

NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox: ein aktueller Vergleich



LIFE IS FOR SHARING.

Deutsche Telekom IoT
connect. digitize. get ahead.

Inhalt

	NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox: ein aktueller Vergleich.....	3
1.	Übertragungsqualität	5
2.	Abdeckung	11
3.	Energieeffizienz	13
4.	Sicherheit	15
5.	Kosten	17
6.	Zukunftsfähigkeit.....	19
	Kurzum: Welche LPWA-Technologie ist für mein IoT-Projekt am besten geeignet?	21
	Quellen/Kontakt/Impressum.....	22

NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox: ein aktueller Vergleich

Der Begriff „Low Power Wide Area“ (LPWA) beschreibt eine Kategorie von Funknetzen – mit einem selbsterklärenden Namen. Diese Funknetze wurden speziell für das Internet der Dinge (IoT) entwickelt und verbinden extrem energieeffiziente Geräte über weite Distanzen. LPWA-Funkmodule können über mehrere Jahre mit handelsüblichen Standardbatterien betrieben werden und sind gleichzeitig leistungsstark genug, um auch aus Kellergeschossen, Tiefgaragen oder großflächigen Produktionshallen Daten zu senden und zu empfangen.

Beispielhafte LPWA-Anwendungsfälle:

- **Intelligente Zähler – Smart Metering**
(vernetzte Verbrauchszähler, Sensoren in Kellergeschossen)
- **Intelligentes Parken – Smart Parking**
(vernetzte Parkplätze, Sensoren im Boden und in Tiefgaragen)
- **Intelligentes Abfallmanagement – Smart Waste Management**
(vernetzte kommunale Abfallbehälter)
- **Objektortung – Asset Tracking**
(landesweite Verfolgung und Ortung von Fracht wie Gitterboxen, Paletten und Containern)
- **Vernetzte Gebäude – Connected Buildings**
(Sensoren in Brücken und Tunneln zur Temperatur-, Feuchtigkeits- und Korrosionsmessung und Ermittlung von Schwachstellen, lange bevor sichtbare Schäden auftreten)
- **Zustandsüberwachung – Condition Monitoring**
(Sensoren in Baumaschinen und -fahrzeugen zur Erkennung von Fehlfunktionen und Diebstahl)

LPWA-Technologien eignen sich für IoT-Anwendungen, die energieeffiziente und preiswerte Hardware für die Massenanwendung über lange Distanzen benötigen, potenziell auch innerhalb von Gebäuden (siehe Kasten). Andere, herkömmliche Funktechnologien können diese Anwendungsfelder nicht oder nur unzureichend bedienen:

- **NFC, QR, RFID** (geringe Reichweite, geringer/kein Energieverbrauch)
- **WiFi, Bluetooth, ZigBee** (geringe Reichweite, hoher Energieverbrauch)
- **2G bis 5G** (hoher Energieverbrauch, begrenzte Innenabdeckung in Gebäuden)

In den letzten Jahren haben sich verschiedene LPWA-Netztechnologien am Markt etabliert. Sie unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Verbreitung und Verfügbarkeit, Standardisierung und Sicherheit, Effizienz und Effektivität. Das macht es für Unternehmen schwierig, die richtige Technologie für ihr IoT-Projekt auszuwählen. Dies mussten wir immer wieder in Gesprächen mit unseren Kunden feststellen. Aus diesem Grund möchten wir in diesem Dokument die drei gängigsten LPWA-Optionen etwas ausführlicher vergleichen. Diese sind:

- **NarrowBand Internet of Things**
(NarrowBand-IoT, NB-IoT, LTE Cat-NB)
- **Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)**
- **Sigfox**

LoRaWAN und Sigfox sind bereits seit über fünf Jahren kommerziell verfügbar, wohingegen die ersten NB-IoT-Netze erst 2017 eingeführt wurden. Viele der bisher veröffentlichten Technologievergleiche basieren daher auf theoretischen Daten wie Spezifikationen oder Labormessungen. Aus diesem Grund ist es an der Zeit, einen aktuellen Vergleich aus Nutzerperspektive anzustellen, mit empirischen Werten aus der Praxis der letzten Jahre.

