



Energiesparer

LPWAN – Low Power Wide Area Networks

Während das Internet (siehe Kasten „Die Entstehung des Internets“) ursprünglich kommunizierende Computer und damit Menschen an diesen Rechnern vernetzte, werden in den letzten Jahren mit rasant zunehmender Tendenz auch Gegenstände (Dinge) darüber miteinander verbunden. Ein Teil des „Internets der Dinge“ sind Geräte und Sensoren, die über Technologien wie (W)LAN oder Bluetooth kommunizieren. Allerdings sind diese Anbindungen nicht überall vorhanden, benötigen teilweise relativ viel Energie oder teure bzw. aufwendige Hardware. Wir schauen uns mit LPWAN (Low Power Wide Area Network) eine schlanke, stromsparende Variante für die Vernetzung von Sensoren an.



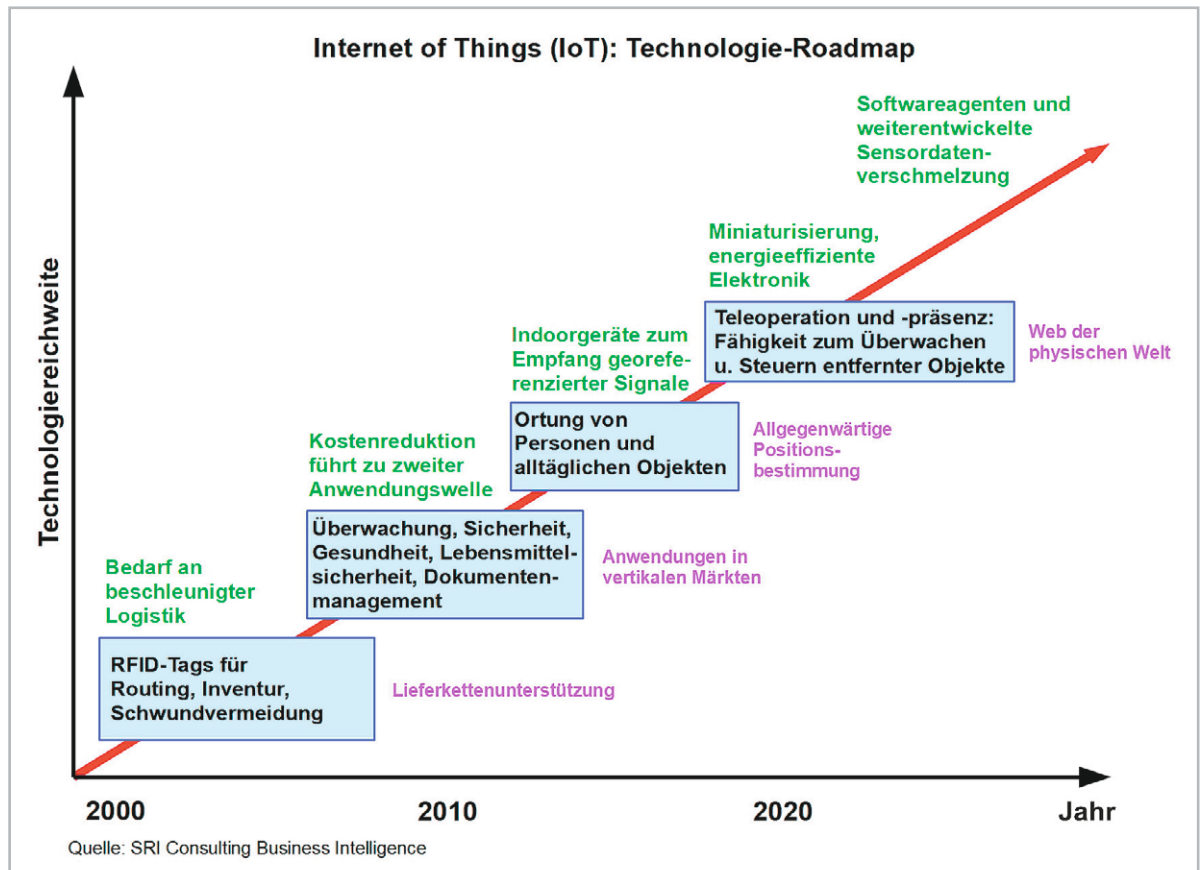


Bild 1: Das IoT wird sich im Lauf der kommenden Jahre immer weitere Anwendungsfelder erschließen und zum Netz der physischen Welt entwickeln. Dafür sind funkbasierte Übertragungsverfahren mit geringem Energie- und Bandbreitenbedarf erforderlich.

IoT: Das Internet der Dinge

Analysten weltweit sehen in dem „Internet der Dinge“ (Internet of Things: IoT) eine schnell wachsende, disruptive innovative Technologie, die bereits jetzt durch mehr als 20 Milliarden Sensoren (manche Prognosen sprechen gar von 100 Milliarden vernetzter Dinge) in Maschinen, Geräten und Fahrzeugen eine Unmenge an Informationen verfügbar macht.

Diese werden sich nur mit den Algorithmen der künstlichen Intelligenz (AI: Artificial Intelligence), den darin enthaltenen Analysemethoden des „tiefgehenden Lernens“ (Deep Learning: ein Teilbereich des maschinellen Lernens) und des komplexen Datenmanagements nutzen und beherrschen lassen.

Eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle wird unter teilweiser Verdrängung herkömmlicher aufkommen. Das IoT hat das Potenzial, die Effizienz und Nachhaltigkeit wirtschaftlicher Prozesse von Mobilität, Ressourcenverbrauch, Umweltschutz, Sicherheit, im Sozialbereich etc. neu zu definieren (Bild 1).

Ein schönes Beispiel für den Mehrwert eines sensorbestückten Produktes mit Internetzugang gab Simon Cook, Chef der Londoner Venture Capital Firma DSJ Esprit, im Jahre 2013 im Wall Street Journal: „Stellen Sie sich eine mit dem IoT verbundene Mausefalle vor. Das ist kein Produkt mehr, sondern eine Dienstleistung. Anstatt dass jemand nachschauen muss, ob eine Maus gefangen wurde, weiß man, wenn die Falle ausgelöst wurde. Dann nimmt man die Daten, macht die Mäuse ausfindig und kann das Mäuseproblem lösen. So gelangt man von einem Produkt über Big Data zu einem völlig neuen Service.“

Sensoren können also ein Produkt oder ein technisches System „smart“ machen, d. h. ihm Eigenschaften verleihen, die weit über seine ursprünglichen Fähigkeiten hinausgehen und es damit aufwerten. Das gilt bei Immobilien (Smart Building) ebenso wie im Straßenverkehr (Smart Traffic), bei dem Gesundheitsarmband (Smart Watch), dem multifunktionalen Mobiltelefon (Smart Phone), der Energieverteilung (Smart Grid) und einer Unzahl weiterer „Smart Objects“ und „Smart Systems“.

LPWAN: Kommunikation im IoT

Die zuverlässige und energieeffiziente Kommunikation mit und unter den Sensoren ist die wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung der IoT-Gesellschaft. Sie wird aus Gründen der Flexibilität und Dynamik weit überwiegend drahtlos und batteriebetrieben erfolgen. Dabei sind die Funkverfahren so zu wählen, dass sie den Anforderungen in Bezug auf Datenmengen, Zugriffshäufigkeit, Energieeffizienz für lange Batterielebensdauer, Latenzzeiten, Zuverlässigkeit, Abdeckung und Sicherheit usw. optimal angepasst sind. Man kann sie unter dem Überbegriff LPWAN (Low Power Wide Area Network) zusammenfassen (Bild 2).

