahl an Satelliten, wenn eine globale Abdeckung sichergestellt werden soll. [161] Dies hat Auswirkungen auf die Herstellung der Satelliten, da diese nur noch eine Lebensdauer von ein bis fünf Jahre haben [162]. Ungeachtet dessen bietet Starlink, bereits in der Testphase, Latenzzeiten von 20 bis 40 ms sowie Datenraten bis 150 MBit/s. [69] Laut einer Statistik von *Statista* hatten in Deutschland bis Ende 2019 4,6 % der Haushalte keinen Breitbandinternetzugang (terrestrisch). Ein Breitbandinternetzugang hat eine Downstreamgeschwindigkeit von mehr als 16 Mbit/s. Des Weiteren haben 16,2 % der Haushalte in Deutschland keinen Zugang zu einem Breitbandinternetzugang mit einer Downstreamgeschwindigkeit von mehr als 100 Mbit/s. [163] Eine Lö-

sung für diese Haushalte ist die Möglichkeit über Satelliteninternet eine Geschwindigkeit von bis zu 150 MBit/s zu erreichen, wenn der Ausbau des terrestrischen Netzes zu hohe Kosten verursachen würde. Da die Latenz, wie oben erwähnt, im Starlink-Netz 20 bis 40 ms beträgt, kann Starlink mit terrestrischen Internetverbindungen mithalten. Im terrestrischen unterscheidet sich die Latenz je nach Art des Internetanschlusses [164]. Bei DSL liegt die Latenz durchschnittlich zwischen 20 und 100 ms, wobei VDSL immer weiterverbreitet ist und somit eine Latenz zwischen 15 und 30 ms möglich sein kann. Bei Glasfaser liegt die Latenz hingegen zwischen 5 und 20 ms. Glasfaser ist jedoch im ländlichen Raum nicht immer gegeben und somit kein Vergleich zum Satelliteninternet. [164]

4 Fazit

Die vorliegende Zusammenstellung aus den unterschiedlichsten Konnektivitätstechnologien gibt einen Einblick in die technischen Eigenschaften der Technologien. Durch die Auflistung der Vor- und Nachteile jeder Technologie kann ein Anwender entscheiden welche Technologie für den vorgesehen Einsatz am besten geeignet ist. Es werden die Kosten der Technologien gegenübergestellt sowie besondere Haupteigenschaften. In einem anschaulichen Spinnennetzdiagramm können die Stärken der einzelnen Technologien schnell erfasst werden. Durch einige aufgezeigte Anwendungsgebiete wird deutlich, dass die Technologien vielseitig eingesetzt werden können. Je nach Anwendungsfall wird die verwendete Technologie und deren Geräte beschrieben. So können die Vorteile der jeweiligen Technologie anschaulich im Praxiseinsatz verdeutlicht werden. In den Tabellen des Kapitels 2.9 werden die Technologien übersichtlich zusammengefasst. Auch wenn die Technologien in ihren Eigenschaften sehr unterschiedlich sind, dienen sie alle dazu eine Konnektivität aufrechtzuerhalten. Die Kommunikation und der Datenaustausch sind im digitalen Wandel wichtige Bausteine, um den technischen Fortschritt zu ermöglichen. Die Technologien, die einen Großteil dazu beitragen konnten durch diese Zusammenstellung erfasst werden. Da die Technologien sich ständig verbessern und andere hinzukommen muss stets der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt werden. Dieses Werk dient dazu den aktuellen Stand darzustellen und bedarf daher kontinuierlicher Aktualisierung.

5 Literatur

- [1] Statista, *Number of IoT devices 2015-2025*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (Zugriff am: 29. Oktober 2020).
- [2] M. Wazid, A. K. Das, V. Odelu, N. Kumar, M. Conti und M. Jo, „Design of Secure User Authenticated Key Management Protocol for Generic IoT Networks“, *IEEE Internet Things J.*, Jg. 5, Nr. 1, S. 269–282, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2780232.
- [3] Informationszentrum Mobilfunk, *Wie funktioniert der GSM-Mobilfunkstandard?* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.informationszentrum-mobilfunk.de/technik/funktionsweise/gsm> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [4] TopTarif, *GSM*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.toptarif.de/internet/wissen/gsm/> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [5] Martin Sauter, *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced Pro, UTMS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*, 7. Aufl., 2018.
- [6] Informationszentrum Mobilfunk, *Wissenswertes zu 5G*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.informations-zentrum-mobilfunk.de/technik/funktionsweise/5g> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [7] Elektronik Kompendium, *Mobilfunktechnik (Grundlagen)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0406221.htm> (Zugriff am: 27. April 2020).
- [8] 5G-Anbieter.info, *5G Ausbau*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.5g-anbieter.info/5g-ausbau/?_sm_au_=iVVrpZQZtr4QR553MvGjHK6N88tc1 (Zugriff am: 27. April 2020).
- [9] Deutsche Telekom AG, *Narrowband IoT Bahnbrechend für das Internet der Dinge*. Bonn: Deutsche Telekom AG, 2017.
- [10] Magenta Business Blog, *NarrowBand-IoT (NB-IoT)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://businessblog.magenta.at/narrowband-iot> (Zugriff am: 8. April 2020).
- [11] Vodafone, *Narrowband-IoT: Internet of Things*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/media/downloads/pdf/vodafone-whitepaper-narrowband-iot.pdf> (Zugriff am: 12. April 2020).
- [12] IT Administrator, *3GPP*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.it-administrator.de/lexikon/3gpp.html> (Zugriff am: 8. Januar 2020).