Drahtloses IoT auf dem Prüfstand

Viele der Unterschiede zwischen NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox gehen auf ihre jeweilige Entwicklungsgeschichte zurück. LoRaWAN und Sigfox sind proprietäre, von Einzelunternehmen entwickelte Technologien, wohingegen NB-IoT ein offener, globaler, LTE-basierter 5G-Industriestandard ist. Daher wird er von allen großen Netzbetreibern, Telekommunikationsnetzausrüstern sowie Geräte- und Chipherstellern unterstützt. NB-IoT arbeitet mit lizenzierten LTE-Frequenzen und wird im Gegensatz zu LoRaWAN und Sigfox grundsätzlich von Mobilfunkanbietern betrieben. Bei LoRaWAN muss sich der Benutzer zudem für einen von drei Betriebsmodi (siehe Kasten) entscheiden.



Drei LoRaWAN-Betriebsmodi

Öffentliches Netz eines Anbieters

(Nutzungsvertrag mit Betreiber erforderlich)

- ⊕ Keine Investitionen in eigene Netzinfrastruktur erforderlich
- ⊕ Keine laufenden Kosten für Betrieb und Wartung
- ⊖ Laufende Gebühren für die Netznutzung
- ⊖ Keine oder unvollständige landesweite Netzabdeckung
- ⊖ Zu viele Nutzer > Qualitätseinbußen

Lokales privates Netzwerk

(bestehend aus eigenen Gateways und Servern, Zugang nur mit eigenen Geräten)

- ⊕ Kann überall bedarfsgerecht installiert werden
- ⊕ Eigenständige Kontrolle von Netzkapazität und -qualität
- ⊕ Alle Daten bleiben im eigenen Netzwerk
- ⊖ Beschaffungs- und Installationskosten für LoRaWAN-Gateways und -Server (oder Kapazitätserhöhung für steigende Anzahl an Endgeräten)
- ⊖ Laufende Kosten für Betrieb, Wartung und Support
- ⊖ Knowhow im Netzwerkmanagement erforderlich

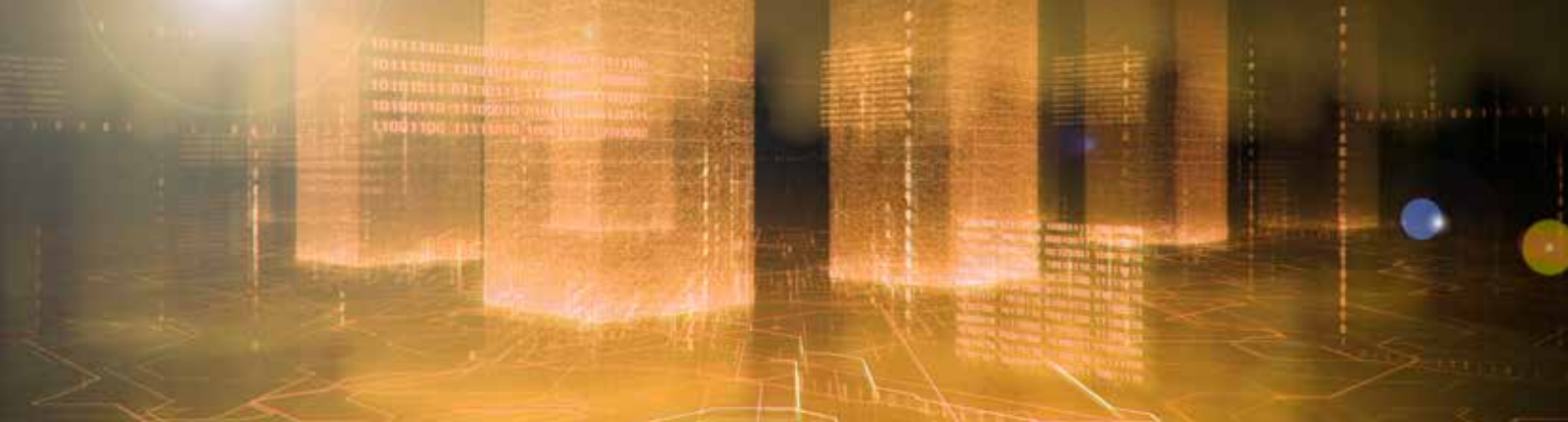
Offenes Community-Netzwerk

(freier Zugang zum Community-Netzwerk, dafür Zugang Dritter zum eigenen Netzwerk)