Drei „C“ charakterisieren die Hauptanforderungen an IoT-LPWA-Netze:

1. Cost: Geringe Kosten für Geräte und Dienste
2. Coverage: große Reichweite und Flächenabdeckung
3. Current: Lange Batterielebensdauer durch niedrige Stromaufnahme

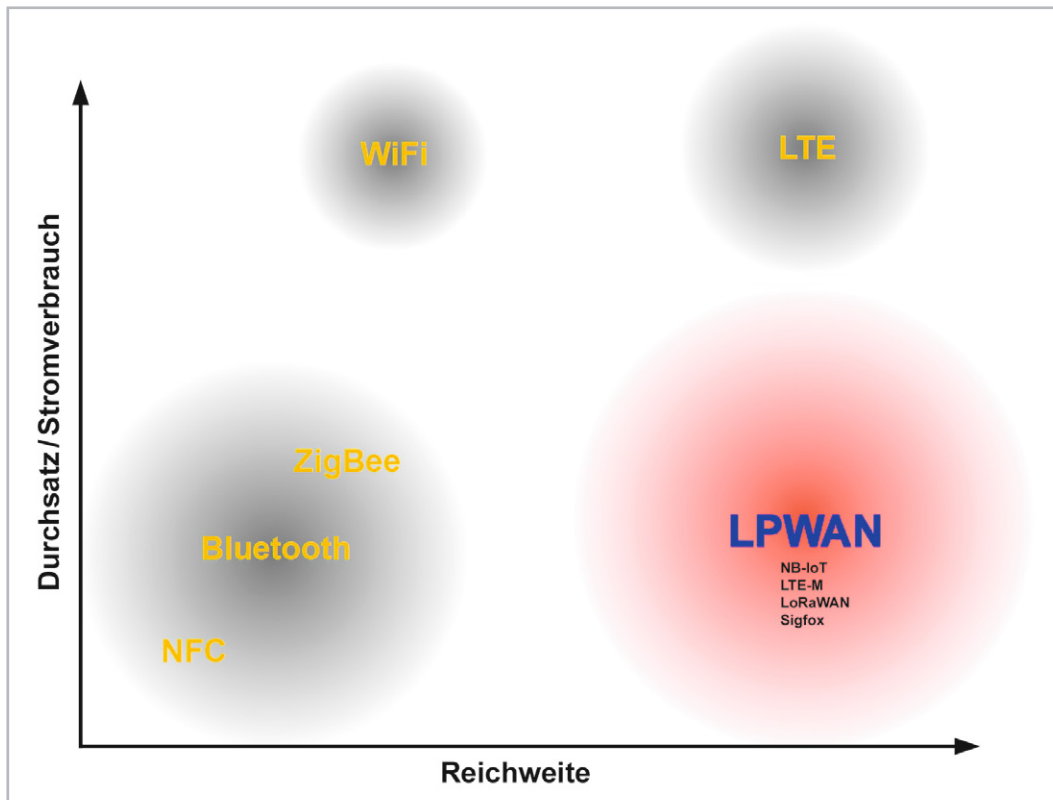


Bild 2: LPWAN (Low Power Wide Area Networks) sind Funknetze mit niedrigem Energieverbrauch und großer Abdeckung. Damit sind sie die idealen IoT-Netze, wo es meistens um die gelegentliche Übertragung von Messwerten und Steuerbefehlen ohne harte Zeitanforderungen geht.

Grob gesagt soll ein LPWAN-Gerät zehn Jahre lang ohne Batteriewechsel im Feld funktionieren, eine Entfernung von bis zu 10 km zur Basisstation überbrücken und weniger als 10 Byte/h übertragen. In einer Funkzelle sollen über 10.000 Geräte mit der Basisstation in Verbindung stehen können.

Die direkte Funkkommunikation Tausender Sensoren mit dem Anwender, der daraus seine Schlüsse zieht und Reaktionen ableitet, ist nur in Nahbereichsszenarien denkbar. Bei größeren Distanzen müssten die Sendeleistungen unzulässig hoch sein und die Frequenzressourcen wären schnell erschöpft. Die Topologie eines IoT-Netztes sieht deshalb ein Netz von Basisstationen (Konzentratoren) vor, die über kurze bis mittlere Distanzen in einer Funkzelle mit den Sensoren drahtlos und energiearm kommunizieren und

den Datenverkehr über eine „Cloud“ (z. B. das Internet) zum Application-Server des Nutzers weiterleiten.

Besonders im Bereich des industriell genutzten IoTs (IIoT: Industrial Internet of Things) sind riesige Potenziale zur Kostensenkung und Leistungssteigerung gegeben. Man denke nur an kontinuierliche Überwachung von Anlagenzuständen und Produktionsprozessen, dynamische Optimierung des Energie- und Rohstoffverbrauchs, proaktive Wartung usw.

Sigfox

Sigfox [1] ist ein 2009 in Frankreich gegründeter LPWAN-Netzwerkanbieter. Er stellt seine Dienstleistungen in lizenzfreien SRD-Bändern (SRD: Short Range Device) in 45 Ländern und Regionen weltweit zur Verfügung. In Europa und einigen Ländern des Nahen Ostens gilt der RC1-Frequenzplan (RC: Radio Configuration) von 868–878,5 MHz mit einer maximal zulässigen Sendeleistung von 16 dBm (EIRP: Equivalent Isotropic Radiating Power).

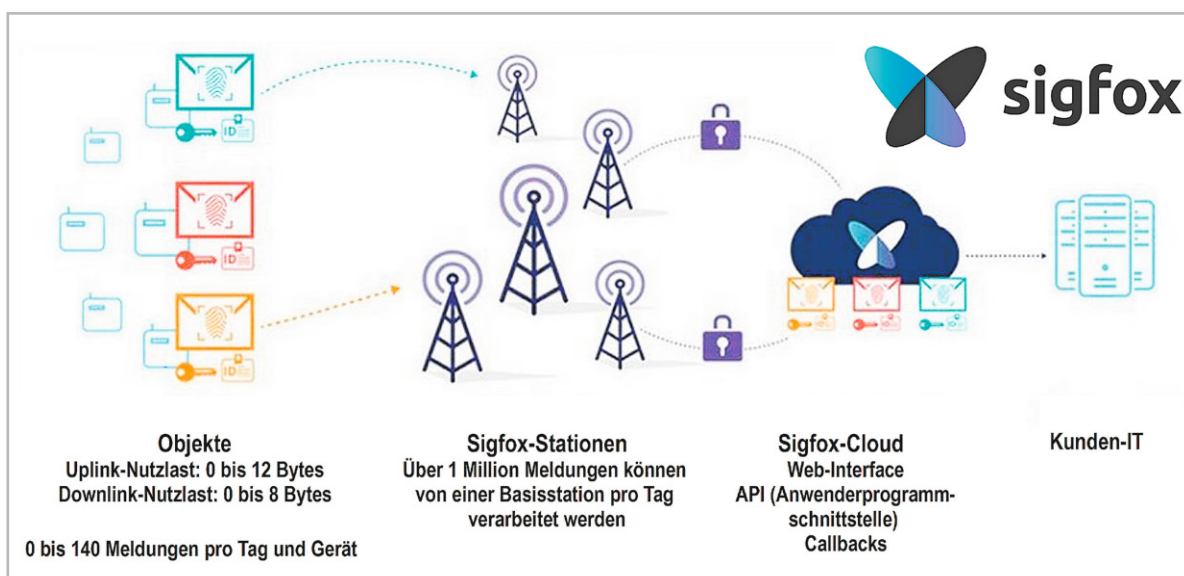


Bild 3: Ein Sigfox-Netz umfasst die einzelnen Objekte im Feld, mit ihnen per Funk kommunizierende Basisstationen als Konzentratoren und die Sigfox-Cloud. Quelle: Sigfox



Sigfox ist bereits in 72 Ländern und Regionen verfügbar. Das Ziel ist, in den nächsten Jahren den Globus zu 100 % abzudecken.