- [13] Mario Riedel, *Narrowband iot (NB-IoT)*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.t-systems.com/blob/790264/845f392f65c70dee43cda56921ce6ffa/Digitaler_Staat_NBloT_Riedel.pdf (Zugriff am: 24. April 2020).
- [14] Vodafone, *NB-IoT Entwicklungskit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/business/loesungen/nb-iot-development-kit.html> (Zugriff am: 27. April 2020).
- [15] Magenta Business Blog, *Warum ist NB-IoT die ideale Lösung für IoT Anwendungen?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.magenta.at/business/iot-nb-narrowband/> (Zugriff am: 28. Dezember 2019).
- [16] Vodafone, *Narrowband-IoT nutzen: Das sind die Vorteile*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/business/featured/digitales-business/digitale-geschaeftsprozesse/gruende-fuer-narrowband-iot/> (Zugriff am: 28. Dezember 2019).
- [17] Vodafone, *LPWA-Standards: Warum Narrowband-IoT die optimale Technologie ist*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/business/featured/technologie/der-lpwa-standard-technische-grundlage-fuer-narrowband-iot/> (Zugriff am: 28. März 2019).
- [18] LoRaWAN, *LoRaWAN*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lora-wan.de/> (Zugriff am: 2. April 2020).
- [19] smart city solutions, *LoRaWAN und das Internet der Dinge steckt in den Kinderschuhen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smart-city-solutions.de/lorawan-und-das-internet-der-dinge-steckt-in-den-kinderschuhen/> (Zugriff am: 24. April 2020).
- [20] Netzwerkstruktur, *Netzwerktopologie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lawerence.de/map/struktur.php>. (Zugriff am: 24. April 2020).
- [21] LineMetrics, *Endlich verständlich: LoRa (und LoRaWAN) einfach erklärt!* [Online]. Verfügbar unter: https://www.linemetrics.com/de/blog/lora-und-lorawan-einfach-erklart/?_sm_au_=iVVV5nSMJqR4kPkQMvGjHK6N88tc1 (Zugriff am: 26. April 2020).
- [22] Robert Koning, *Was ist LoRa und LoRaWAN*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smart-city-solutions.de/wp-content/uploads/2018/03/LoRa-und-LoRaWAN-erkl%C3%A4rt.pdf> (Zugriff am: 26. April 2020).
- [23] Wienke Giezeman, *Das LoRaWAN als IoT-Netzwerktechnologie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.farnell.com/das-einmaleins-des-lorawan> (Zugriff am: 27. April 2020).

-
- [24] Vivek Mohan, *Datenübertragung im Internet der Dinge*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iot-design.de/fachartikel/datenuebertragung-im-internet-der-dinge/> (Zugriff am: 24. April 2020).
- [25] Marcel Linnemann, Alexander Sommer, Ralf Leufkes, *Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft*.
- [26] SigFox, *Our Story*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story> (Zugriff am: 1. Mai 2020).
- [27] Cetecom, *Sigfox Technologie zur Verbindung von Sensoren und Geräten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cetecom.com/de/news/sigfox-technologie-zur-verbundung-von-sensoren-und-geraeten/> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [28] ITWissen.info, *SigFox*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itwissen.info/SigFox-SigFox.html> (Zugriff am: 30. April 2020).
- [29] Aurelius Wosylus, *Sigfox - ein Netzwerk für Sensoren und Big Data*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/sigfox--ein-netzwerk-fuer-sensoren-und-big-data-a-657186/> (Zugriff am: 30. April 2020).
- [30] Alexander Lehmann, *Sigfox hat die 0G-Funkspezifikation offengelegt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/sigfox-hat-die-0g-funkspezifikation-offengelegt-a-856746/> (Zugriff am: 30. April 2020).
- [31] SigFox, *Supply Chain & Logistics*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sigfox.com/en/supply-chain-logistics> (Zugriff am: 29. April 2020).
- [32] SigFox, *Home Lifestyle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sigfox.com/en/home-lifestyle> (Zugriff am: 29. April 2020).
- [33] SigFox, *Smart Cities*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sigfox.com/en/smart-cities> (Zugriff am: 29. April 2020).
- [34] Jan Markendahl, *Cost Structure of IoT Connectivity Services*. Master Thesis.
- [35] SigFox, *How many devices do you want to connect ?* [Online]. Verfügbar unter: <https://buy.sigfox.com/buy/offers/DE> (Zugriff am: 6. Mai 2020).
- [36] Aurelius Wosylus, *Sigfox. Das bessere LoRa?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gebaeuedigital.de/fachartikel/sigfox-das-bessere-lora/>.
- [37] Tipp-Center, *Was ist Bluetooth Low Energy? Das müssen Sie wissen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tipps.computerbild.de/hardware/komponenten/was-ist-bluetooth-low-energy-das-muessen-sie-wissen-845057.html> (Zugriff am: 28. April 2020).