- ⊕ Geringe Investitionen in eigene Gateways
- ⊕ Entwickler-Community bietet Support
- ⊖ Laufende Kosten für Betrieb und Wartung
- ⊖ Begrenztes Datenvolumen (mit Fair Use Policy wie bei The Things Network)
- ⊖ Zu viele Nutzer > Qualitätseinbußen
- ⊖ Keine landesweite Netzabdeckung
- ⊖ Sicherheits- und Datenschutzrisiken

1. Übertragungs- qualität





Bei der Bewertung der Übertragungsqualität der drei zentralen LPWA-Technologien sollten die Faktoren Zuverlässigkeit, Durchsatz, Datenrate und Reichweite berücksichtigt werden. Die hierbei zu beobachtenden Abweichungen sind auf diverse technische Unterschiede zurückzuführen wie etwa die Signalmodulation, die Bandbreite pro Kanal, die Anzahl an Kanälen und nicht zuletzt das genutzte Spektrum. Zunächst ist es wichtig zu wissen, dass die Funkübertragung im ISM-Band bei LoRaWAN und Sigfox gesetzlich definierten Beschränkungen unterliegt. Der sogenannte Duty Cycle definiert die maximale Zeitdauer in Prozent, für die ein Endgerät einen Kanal belegen darf. Dies bedeutet eine erhebliche Einschränkung für Netze, die in unlizenziierten Frequenzbändern betrieben werden. Der Duty Cycle beträgt 1 % beim Uplink und 10 % beim Downlink und führt beispielsweise dazu, dass die Übertragungszeit pro Teilnehmer und Stunde auf 360 ms für 1.000 LoRaWAN-/Sigfox-Endgeräte pro Gateway begrenzt ist.

Bei **NB-IoT** gibt es hier weder für Uploads noch für Downloads Beschränkungen. Zwölf Kanäle, jeweils mit einer Bandbreite von 15 KHz oder von 180 kHz insgesamt, stehen pro Ressourcenblock vollständig zur Verfügung (in den LTE-Frequenzen können theoretisch auch mehrere Blöcke genutzt werden). **LoRaWAN EU** muss mit acht 125 KHz-Kanälen und einem Duty Cycle von 10 % für Downloads über alle Kanäle sowie mit drei 125 KHz-Kanälen und einem Duty Cycle von 1 % für Uploads auskommen. **Sigfox** nutzt 192 kHz Bandbreite, von denen den Benutzern aufgrund der ultraschmalbandigen Modulation nur 100 Hertz zur Verfügung stehen.

Zuverlässigkeit:

Wie wahrscheinlich ist es, dass der Verbindungsaufbau und die Datenübertragung erfolgreich sind?

NB-IoT nutzt das lizenzierte LTE-Frequenzband eines Mobilfunkbetreibers und vermeidet so Interferenzen anderer Geräte. LoRaWAN und Sigfox müssen über freie, allgemein zugängliche ISM-Frequenzbänder senden, wodurch die Gefahr potenzieller Interferenzen durch andere Benutzer steigt. Deshalb sinkt die Übertragungsqualität, sobald zu viel Datenverkehr über den LoRaWAN-Gateway oder die Sigfox-Basisstation läuft, und die Gefahr des Verlusts von Datenpaketen erhöht sich. Bei NB-IoT hingegen kann der Anbieter eine im Vorfeld festgelegte Leistungsqualität (Service Levels) im Funknetz garantieren.