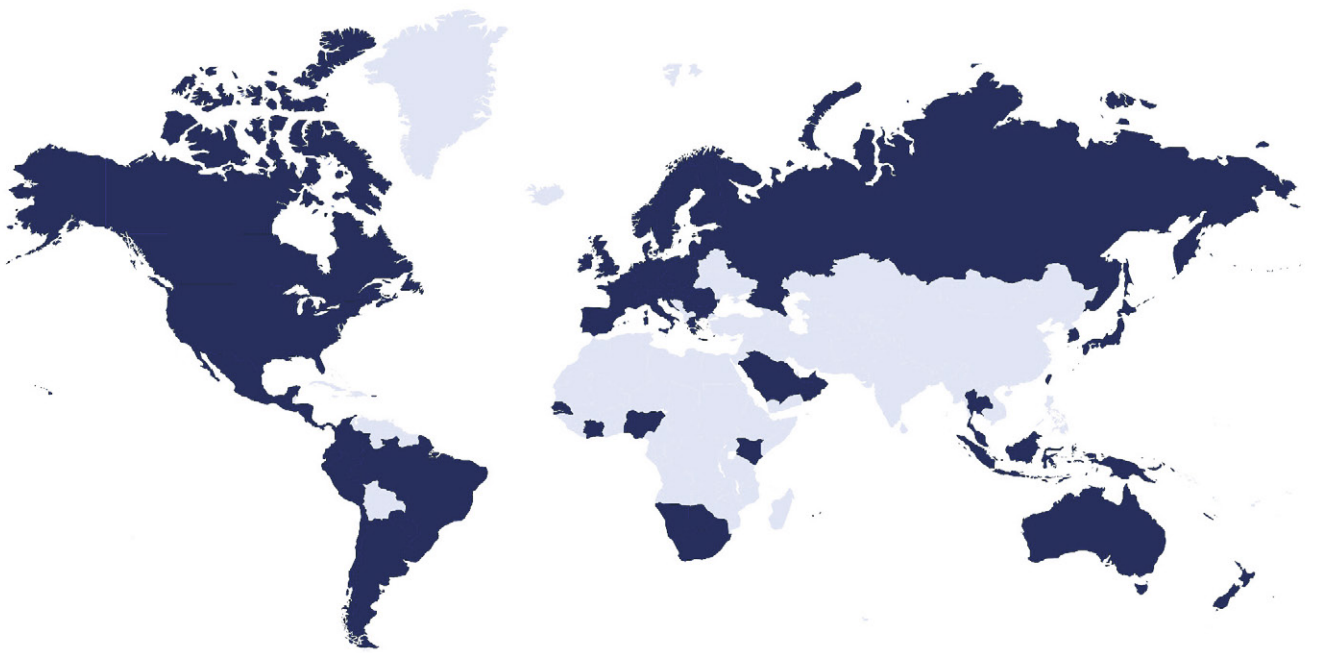


Bild 4: Von einer globalen Abdeckung ist Sigfox noch weit entfernt. Der Roll-out findet gegenwärtig nur in den dunkelviolett eingefärbten Ländern statt. Die hellvioletten Flächen kennzeichnen die Gebiete, wo Sigfox bereits verfügbar ist.

ted Power \triangleq Strahlungsleistung) entsprechend der Sendeleistung eines rundum gleichförmig mit max. 40 mW abstrahlenden fiktiven Kugelstrahlers. Geräte mit Sigfox-Technik können im hindernisfreien Funkfeld bis zu 50 km überbrücken, in bebauten Gebieten 3–10 km. Sigfox-Geräte kommunizieren mit Sigfox-Basisstationen, welche die Daten an Sigfox-Server weiterleiten, wo sie aufbereitet und auf die Server oder Endgeräte des Kunden weitergeleitet werden. Sigfox betreibt somit eine eigene Cloud, SIM-Karten für die Nutzung herkömmlicher Mobilfunknetze sind nicht erforderlich. Sigfox erlaubt einem Endgerät, maximal 140 Mitteilungen pro Tag à 12 Byte abzusetzen (Bild 3). Jede Basisstation kann bis

zu einer Million Objekte verwalten. In Europa nutzt Sigfox das 868-MHz-ISM-Band. Die Sendeleistung der Sigfox-Module/Geräte beträgt 14 dBm (25 mW). Die Reichweite und Störsicherheit der Übertragung kann durch Antennen mit Richtwirkung vergrößert werden.

Die globale Abdeckung von Sigfox ist gegenwärtig noch lückenhaft (Bild 4). Deshalb treibt das Unternehmen den globalen Roll-out voran, um die lokale Verfügbarkeit schnellstmöglich zu vergrößern. Für die vollständige Abdeckung von Frankreich und Deutsch-

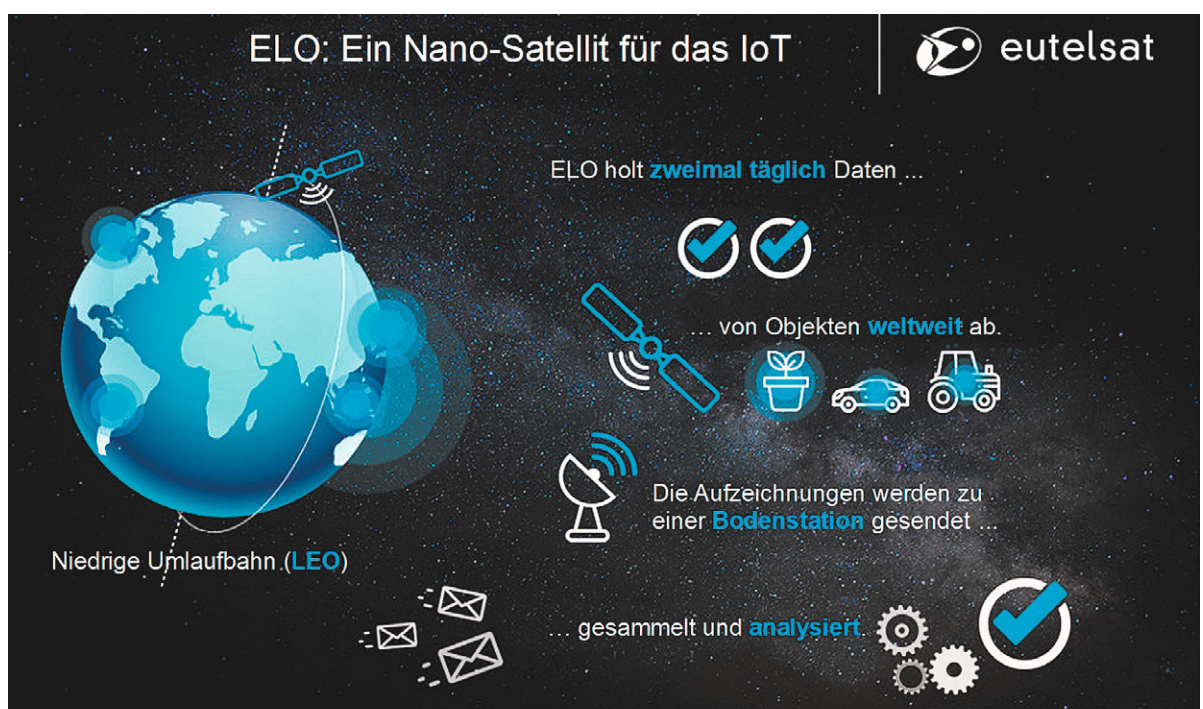


Bild 5: Der Nano-Satellit ELO sammelt aus einer ca. 500–600 km hohen Umlaufbahn die Daten von IoT-Objekten ohne terrestrische Internetanbindung.
Quelle: Eutelsat