- [38] Elektronik Kompendium, *Bluetooth Low Energy (4.0 / 4.1 / 4.2)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1805171.htm> (Zugriff am: 25. April 2020).
- [39] Rudi Latuske, *Bluetooth Low Energy in Smartphones - wie funktioniert das?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/kommunikation/bluetooth-low-energy-in-smartphones-wie-funktioniert-das-103061.html> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [40] Conrad, *Bluetooth*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.conrad.de/de/ratgeber/technik-einfach-erklart/bluetooth.html> (Zugriff am: 26. April 2020).
- [41] D. Maier, *Bluetooth Low Energy - Introducing iBeacon*. Technische Universität München, 2015.
- [42] Kamran Sah, *Bluetooth 5.0 für mehr Leistung im IoT*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/bluetooth-5-0-fuer-mehr-leistung-im-iot/> (Zugriff am: 20. Mai 2020).
- [43] DigiKey, *Bluetooth 4.1, 4.2 und 5 kompatible Bluetooth-Low-Energy-SoCs und -Tools stellen sich den Herausforderungen des Internets der Dinge*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.digikey.de/de/articles/bluetooth-41-42-5-low-energy-socs-meet-iot-challenges-part-1?utm_adgroup=General&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Dynamic%20Search_DE_RLSA_Site%20Visitor&utm_term=&productid=&gclid=CjwKCAjwqpP2BRBTEiwAfpID (Zugriff am: 20. Mai 2020).
- [44] Christopher Kleiber, *BLE*.
- [45] S. Venzke-Caparese, *Standortlokalisierung und personalisierte Nutzeransprache mittels Bluetooth Low Energy: In Datenschutz und Datensicherheit*. Springer, 2014.
- [46] Christopf Strobel, *Beacon-Technologie: Das große Ding der kleinen Dinger*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.techtag.de/it-und-hightech/warum-das-jahr-der-ibeacons-wird/> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [47] Paul Bekedorf, *Beacons, iBeacons und Eddystone – ein Überblick*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.audioguide.me/beacons-ibeacons-und-eddystone-ein-ueberblick/> (Zugriff am: 25. April 2020).
- [48] N. K. Gupta, *Inside Bluetooth Low Energy*. Boston: Artech House, 2013.

- [49] Chip, *Bluetooth LE (Low Energy): Das ist der Unterschied zu normalem Bluetooth*. [Online]. Verfügbar unter: https://praxistipps.chip.de/bluetooth-le-low-energy-das-ist-der-unterschied-zu-normalem-bluetooth_114239 (Zugriff am: 25. April 2020).
- [50] Ralf Gessler, *Wireless-Netzwerke für den Nahbereich*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [51] Gupta Aditya, *The IoT Hacker's Handbook : A Practical Guide to Hacking the Internet of Things*. Berkley: Apress, 2019.
- [52] IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Hg., *Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements -: Part 15-4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wire. s.l. .: IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2018.*
- [53] Markus Krause und Rainer Konrad, Hg., *Drahtlose ZigBee-Netzwerke*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [54] Conrad, *ZigBee Standard*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.conrad.de/de/ratgeber/technik-einfach-erklart/zigbee-standard.html> (Zugriff am: 28. April 2020).
- [55] A. B. Amewuda, F. A. Katsriku und J.-D. Abdulai, „Implementation and Evaluation of WLAN 802.11ac for Residential Networks in NS-3“, *Journal of Computer Networks and Communications*, Jg. 2018, S. 1–10, 2018, doi: 10.1155/2018/3518352.
- [56] W. W. Osterhage, *Sicherheitskonzepte in der mobilen Kommunikation: Drahtlose Kommunikation - Protokolle und Gefahren*. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [57] o.A., *WLAN-Frequenzen und -Kanäle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1712061.htm> (Zugriff am: 16. Juli 2020).
- [58] Q. Qu *et al.*, „Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLANs Standard - IEEE 802.11ax“, *Mobile Netw Appl*, Jg. 24, Nr. 5, S. 1461–1474, 2019, doi: 10.1007/s11036-019-01277-9.
- [59] o.A., *IEEE 802.11ah / Low Power WiFi / WiFi HaLow*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/2101101.htm> (Zugriff am: 16. Juli 2020).
- [60] o.A., *IEEE 802.11s / Wireless Mesh Network (WMN)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1408051.htm> (Zugriff am: 16. Juli 2020).