Bei NB-IoT können Übertragungen bei Bedarf auch sehr häufig vom Netzwerkprotokoll wiederholt werden – ein Vorteil bei ungünstigen Empfangsbedingungen, beispielsweise im Kellergeschoss eines Gebäudes. Bei LoRaWAN und Sigfox ist die Anzahl der Übertragungswiederholungen gesetzlich limitiert, wodurch die Gebäudedurchdringung begrenzt wird (siehe Tabelle). Zusätzlich steht jedem NB-IoT-Netzbetreiber ein eigenes LTE-Spektrum langfristig zur Verfügung, wohingegen die Zukunft des unlizenziierten ISM-Bandes durch neue regionale regulatorische Vorgaben beeinträchtigt werden könnte. In einem Worst-Case-Szenario würden neue gesetzliche Beschränkungen der Übertragungsfrequenz oder Leistung im offenen Spektrum einen Austausch bereits installierter IoT-Geräte erfordern. Darüber hinaus ist die Signalstärke bei LoRaWAN und Sigfox gemäß EU-Recht auf 14 dBm begrenzt, wohingegen NB-IoT eine Übertragungsleistung von 23 dBm bietet – ein weiterer Vorteil mit Blick auf die Gebäudedurchdringung.

Daten & Fakten

Technische Daten	NB-IoT	LoRaWAN	Sigfox (EU)
Technologie	offener Standard	proprietär	proprietär
Lizenziertes Spektrum	ja	nein	nein
Maximale Datenrate (brutto)	27 kbit/s	5,47 kbit/s (SF7)	0,1 kbit/s
Worst-Case-Datenrate (~144dB Link Budget)	5–6 kbit/s	0,297 kbit/s	0,1 kbit/s
Max. Nutzdatenlänge (Daten pro Nachricht)	> 1.000 B	51 B (EU) / 11 B (US)	12 B
Downlink-Kapazität	unbegrenzt	sehr niedrig	sehr niedrig
Link Budget / Max. Path Loss (Uplink)	164 dB	141–146 dB	163 dB
Link Budget / Max. Path Loss (Downlink)	164 dB	151–156 dB	158 dB

Quelle: Naumann H. & Oellers W. (2020)

Aufgrund der guten Kanalqualität im lizenzierten Spektrum und eines optimierten Kollisionsmechanismus weist NB-IoT zudem sehr geringe Paketverluste (<5 %) selbst über lange Distanzen auf. LoRaWAN und Sigfox werden durch Interferenzen und Kollisionen im Datenverkehr in ihrem unlizenzierten Spektrum beeinflusst, was höhere Paketverluste mit sich bringt. Dies führt wiederum zu mehrfachen Übertragungswiederholungen und einem höheren Energieverbrauch. Ein Paketverlust von 80 % bedeutet beispielsweise, dass nur eine von fünf Übertragungen durchkommt.

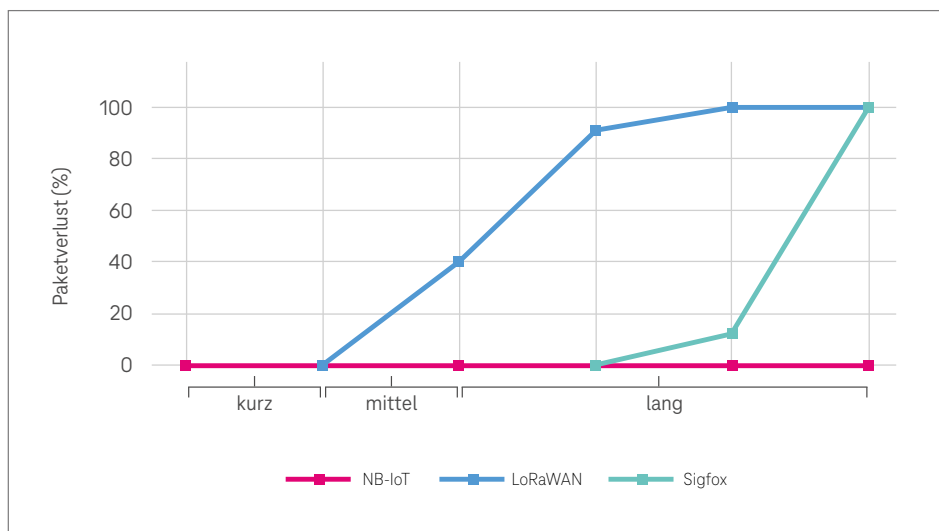
Bei LoRaWAN steigt der Datenpaketverlust sogar bereits bei kurzen Distanzen signifikant an (siehe Grafik). Aus einer Studie der Universität Singapur geht hervor, dass ein Paketverlust von 40 % hingenommen werden muss, wenn LoRaWAN in städtischer Umgebung über eine Distanz von nur drei Kilometern eingesetzt wird. Es bleibt darauf hinzuweisen, dass in Singapur eine Übertragungsleistung von 20 dBm, also 6 dBm mehr als in Europa, zulässig ist. In Europa würde diese Paketverlustrate somit bereits über sehr viel kürzere Distanzen erreicht werden.