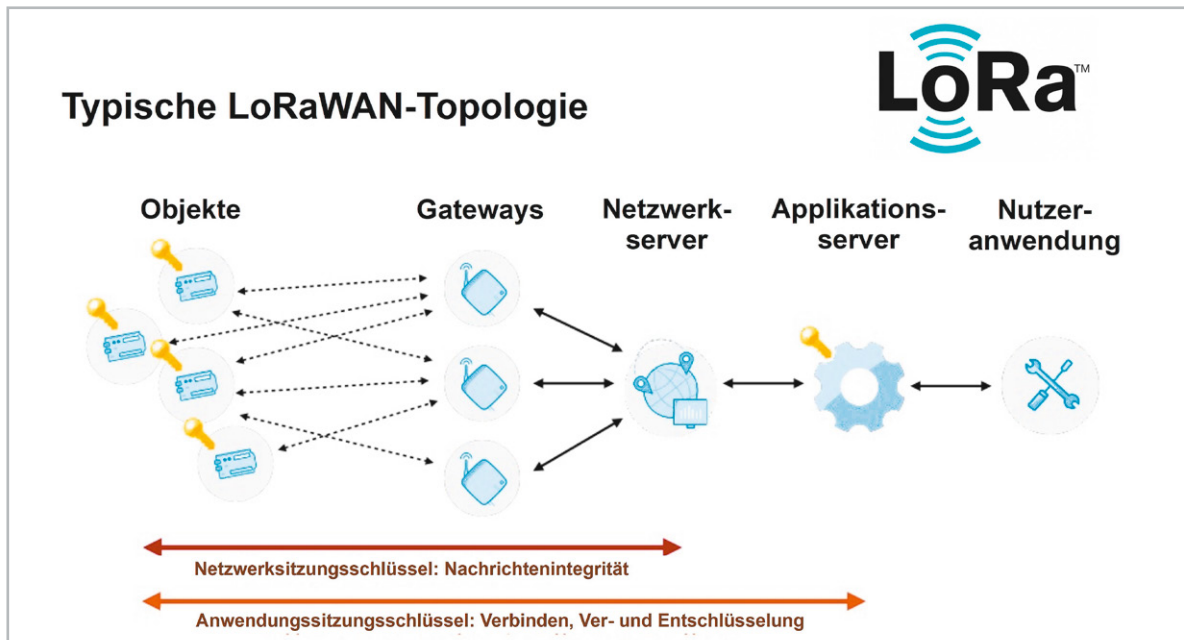


Bild 6: Die LoRaWAN-Topologie ist der des Sigfox-Netzes sehr ähnlich. Auch hier wird auf die Zuverlässigkeit der Datenübertragung höchster Wert gelegt.
Quelle: ARM

land sind ca. 2.500 Basisstationen erforderlich, über die sich demnach bis zu 2,5 Milliarden Objekte in das Sigfox-System einbinden lassen. Laut Sigfox-Homepage (Stand 09/2020) leben 1,3 Milliarden Menschen im Sigfox-Abdeckungsbereich von 5,7 Millionen km². Ist Sigfox vor Ort noch nicht verfügbar, kann ein interessierter Anwender die Sigfox Access Station Micro für rund 400 Euro erwerben und selbst installieren, um so in einem Radius von ca. 4 km Sigfox-Konnektivität in Eigenregie herzustellen.

Im März 2018 hat Sigfox mit Satellitenbetreiber Eutelsat die Inbetriebnahme eines ELO (Eutelsat Low Earth Orbit for Objects) genannten Nano-Satelliten des Herstellers Tyvak International SRL mit gerade einmal 6 l Volumen für 2019 vereinbart. Aus einer sonnensynchronen (polaren) Umlaufbahn in 500–600 km Höhe wird ELO Daten von angehenden Objekten sammeln und einmal täglich an die Bodenstation auf der norwegischen Insel Spitzbergen im Nordpolarmeer absetzen. So lassen sich Sensordaten aus allen Teilen der Erde, wo eine terrestrische Anbindung nicht möglich ist, sammeln und auswerten (Bild 5).

Derartige technische Möglichkeiten dazu bietet auch die bereits in Betrieb gegangene Starlink-Satellitenflotte des Milliardärs Elon Musk. Anfang November 2020 waren etwa 900 Satelliten im erdnahen Orbit (550 km Bahnradius auf diversen Umlaufbahnen) in Betrieb. Diese Zahl soll in etwa fünf Jahren auf 12.000 wachsen. Damit stehen latenzarme, leistungsfähige Internetverbindungen an jedem noch so entlegenen Winkel der Erde zur Verfügung.

Sigfox ist kompatibel mit Bluetooth, GPS, Mobilfunk 2G/3G/4G und WiFi und versteht sich deshalb als komplementäre Technik. Das erlaubt, andere Konnektivitätslösungen mit Sigfox zu kombinieren, was die Zahl der möglichen Geschäftsmodelle und den Teilnehmernutzen drastisch steigert.

LoRa und LoRaWAN

LoRa steht für Long Range und beschreibt eine Netztechnologie der LoRa-Alliance, in der über 500 Mit-

gliedsunternehmen organisiert sind [2]. Das Netz soll dem Zweck dienen, geringe Datenmengen mit minimaler Leistung zuverlässig über größere Distanzen in zuteilungsfreien Frequenzbereichen (in Europa z. B. 863–870 MHz) zu transportieren (Bild 6).

Ziel des Zusammenschlusses ist ein großräumiges, im Endausbau weltweites LPWAN (Low Power Wide Area Network) (Bild 7). Durch Implementation des LoRa/ LoRaWAN-Standards [3] und Zertifizierung sind die von den LoRa-Alliance-Mitgliedern hergestellten und vermarkteten Objekte/ Geräte interoperabel. Der Unterschied zwischen LoRa und LoRaWAN ist folgender:

- LoRa beherrscht nur das Verbindungsschichtprotokoll (Link Layer Protocol) und ist ideal geeignet für die P2P-Kommunikation (Peer to Peer: unter Gleichberechtigten) zwischen den Knoten. Unter einem Knoten versteht man dabei einen Sender/Empfänger, an den ein oder mehrere Sensoren angeschlossen sind und der mit meistens mehreren nahegelegenen Gateways (Basisstationen) kommuniziert. Wegen ihrer Einfachheit sind LoRa-Module etwas preisgünstiger als LoRaWAN-Module.
- LoRaWAN umfasst auch das Netzwerkschichtprotokoll (Network Layer Protocol), wodurch LoRaWAN-Module in der Lage sind, Informationen an jedes Gateway zu senden, das bereits mit einer Cloud-Plattform verbunden ist. Auf LoRaWAN-Modulen läuft das von der LoRa-Alliance entwickelte LoRaWAN-Protokoll für komplexere Anwendungen. Wegen der Unterschiedlichkeit der Protokolle sind LoRa- und LoRaWAN-Module nicht miteinander kompatibel.

Sowohl LoRa- als auch LoRaWAN-Module verwenden das gleiche Modulationsverfahren (den gleichen PHY-Layer: physikalische Schicht). Das CSS-Verfahren (CSS: Chirp Spread Spectrum) erlaubt die adaptive Anpassung der Datenrate zur Erhöhung der Reichweite oder der Kanalbandbreite (adaptive Datenrate). Es wurde von Nanotron entwickelt und patentiert [4].

Unmittelbar aus dem Shannon-Hartley-Theorem

$$\frac{C}{B} = \text{ld} \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad \text{Shannon-Hartley-Theorem}$$

ld: logarithmus dualis
(Zweierlogarithmus)

Für $\frac{S}{N} \ll 1$ gilt in guter Näherung: $\text{ld} \left(1 + \frac{S}{N} \right) \approx \frac{S}{N}$