-
- [61] DATACOM Buchverlag GmbH, *infrastructure mode*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itwissen.info/infrastructure-mode-Infrastruktur-Modus.html> (Zugriff am: 16. Juli 2020).
- [62] M. Sauter, *Grundkurs mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*, 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [63] R. Gessler und T. Krause, Hg., *Wireless-Netzwerke für den Nahbereich: Eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [64] J. N. Pelton, S. Madry und S. Camacho Lara, „Satellite Applications Handbook: The Complete Guide to Satellite Communications, Remote Sensing, Navigation, and Meteorology“ in *Handbook of Satellite Applications*, J. N. Pelton, S. Madry und S. Camacho-Lara, Hg., Springer New York, 2013, S. 3–17, doi: 10.1007/978-1-4419-7671-0_91.
- [65] N. Panagiotarakis, I. Maglogiannis und G. Kormentzas, *An Overview of Major Satellite Systems*. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/255631955_An_Overview_of_Major_Satellite_Systems. Zugriff am: 3. November 2020.
- [66] C. Meinel und H. Sack, *Digitale Kommunikation*. Springer-Verlag GmbH.
- [67] Christopher Bertele, *Internet via Satellit – Elon Musk startet Starlink-Projekt*. Verfügbar unter: <https://computerwelt.at/news/internet-via-satellit-elon-musk-startet-starlink-projekt/>. Zugriff am: 25. Dezember 2020.
- [68] Kurt G. Baldenhofer, *Umlaufbahn*. Verfügbar unter: <https://www.fe-lexikon.info/lexikon-u.htm>. Zugriff am: 1. Januar 2021.
- [69] Thuraya, *T2M brochure 2*. Verfügbar unter: <https://www.thuraya.com/sites/default/files/T2M%20brochure%202.pdf>. Zugriff am: 26. Oktober 2020.
- [70] Thuraya, *Thuraya XT-PRO DUAL*. Verfügbar unter: <https://thuraya.com/xt-pro-dual>. Zugriff am: 26. Oktober 2020.
- [71] Expeditionstechnik Därr GmbH, *Satellitentelefon Thuraya XT-PRO DUAL*. Verfügbar unter: <https://www.expeditionstechnik.de/satellitentelefon-thuraya-xt-pro-dual.html>. Zugriff am: 28. Dezember 2020.

-
- [72] Expeditionstechnik Därr GmbH, *Thuraya SatSleeve Hotspot*. Verfügbar unter: <https://www.expeditionstechnik.de/thuraya/thuraya-satellitentelefon/thuraya-satsleeve-hotspot.html>. Zugriff am: 15. Januar 2021.
- [73] Thuraya, *Thuraya SatSleeve+*. Verfügbar unter: <https://thuraya.com/satsleeve-plus>. Zugriff am: 26. Oktober 2020.
- [74] Expeditionstechnik Därr GmbH, *Satellitentelefon Thuraya XT-LITE*. Verfügbar unter: <https://www.expeditionstechnik.de/satellitentelefon-thuraya-xt-lite.html>. Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [75] Orbital SatCom, *Thuraya T2M-DUAL GSM & Satellite Asset Tracker*. Verfügbar unter: <https://osat.com/thuraya-t2m-dual-asset-tracker>. Zugriff am: 5. November 2020.
- [76] Thuraya, *Modems Comparison Table*. Verfügbar unter: [https://www.thuraya.com/sites/default/files/Modems Comparison Table _0_0.pdf](https://www.thuraya.com/sites/default/files/Modems%20Comparison%20Table_0_0.pdf). Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [77] Thuraya, *Thuraya Atlas IP Brochure*. Verfügbar unter: [https://www.thuraya.com/sites/all/modules/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/products/Atlas-IP/Thuraya Atlas IP Brochure.pdf](https://www.thuraya.com/sites/all/modules/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/products/Atlas-IP/Thuraya%20Atlas%20IP%20Brochure.pdf). Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [78] Orbital SatCom, *Thuraya Atlas IP-Satelliten-Internet-Terminal*. Verfügbar unter: <https://osat.com/thuraya-atlas-ip-satellite-internet-terminal#specification>. Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [79] Expeditionstechnik Därr GmbH, *Prepaid SIM Thuraya NOVA 100*. Verfügbar unter: <https://www.expeditionstechnik.de/thuraya/thuraya-sim-karten-und-prepaid-guthaben/prepaid-sim-thuraya-nova-100.html>. Zugriff am: 29. Dezember 2020.
- [80] Thuraya, *Pricing*. Verfügbar unter: <https://thuraya.com/pricing-plans>. Zugriff am: 29. Dezember 2020.
- [81] Expeditionstechnik Därr GmbH, *Tarife und Bedingungen zu THURAYA "NOVA 100 Pre-pay Plus Plan" SIM*. Verfügbar unter: <https://www.expeditionstechnik.de/pdf/NOVA100SIM.pdf>. Zugriff am: 29. Dezember 2020.
- [82] Bundesnetzagentur, *Liste der in Deutschland zugeteilten Satellitenfunknetze*. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/SpezielleAnwendungen/Satellitenfunk/Satell