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N}$$

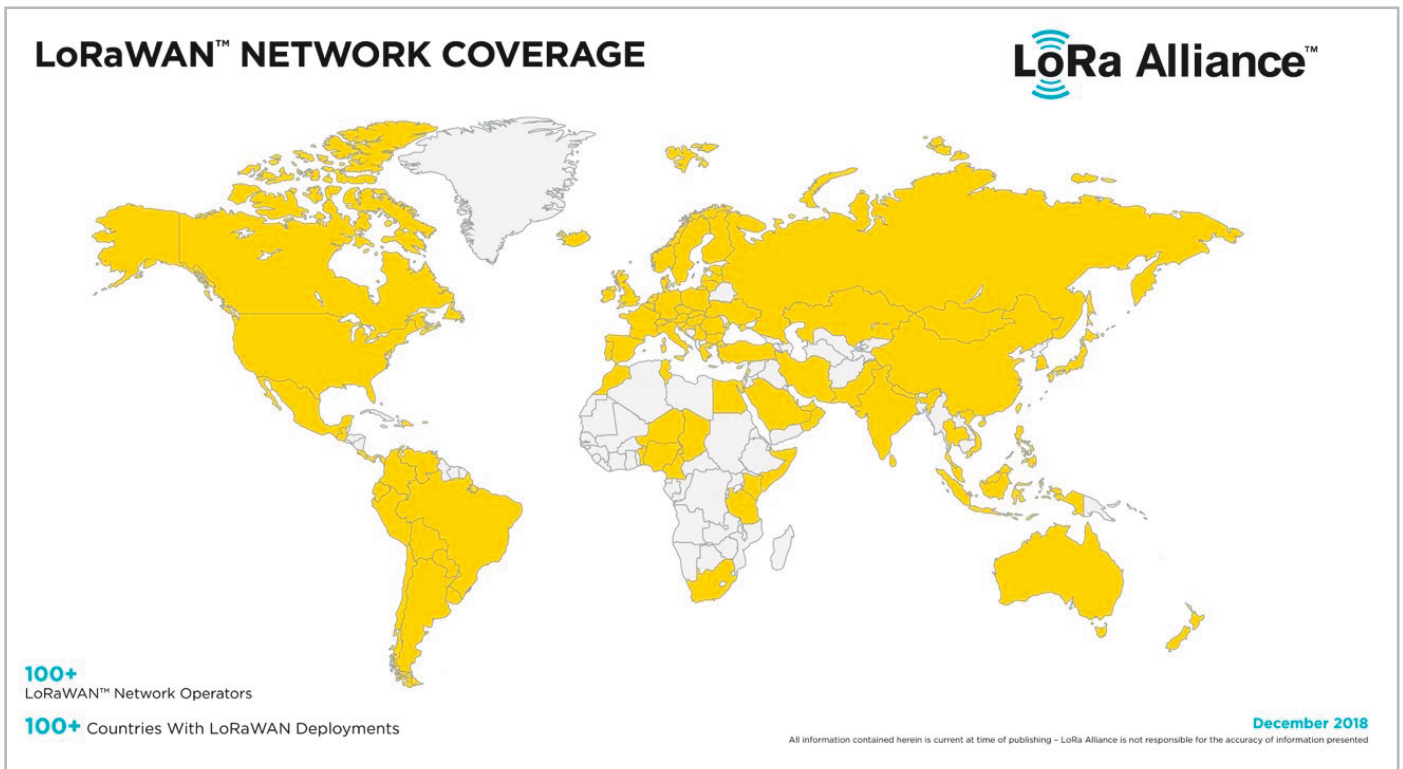


Bild 7: Abdeckung LoRaWAN Ende 2018

das in der Nachrichtentechnik die theoretische Obergrenze der Bitrate eines Übertragungskanals C (bit/s) in Abhängigkeit von Kanalbandbreite B (Hz) und Signal-zu-Rausch-Verhältnis S/N (S : Signal in Watt, N : Noise in Watt) als Voraussetzung für eine fehlerfreie Übertragung bestimmt, folgt, dass für $S/N \ll 1$ (Nutzsignal deutlich kleiner als Rauschen) das Verhältnis von C/B proportional zu S/N ist.

Wenn also das Signal bei gleichbleibendem Rauschhintergrund schwächer wird (S/N wird kleiner), muss entweder die Bitrate abnehmen (1. Alternative) oder die Kanalbandbreite zunehmen (2. Alternative). Durch die Modulation mit Chirp-Impulsen (deren Frequenz über die Impulslänge ansteigt oder abfällt) lässt sich die Bandbreite spreizen (Spread Spectrum), was der 2. Alternative entspricht.

CSS wurde ursprünglich in den 1940er-Jahren für Radaranwendungen entwickelt. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde das Verfahren zunehmend wegen seiner Robustheit gegen Beeinträchtigungen der Kanalqualität (Mehrwegeempfang, Schwund, Dopplereffekt und Störsignale) bei gleichzeitig verhältnismäßig geringen Sendeleistungsanforderungen eingesetzt.

LoRaWAN-Geräteklassen

LoRaWAN unterscheidet drei Geräteklassen, was flexible Kompromisse zwischen Energieverbrauch und Geschwindigkeit der vom Netzwerk oder den Geräten selbst ausgelösten Übertragungen ermöglicht (Bild 8).

- **Klasse A: Vom Gerät ausgelöste Kommunikation**

Geräte verharren üblicherweise im Tiefschlaf und senden von einem Timer in regelmäßigen Intervallen oder sporadisch von Ereignissen ausgelöste Meldungen. Danach öffnet sich ein kurzes Zeitfenster, in dem das Gerät empfangsbereit für eine Downlink-Nachricht ist. Anschließend versinkt es wieder in den Tiefschlaf. Deshalb ist Klasse A am besten für Sensoranwendungen mit langer Batterielebensdauer geeignet.

- **Klasse B: Zeitsynchronisierte Kommunikation**

Das Netzwerk sendet regelmäßig Baken-signale (Beacons) an die Geräte aus, um die Systemzeit zu synchronisieren. In sogenannten Ping-Abschnitten (ping slots) wachen die Geräte auf und sind für den Empfang von Nachrichten aus dem Netzwerk bereit. Klasse B eignet

sich deshalb am besten für downlinkintensive Anwendungen.

- **Klasse C: Vom Netzwerk ausgelöste Kommunikation**

Die Geräte hören ohne Unterbrechung in das Netz hinein und können dadurch jederzeit Downlink-Meldungen aus dem Netz entgegennehmen. Die Klasse C ist die optimale Wahl für downlinkintensive Anwendungen mit geringen Latenzzeiten.

Mit „The Things Network“ (TTN) gibt es eine communitybasierte Initiative zur Errichtung eines globalen LPWAN-Internet-of-Things-Netzwerks [5].

LTE-M und NB-IoT

Prinzipiell könnte die IoT-Kommunikation über bestehende LTE-Netze abgewickelt werden. Allerdings wäre dies in den allermeisten Fällen äußerst ineffizient, da LTE (Long Term Evolution) für hohe Datenraten (für ein LTE-Gerät der Kategorie 15 sind bis zu 800 Mbit/s im Downstream und bis zu 225 Mbit/s im Upstream möglich) zum Streamen und zum breitbandigen Kommunizieren konzipiert ist.

Für LPWAN-Zwecke ist LTE in seiner ursprünglichen Form wegen des damit verbundenen hohen Stromverbrauchs weniger geeignet. Die Forderung nach jahrelanger Versorgung des Sensors aus einer Batterie ist so nicht zu erfüllen. Deshalb wurden die energiesparenden Varianten LTE-M mit per aktuellem Stand zwei Releases LTE-M Cat M1 (bis zu 800 kbit/s im Downlink, 1 Mbit/s im Uplink) und LTE-M Cat M2 (bis zu 4 Mbit/s im Downlink, 7 Mbit/s im Uplink) sowie NB-IoT (Narrowband IoT mit den Releases LTE Cat NB1 (Downlink: 26 kbit/s, Uplink: 66 kbit/s) und LTE Cat NB2 (Downlink: 127 kbit/s, Uplink: 159 kbit/s)) entwickelt [6].

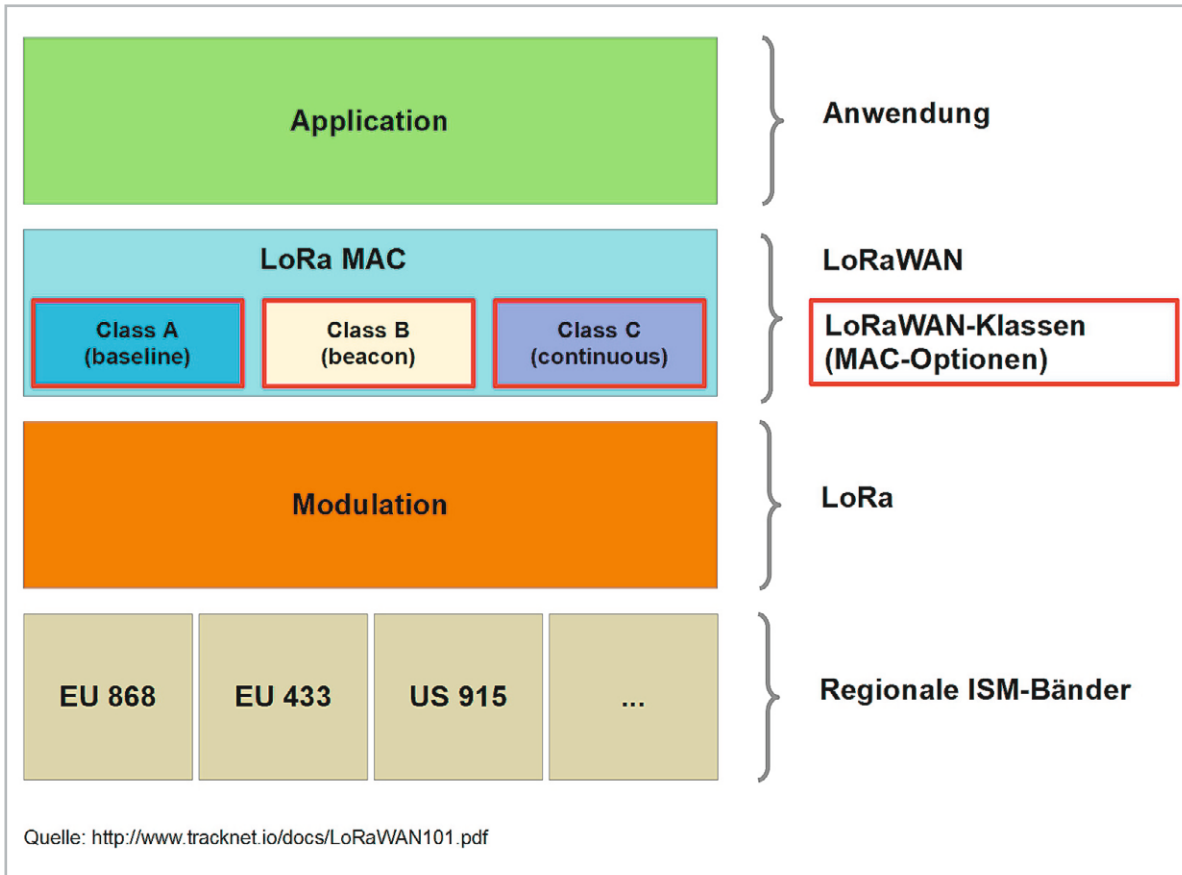


Bild 8: Innerhalb der von LoRaWAN definierten Medienzugriffsteuerung (MAC: Media Access Control) werden drei Klassen als MAC-Optionen definiert, die das LoRaWAN-Modul optimal an ihren Einsatzzweck anpassen.