-
- itenfunknet-
ze.pdf;jsessionid=A46536C840A203EB2C506FD41557C8D9?__blob=publicationFile&v=20. Zugriff am: 5. November 2020.
- [83] Adam Mann, *Starlink: SpaceX's satellite internet project*. Verfügbar unter: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>. Zugriff am: 25. Dezember 2020.
- [84] Elon Musk, *Announcement of SpaceX in Seattle in 2015*. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=AHeZHyOnsm4>. Zugriff am: 25. Dezember 2020.
- [85] Amy Thompson, *Watch SpaceX launch 60 new Starlink internet satellites into orbit today*. Verfügbar unter: <https://www.space.com/spacex-starlink-12-internet-satellites-launch-webcast>. Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [86] unternehmen24 e.U., *Starlink Germany GmbH, Handelsregistereintrag*. Verfügbar unter: <https://www.unternehmen24.info/Firmeninformationen/Deutschland/Firma/4790983>. Zugriff am: 26. Dezember 2020.
- [87] Bundesnetzagentur, *Liste der in Deutschland zugeteilten Satellitenfunknetze*. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/SpezielleAnwendungen/Satellitenfunk/Satellitenfunknetze.pdf?__blob=publicationFile&v=22. Zugriff am: 26. Dezember 2020.
- [88] Samantha Mathewson, *SpaceX opens Starlink satellite internet to public beta testers: report*. Verfügbar unter: <https://www.space.com/spacex-invites-starlink-internet-beta-testing>. Zugriff am: 25. Dezember 2020.
- [89] SCR00CHY, *Starlink Compendium*. Verfügbar unter: <https://www.elonx.net/starlink-compendium/>. Zugriff am: 25. Dezember 2020.
- [90] M. Wall und C. Cofield, *SpaceX Returns to Flight with 10-Satellite Launch, Rocket Landing*. Verfügbar unter: <https://www.space.com/35338-spacex-return-to-flight-rocket-launch-landing-success.html>. Zugriff am: 30. Dezember 2020.
- [91] Iridium Satellite LLC, *Iridium Certus*. Verfügbar unter: https://www.theastgroup.com/media/shared_documents/FS_Iridium_Certus_Maritime_Fact_Sheet_GER_061219.pdf. Zugriff am: 26. Dezember 2020.
- [92] Iridium Satellite LLC, *Iridium Corporate Overview - Fact Sheet*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?dlim-dp-dl=256574>. Zugriff am: 26. Dezember 2020.