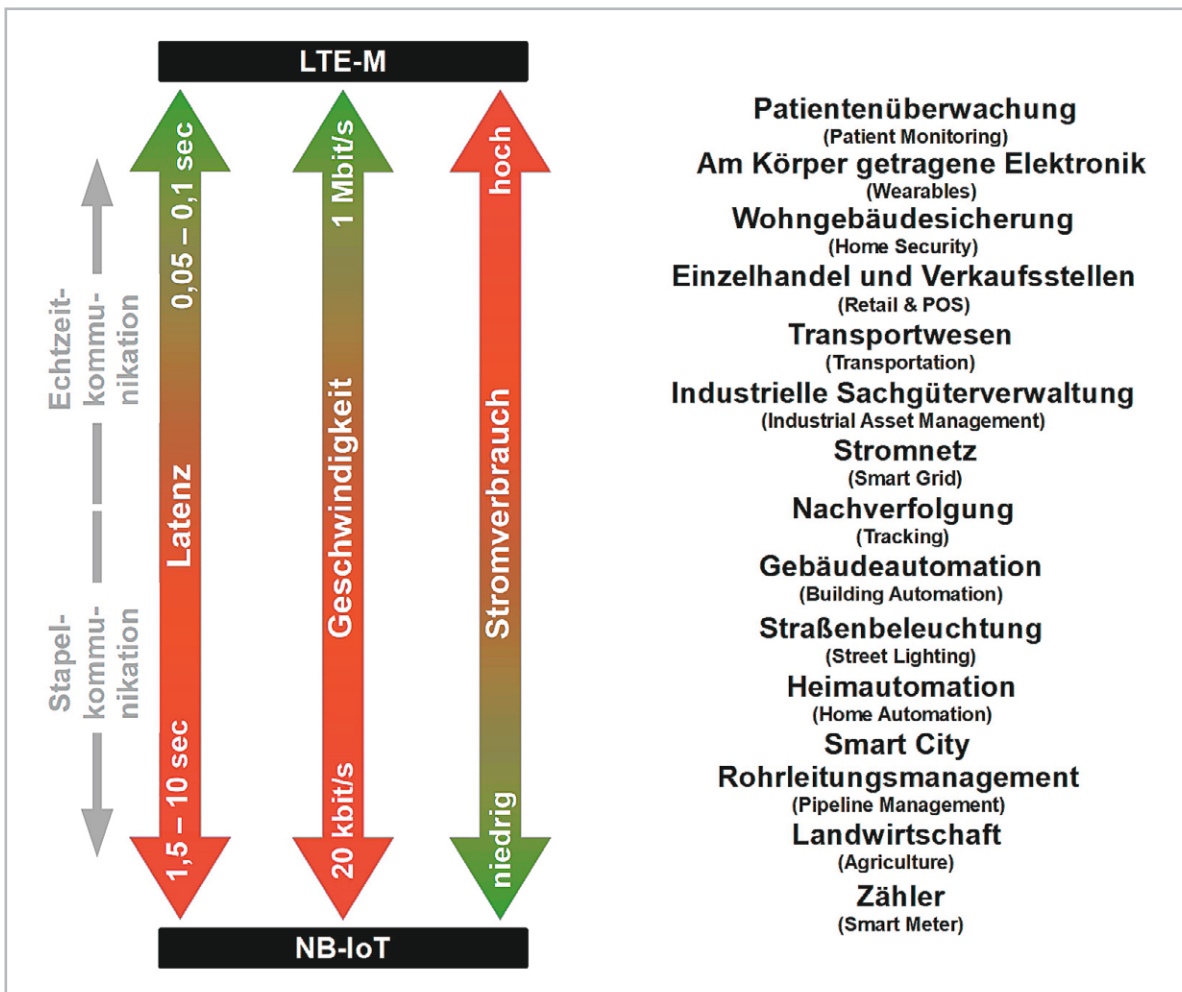


Bild 9: LTE-M versus NB-IoT

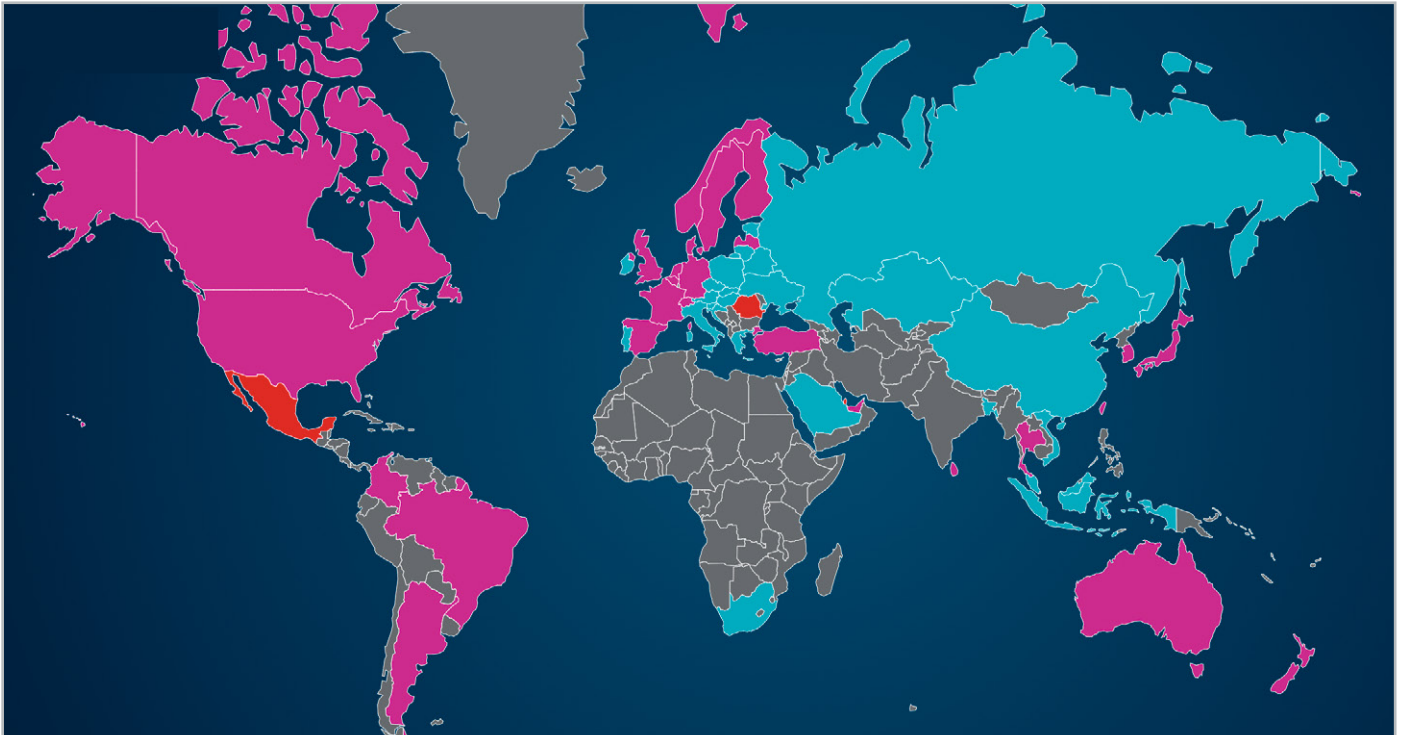


Bild 10: In diesen Teilen der Welt sind die stromsparenden LTE-Varianten LTE-M bzw. NB-IoT bereits verfügbar (lila: LTE-M und NB-IoT, rot: LTE-M, blau: IoT).

Für LTE-M und NB-IoT wird im Gegensatz zu Sigfox und LoRa/LoRaWAN eine SIM-Karte benötigt.

Bild 9 fasst die unterschiedlichen Eigenschaften von LTE-M und NB-IoT und die daraus vorzugsweisen Einsatzmöglichkeiten zusammen.

LTE-M

LTE-M setzt auf die installierte LTE-Grundstruktur auf und ist für größere Bandbreite der mobilen Verbindungen (einschließlich Sprache) op-

timiert. Die Übertragungsgeschwindigkeit in Upload- und Downloadrichtung kann bis zu 1 Mbit/s betragen, für die Unterstützung von Sprache ist VoLTE (Voice over LTE) vorgesehen und der Einsatz in bewegten Geräten (z. B. im fahrenden Auto oder Zug) ist möglich. Die Einführung von LTE-M findet gegenwärtig in Nordamerika statt und soll von weltweiten kommerziellen Implementierungen begleitet werden.

Technologievergleich NB-IoT ↔ LTE-M

	NB-IoT	LTE-M
Bandbreite	180 kHz ¹⁾	1,4 MHz ¹⁾
Spitzendatenrate	DL=127 kbit/s UL=159 kbit/s	DL=4 Mbit/s UL=7 Mbit/s
Latenz	1,5–10 ms	10–15 ms
Batterielebensdauer	> 10 Jahre ²⁾	10 Jahre ²⁾
Leistungsbedarf	optimal bei niedrigen Datenraten	optimal bei mittleren Datenraten
Modulkosten	5–10 €	10–15 €
Einsatzfrequenz	flexibel ³⁾	innerhalb LTE-Band
Reichweite im Gebäude	ausgezeichnet	gut
Sprache	nein	ja ⁴⁾
Duplex-Betriebsart	halbduplex	halbduplex ⁵⁾
max. Sendeleistung Anwendergerät	20 oder 23 dBm	20 oder 23 dBm

¹⁾ lizenziert durch 3GPP

²⁾ anwendungsabhängig

³⁾ Inband-Modus, Guardband-Modus, Stand-alone-Modus

⁴⁾ VoLTE

⁵⁾ optional

Bild 11: Die wichtigsten technischen Parameter von NB-IoT und LTE-M im Vergleich

Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Narrowband_IoT

NB-IoT

NB-IoT zeichnet sich durch effiziente Kommunikation bei massenhaft verteilten „Dingen“ mit sehr niedrigem Stromverbrauch aus. Die Kosten für NB-IoT-Module und die Nutzung des Dienstes werden die bisherigen Alternativen (3G, 4G, GPRS ...) voraussichtlich deutlich unterschreiten. Wegen des geringen Bandbreitenbedarfs von 180 kHz kann die mögliche Anzahl von „Dingen“ in einer Funknetzzelle sehr groß sein (> 100.000). NB-IoT ist voll in bestehende LTE-Netze integrierbar.

Damit erfüllen die Betreiber von funktional auf LTE-M und NB-IoT aufgerüsteten LTE-Netzen die Grundanforderungen an Low Power Wide Area Networks (LPWANs) praktisch nebenbei. Millionen Nutzern der heute bereits vorhandenen roamingfähigen LTE-Netzstrukturen steht eine für das IoT geeignete Kommunikationsinfrastruktur mit hoher Abdeckung und Betriebssicherheit zur Verfügung. Der Betrieb in lizenzierten Bändern kann als Vorteil angesehen werden, weil dadurch eine zugesicherte Qualität der Dienste leichter einzuhalten ist. Allerdings werden sich die Lizenzkosten des LTE-Spektrums in den Nutzungstarifen niederschlagen.

Eine aktuelle Übersicht über den Stand der globalen Verbreitung von LTE-M- und NB-IoT-tüchtigen LTE-Netzen gibt [Bild 10](#). Sie wird von der GSM Association (GSMA), einem ursprünglich europäischen, inzwischen aber weltweiten Repräsentanten von über 750 Mobilnetzbetreibern und 350 Unternehmen aus dem Bereich der Breitbandtechnologie, auf dem neusten Stand gehalten [7].

Die wichtigsten Technologieparameter von LTE-M und NB-IoT fasst das [Bild 11](#) zusammen.

Fazit

Für das IoT werden LPWAN-Funkverfahren benötigt, die im Interesse einer langen Lebensdauer der Batterie des IoT-Moduls optimal an den Einsatzzweck anpassbar sind. Dabei sind Kompromisse zwischen Bitrate, Bandbreite, Häufigkeit, Sendeleistung und Reichweite der Übertragung zu schließen.

Relativ früh sind Sigfox mit einem proprietären System und die LoRa-Alliance mit einer semiproprietären Alternative in lizenzfreien Frequenzbereichen aufgetreten. Die Mobilfunkbetreiber haben mit einer gewissen Verspätung den IoT-Markt als Chance für zukünftiges Wachstum erkannt und haben mit NB-IoT und LTE-M nachgezogen. Welcher dieser Wettbewerber den Markt für sich erobert oder ob eine gewisse anwendungsbedingte Aufteilung stattfinden wird (wo eventuell die zahlreichen weiteren Technologieanbieter mitmischen), lässt sich schwer vorhersagen. In wenigen Jahren werden wir mehr wissen. ELV

Die Entstehung des Internets

Mit dem Aufkommen der modernen Computertechnik entstand bald der Wunsch, zuvor alleinstehende Rechner miteinander zu vernetzen, um deren Fähigkeiten zu bündeln und einer Wissenschaftsgemeinschaft zugänglich zu machen, die nicht „vor Ort“ war. Anfänglich geschah dies auf der Grundlage der Nutzung des vorhandenen Telefonnetzes (PSTN: Public Switched Telephone Network), wobei zwischen den Kommunikationspartnern eine direkte, durch einen eindeutigen Wählvorgang hergestellte Verbindung bestand.

Nicht zuletzt unter dem Schock der Tatsache, dass am 4. Oktober 1957 die Sowjetunion ihre Weltraumüberlegenheit durch den ersten künstlichen Erdsatelliten „Sputnik“ demonstrierte, gründete das amerikanische Verteidigungsministerium noch im gleichen Jahr eine Forschungsbehörde mit dem Namen ARPA (Advanced Research Projects Agency). Ziel der ARPA war es, ohne eigene Forschungseinrichtungen, durch Kooperation mit universitären und industriellen Partnern Projekte zum Nutzen der Landesverteidigung zu fördern. Unter Präsident Lyndon B. Johnson wurde dies auch auf Grundlagenforschung ohne unmittelbaren Anwendungsbezug ausgeweitet.