-
- [93] Iridium Satellite LLC, *Polar coverage without compromise*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/solutions/polar/>. Zugriff am: 27. Dezember 2020.
- [94] Iridium Satellite LLC, *Autonomous Systems*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/solutions/autonomous-systems/>. Zugriff am: 28. Dezember 2020.
- [95] Iridium Satellite LLC, *Iridium Edge Solar*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=246525>. Zugriff am: 28. Dezember 2020.
- [96] Whenever Communications, *Iridium Edge*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/iridium-edge>. Zugriff am: 15. Januar 2021.
- [97] Iridium Satellite LLC, *Iridium Pilot*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=24045>. Zugriff am: 28. Dezember 2020.
- [98] Whenever Communications, *Iridium Pilot Maritime*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/iridium-pilot-maritime-broadband-terminal-410>. Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [99] Whenever Communications, *Iridium Certus Thales VesseLINK 350*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/thales-vesselink-350>. Zugriff am: 15. Januar 2021.
- [100] Jason Hicks, *Thales FlytLINK on Iridium Certu - Data Sheet*. Verfügbar unter: [https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/document/2019-10/FlytLINK Data Sheet_10.08.2019_0.pdf](https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/document/2019-10/FlytLINK%20Data%20Sheet_10.08.2019_0.pdf). Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [101] Whenever Communications, *Iridium 9555 Satellite Phone Standard Package*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/iridium-9555-satellite-phone-kit-4>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [102] Whenever Communications, *Iridium Extreme 9575 Satellite Phone Kit*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/iridium-9575-extreme-satellite-phone-kit-7>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [103] Whenever Communications, *Iridium GO! Satellite Hotspot*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/iridium-go-252>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [104] Orbcomm Inc., *ORBCOMM Announces Launch Window for Second OG2 Mission*. Verfügbar unter: <https://www.orbcomm.com/de/company-investors/news/2015/orbcomm-announces-launch-window-for-second-og2-mission>. Zugriff am: 30. Dezember 2020.

- [105] M. Lilienthal und M. Stade, *Erfolgreicher Start von elf Orbcomm OG2-Satelliten*. Verfügbar unter: <https://www.dgap.de/dgap/News/corporate/ohb-erfolgreicher-start-von-elf-orbcomm-ogsatelliten/?newsID=917923&print=1>. Zugriff am: 30. Dezember 2020.
- [106] World Meteorological Organization, *Satellite Data Telecommunication Handbook*.
- [107] Inmarsat Global Limited, *Inmarsat Global Xpress full global coverage completion*. Verfügbar unter: <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/government/2015/inmarsat-global-xpress-full-global-coverage-completion.html>. Zugriff am: 11. Januar 2021.
- [108] Inmarsat Global Limited, *Global coverage. Infinite connections*. Verfügbar unter: <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/satellites.html>. Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [109] Inmarsat Global Limited, *IsatData Pro Brochure*. Verfügbar unter: https://www.inmarsat.com/content/dam/inmarsat/corporate/documents/enterprise/solutions-services/Inmarsat_Service_IsatDataPro.pdf.coredownload.pdf. Zugriff am: 11. Januar 2021.
- [110] Blue Tree Systems GmbH, *IsatData Pro*. Verfügbar unter: <https://www.orbcomm.com/de/networks/satellite/isatdata-pro>. Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [111] Orbcomm Inc., *IDP-782*. Verfügbar unter: https://www.orbcomm.com/PDF/datasheet/german/idp_780-de.pdf. Zugriff am: 30. Dezember 2020.
- [112] CPN Satellite Services GmbH, *Orbcomm IDP-782 Angebot*.
- [113] CPN Satellite Services GmbH, *Inmarsat Isat DataPro Price List*.
- [114] Iridium Satellite LLC, *The Iridium Advantage for Land Mobile*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=261144>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [115] Thuraya, *Satellite phone Comparison sheet*. Verfügbar unter: [https://www.thuraya.com/sites/default/files/Satellite phone comparison sheet_1.pdf](https://www.thuraya.com/sites/default/files/Satellite%20phone%20comparison%20sheet_1.pdf). Zugriff am: 18. Januar 2021.
- [116] Whenever Communications, *Iridium Global Prepaid Service - 150 Minutes*. Verfügbar unter: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/iridium-global-prepaid-service-150-min-212>. Zugriff am: 19. Januar 2021.