Ein schwacher, möglicher Bezug ihrer Arbeit zu potenziellen militärischen Zwecken genügte dem Geldgeber. Für die von der ARPA geförderten Forscher bestanden daher nur

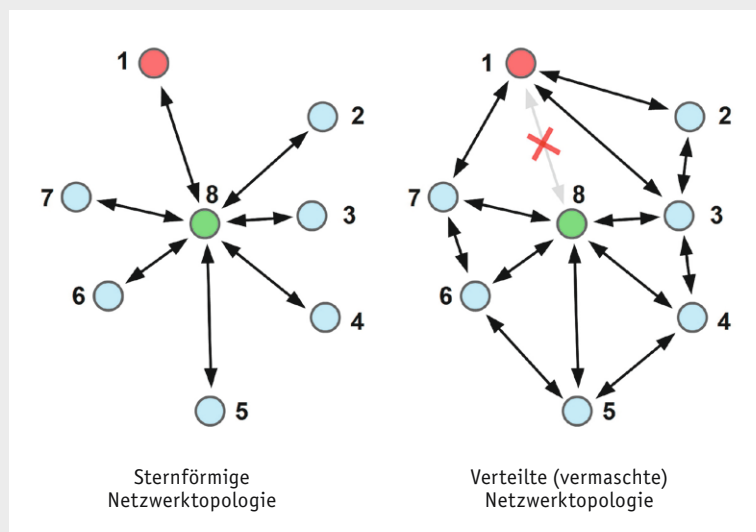


Bild 12: Sternförmige und verteilte Netzwerktopologie

geringe Einschränkungen in ihrer Arbeit. Es war ihnen sogar freigestellt, ja erwünscht, ihre Arbeitsergebnisse zu publizieren und der Wirtschaft zur Entwicklung neuer, innovativer Produkte zu überlassen. Das Militär hegte damit die Erwartung, diese so zu einem günstigeren Preis erwerben zu können.

Die Übertragung von Daten zwischen einzelnen Computern (meist desselben Herstellers) war damals nur in Form des Austauschs physischer Datenträger (Lochkarten, Magnetbänder) möglich. Das war umständlich, mühsam und zeitraubend. So gründete 1962 die ARPA das Büro für informationsverarbeitende Technologien (Information Processing Techniques Office: IPTO), das viele die heutige Computertechnik prägende Entwicklungen förderte.



Rechenzeitaufteilung, verteilte Netztopologien und Datenpaketierung

Unter den zahlreichen, wegweisenden Ergebnissen waren interaktive grafische Computerterminals, Time-Sharing-Betriebssysteme, grundlegende Forschungen zur künstlichen Intelligenz und – mit der damals größten Bedeutung – ein nationales Computernetzwerk für eine heterogene Computerlandschaft. Time-Sharing-fähige, interaktive Betriebssysteme ermöglichten die quasi zeitgleiche Nutzung eines Computers durch mehrere Benutzer mit völlig unterschiedlichen Rechenaufträgen. Typischerweise wurde die Kommunikation eines Anwenders über ein sternförmig am Zentralrechner angeschlossenes Terminal abgewickelt. Die Sterntopologie des Verbindungsnetzes zwischen Zentralrechner (Host) und Terminal des Anwenders (Client) hatte aber schwerwiegende Nachteile bezüglich Zuverlässigkeit. Ein Ausfall des Zentralrechners legte das gesamte Netzwerk lahm und weil es ja keine alternativen Verbindungen zu anderen Computern gab, alle laufenden Anwendungen. Folglich war die Suche nach einer Netzwerktopologie zur Kopplung räumlich weit entfernter Computer und der dezentralen Nutzung der von ihnen zur Verfügung gestellten Dienste von höchster Priorität.

Paul Baran von der RAND-Corporation schlug 1964 vor, anstelle des Sterns eine verteilte Netzwerktopologie (distributed network) zu verwenden. Diese war für das Militär hoch attraktiv, weil sie die Funktionsfähigkeit seiner Kommandostruktur auch bei einer partiellen Zerstörung von Verbindungsleitungen und Knoten gewährleistete. Das **Bild 12** „Sternförmige Netzwerktopologie“ zeigt links, dass eine Verbindung von Knoten 1 (Computer oder Terminal) zu den Knoten 2 bis 8 nur bei intakter Leitung $1 \leftrightarrow 8$ möglich ist. Bei ihrem Ausfall ist Knoten 1 völlig isoliert. Anders rechts „Verteilte (vermaschte) Netzwerktopologie“: Hier existiert neben der direkten Verbindung zwischen Knoten 1 und 8 eine Viel-

zahl weiterer. Knoten 1 und 8 können bei nicht verfügbarer Leitung $1 \leftrightarrow 8$ beispielsweise über die Verbindungsabschnitte $1 \leftrightarrow 3 \leftrightarrow 8$, $1 \leftrightarrow 2 \leftrightarrow 3 \leftrightarrow 8$, $1 \leftrightarrow 7 \leftrightarrow 8$, $1 \leftrightarrow 7 \leftrightarrow 6 \leftrightarrow 8$, usw., also quasi über Umwege, miteinander in Kontakt treten.

Zudem wollte Baran die Nachricht nicht vollständig und über eine feste Folge von Verbindungsabschnitten transportieren, sondern sie in Pakete zerlegen und diese über den gerade günstigsten Übertragungspfad zum Ziel leiten. Da jedes Paket die Informationen über sein Ziel in sich trägt, kann an jedem Knoten über die Weiterleitung entschieden werden und ein zentraler Steuerrechner ist nicht erforderlich. Beim Verlust eines Paketes muss dieses nur erneut verschickt werden. Wenn alle Pakete am Empfangsort angekommen sind, kann hier die ursprüngliche Nutzdatenfracht wiederhergestellt werden.

Die erste kommerzielle Nutzung dieses Prinzips der Paketvermittlung (packet switching) erfolgte 1965 durch die Société Internationale des Télécommunication Aeronautiques (SITA) für ihre 175 Mitgliedsfluggesellschaften mit durchschlagendem Erfolg. Daraufhin begann die IPTO mit der Vernetzung der landesweit verstreuten ARPA-Rechenzentren über eine verteilte Netztopologie nach dem Prinzip der Paketvermittlung (ARPANET).

Anwendungen wie Telnet und FTP entstehen

Als erste Anwendungsprogramme für das neue Netz wurden „Telnet“ (Telecommunication network: Fernsteuerprogramm für fremde Rechner) und „FTP“ (File Transfer Protocol: Programm für Dateiaustausch mit fremden Rechnern) entwickelt. Der raketenhafte, unerwartete Nutzungsanstieg des ARPANETs erfolgte allerdings erst mit der Verfügbarkeit von „E-Mail“.

Damals konnte niemand ahnen, wie schnell und umfassend sich die grundlegende Idee einer dezentralisierten, vermaschten Netzstruktur für paketvermittelte Daten in einer heterogenen Computerwelt in Gestalt des Internets weltweit verbreiten würde. 1990 begann mit der Abschaltung des ARPANETs die kommerzielle Phase des Internets. Im offiziellen Abschlussbericht des ARPA-Experiments hieß es: „Dieses ARPA-Programm hat nichts Geringeres als eine Revolution in der Computertechnologie hervorgebracht und war eines der erfolgreichsten Projekte, das die ARPA je durchgeführt hat. Das volle Ausmaß des technischen Wandels, der von diesem Projekt ausgeht, wird sich vielleicht erst in vielen Jahren ermessen lassen.“

Es wird geschätzt, dass im Jahr 1993 das Internet lediglich 1 % der global ausgetauschten Bytes transportierte, während es im Jahr 2000 bereits mehr als 51 % und im Jahr 2007 97 % waren (Quelle: Wikipedia). Heute ist das Internetprotokoll die dominierende Grundlage der Datenkommunikation in allen Bereichen der Gesellschaft und Wirtschaft.



Weitere Infos:

- [1] <https://www.sigfox.com/en>
- [2] <https://lora-alliance.org>
- [3] <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11>
- [4] https://nanotron.com/EN/CO_techn-css.php/
- [5] <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [6] <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-LTE-M-device-categories-Cat-0-vs-Cat-M1-vs-Cat-M2.html>
- [7] <https://www.gsma.com>

Alle Links finden Sie auch online unter: de.elv.com/elvjournals-links