-
- [117]Whenever Communications, *Iridium Edge Fact Sheet*. Verfügbar unter:
https://satellitephonestore.com/uploads/documentation/2690/FS_Iridium_Edge_Fact_Sheet_ENG_FEB18.pdf. Zugriff am: 18. Januar 2021.
- [118]Iridium Satellite LLC, *Iridium IoT - Comparison Chart*. Verfügbar unter:
<https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=24127>. Zugriff am: 27. Dezember 2020.
- [119]Iridium Satellite LLC, *Iridium Edge - Connecting Equipment Across the Desert*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=209385>. Zugriff am: 28. Dezember 2020.
- [120]Whenever Communications LLC, *Thuraya Satellite Services & Plans*. Verfügbar unter:
<https://satellitephonestore.com/thuraya-services>. Zugriff am: 5. November 2020.
- [121]Joey Klender, *Starlink competitor Xfinity launches data caps, which SpaceX says it will not use*. Verfügbar unter: <https://www.teslarati.com/starlink-data-caps-comcast-xfinity/>. Zugriff am: 19. Januar 2021.
- [122]P.-B. Bök, A. Noack, M. Müller und D. Behnke, *Computernetze und Internet of Things*. Springer-Verlag GmbH.
- [123]H. Dodel und S. Eberle, *Satellitenkommunikation*. Springer-Verlag GmbH.
- [124]Orbcomm Inc., *Warum Satellit für IoT? 6 entscheidende Vorteile*. Verfügbar unter:
<https://blog.orbcomm.com/warum-satellit-fur-iot-6-entscheidende-vorteile/>. Zugriff am: 6. Januar 2021.
- [125]Hirschvogel, *Connect — die beste Verbindung zu Ihrem Mercedes*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hirschvogel.eu/werkstatt-und-teile/werkstattleistungen/konnektivitaet> (Zugriff am: 26. Mai 2020).
- [126][Telematik]Wissen, *Technisches Fahrzeugmanagement*. [Online]. Verfügbar unter:
<https://telematikwissen.de/funktionen/technisches-fahrzeugmanagement/>.
- [127]intelli Route, *Wie funktioniert Fuhrparkmanagement?* [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.intelliroute.de/fuhrparkmanagement> (Zugriff am: 26. Mai 2020).
- [128]A. H. Andreas Nickel, *Definiton Fuhrparkmanagement*. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.flottenlexikon.de/wiki/Fuhrparkmanagement> (Zugriff am: 26. Mai 2020).
- [129]Warenortung.de, *Warenortung per GPS*. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.warenortung.de/Ortung_Transportfahrzeuge_Warenlieferung_Gueterkraftverkehr_Tracking_Satellit_GPS_Galileo.html (Zugriff am: 23. Mai 2020).

- [130]pocket navigation, *Here Tracking: Damit keine Waren mehr verloren gehen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pocketnavigation.de/2017/12/here-tracking-damit-waren/> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [131]businesswire, *Sigfox und Louis Vuitton kooperieren bei innovativem Gepäck-Tracker*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.businesswire.com/news/home/20180403006247/de/> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [132]Simon Rusch, *Einzelne Güter sensorgestützt verfolgt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.it-production.com/hardware-und-infrastruktur/asset-tracking-im-narrowband-iot/> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [133]Simon Rusch, *"SENSOR GESTÜTZTES TRACKING AUF WARENEBENE" IN LOGISTIK EXPRESS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.q-loud.de/blog/g%C3%BCter-bleiben-im-funkkontakt-in-logistik-f%C3%BCr-unternehmen-0> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [134]Vodafone, *Mobile Asset Tracking am Beispiel: Der Beasttracker vernetzt Haustiere via IoT*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/business/featured/digitale-vorreiter/experten/internet-of-things-als-geschaeftsmodell-beasttracker-vernetzt-haustiere/> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [135]Lagerhaus, *GPS-ORTUNG FÜR NUTZTIERE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lagerhaus.at/unser-lagerhaus/regional-sortiment/a/gps-ortung-fuer-tiere> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [136]bornemann, *GPS Ortung und Überwachung von Wildtieren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://bornemann.net/gps-ortung-und-ueberwachung-von-wildtieren/> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [137]sinfosy, *Bluetooth Low Energy*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sinfosy.com/beaconrtls/index.html> (Zugriff am: 23. Mai 2020).
- [138]SigFox, *SigFox Foundation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://sigfoxfoundation.org/>.
- [139]Simon Dupree, *Das Internet der Dinge*. [Online]. Verfügbar unter: <https://reset.org/knowledge/das-internet-der-dinge-11162015> (Zugriff am: 27. Mai 2020).
- [140]Stefan Luber, *Was ist NarrowBand IoT?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ip-insider.de/was-ist-narrowband-iot-a-681057/>.

- [141] Jan Vollmuth, *Das Internet der Dinge beginnt mit einem Sensor*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/das-internet-der-dinge-beginnt-mit-einem-sensor-a-626570/> (Zugriff am: 28. Mai 2020).
- [142] Garmin, *Garmin*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.garmin.com/de-DE/> (Zugriff am: 21. Mai 2020).
- [143] Elektronik Kompendium, *Bluetooth Low Energy (4.0 / 4.1 / 4.2)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1805171.htm> (Zugriff am: 25. April 2020).
- [144] Prof. Dr. Christian Johner, *Internet der Dinge (IoT) im Gesundheitswesen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.johner-institut.de/blog/medizinische-informatik/internet-der-dinge-iot-im-gesundheitswesen/> (Zugriff am: 24. Mai 2020).
- [145] Claudia Neumann, *Wie das Internet der medizinischen Dinge unser Gesundheitssystem transformiert*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.atlas-digitale-gesundheitswirtschaft.de/internet-der-medizinischen-dinge/> (Zugriff am: 25. Mai 2020).
- [146] deister electronic, *Zuverlässige Personenschutzsysteme mit RFID*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.deister.com/de/loesungen/personenschutzsysteme/> (Zugriff am: 21. Mai 2020).
- [147] Verivox, *Tracking: Kinder, Tiere oder Gegenstände orten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verivox.de/ratgeber/tracking-kinder-tiere-oder-gegenstaende-orten-1000729/> (Zugriff am: 21. Mai 2020).
- [148] SCAND, *GPS-GESTÜTZTE APP ZUR ORTUNG VON KINDERN*. [Online]. Verfügbar unter: <https://scand.de/portfolio/kids-tracking-application/> (Zugriff am: 21. Mai 2020).
- [149] Gina Wurms, *Asset- und Personen Tracking im Tunnelbau*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.infsoft.com/de/use-cases/asset-und-personen-tracking-im-tunnelbau>.
- [150] Karolin Wisser, *Gebäudeautomation in Wohngebäuden (Smart Home)*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [151] Alina Günder, *Wird Bluetooth ein neuer Smart Home-Standard?: Home and Smart*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.homeandsmart.de/bluetooth-mesh-netzwerk-spezifikation> (Zugriff am: 20. Mai 2020).
- [152] Kais Mekki, *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*, 5. Aufl. IVT Express, 2015.
- [153] Katharina Hogh-Binder, *Maschinenüberwachung mit intelligenten Sensoren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bosch->

-
- presse.de/pressportal/de/de/maschinenueberwachung-mit-intelligenten-sensoren-44917.html (Zugriff am: 26. Mai 2020).
- [154] Iridium Satellite LLC, *Case Study: Iridium Pilot – Keeping the Poles Connected on the ACE*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?dlm-dp-dl=36126>. Zugriff am: 1. Januar 2021.
- [155] Iridium Satellite LLC, *Case Study: Iridium Pilot Aids Antarctic Rescue*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?dlm-dp-dl=209666>. Zugriff am: 2. Januar 2021.
- [156] Jordan Hassin, *Iridium and Thales Expand Partnership to Deliver Aircraft Connectivity Services*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/file/244592/>. Zugriff am: 13. Januar 2021.
- [157] Iridium Satellite LLC, *Iridium Certus for Commercial Aviation*. Verfügbar unter: <https://www.iridium.com/download/?dlm-dp-dl=220493>. Zugriff am: 13. Januar 2021.
- [158] L. Grush, *How a new satellite constellation could allow us to track planes all over the globe*, *The Verge*. Verfügbar unter: <https://www.theverge.com/2019/2/7/18207182/iridium-next-satellite-constellation-airon-ads-b-air-traffic-control>. Zugriff am: 13. Januar 2021.
- [159] Thuraya, *Thuraya provides vital communication links for groundbreaking survey of remote cave systems in Kyrgyzstan*. Verfügbar unter: https://www.thuraya.com/sites/default/files/Thuraya_Kyrgyzstan_Martin_Edstrom_1.pdf. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [160] DGLR Fachausschuss, *Positionspapier - Satellitenkommunikation in Deutschland*. Verfügbar unter: https://www.dglr.de/fileadmin/inhalte/dglr/fb/r2/r22/Positionspapier_12_09_2014.pdf. Zugriff am: 15. Oktober 2020.
- [161] C. Daehnick, I. Klinghoffer, B. Maritz und B. Wiseman, *Large LEO satellite constellations: Will it be different this time?* Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/large-leo-satellite-constellations-will-it-be-different-this-time>. Zugriff am: 31. Dezember 2020.
- [162] Tariq Malik, *How to Spot SpaceX's 60 New Starlink Satellites in the Night Sky*. Verfügbar unter: <https://www.space.com/see-spacex-starlink-satellites-in-night-sky.html>. Zugriff am: 31. Dezember 2020.
- [163] Statista, *Verfügbarkeit von Breitbandinternet für Haushalte in Deutschland nach Downstreamgeschwindigkeit von 2016 bis 2019*. Verfügbar unter:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/300246/umfrage/verfuegbarkeit-von-breitbandanschluesen-in-deutschland/>. Zugriff am: 1. Januar 2021.

[164] Michael Hülskötter, *8 hilfreiche Tipps: Ping-Zeiten für schnelleres Internet verbessern*.

Verfügbar unter: <https://www.it-techblog.de/8-hilfreiche-tipps-ping-zeiten-fuer-schnelleres-internet-verbessern/12/2017/>. Zugriff am: 1. Januar 2021.