Auf größeren Strecken gehen somit schon 90 % der Datenpakete verloren. Die Übertragungswiederholungen, die zur Kompensation des erhöhten Paketverlusts über lange Distanzen erforderlich sind, führen nicht nur zu einem höheren Energieverbrauch, sondern können wiederum auch mehr Kollisionen mit dem Datenverkehr anderer Benutzer bewirken und damit einen Teufelskreis auslösen. Bei Sigfox steigt der Paketverlust erst über längere Distanzen rapide an (vgl. Studien Offenburg und Singapur). NB-IoT hingegen ist über alle Distanzen gleichbleibend zuverlässig.

Fazit

Dank seiner reservierten Kanäle bietet NB-IoT die effektivste Datenübertragung. LoRaWAN und Sigfox verfügen über geringere Kapazitäten und damit über eine weniger zuverlässige Übertragung.

Paketverlust pro Übertragungsdistanz (kurz/mittel/lang)



Quelle: „Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed“, Sebastian E. J. Sikora A. (2019)



Durchsatz:

Wie viele Daten können in einem gegebenen Zeitraum übermittelt werden?

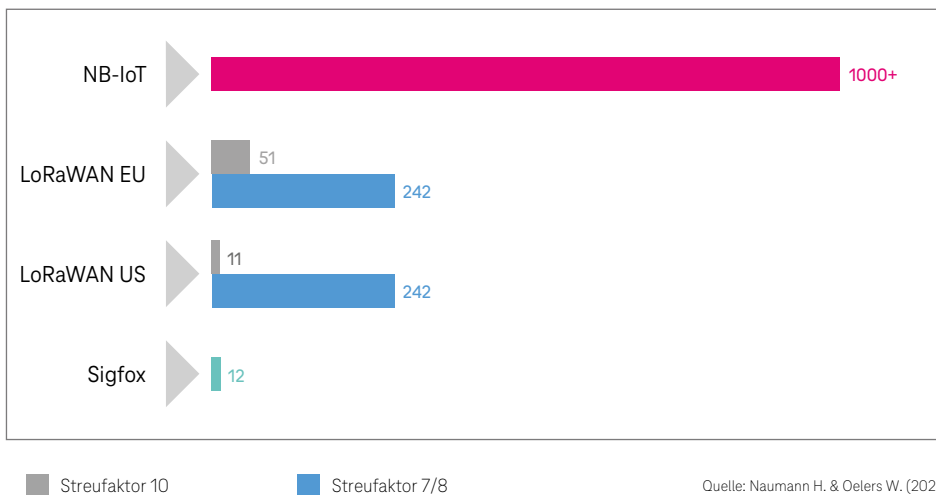
Für NB-IoT gibt es keine gesetzlichen oder vertraglichen Beschränkungen des Datendurchsatzes. Einschränkungen des **Datenvolumens, das pro Tag (oder Jahr) übermittelt werden kann**, ergeben sich lediglich aus der Batterielebensdauer des Funkmoduls, ungünstigen Übertragungsbedingungen, dem vertraglich vereinbarten maximalen Datenvolumen sowie betreiberseitigen Anwendungsentwicklungsrichtlinien, welche notwendig sind, um die Qualität des Mobilfunknetzes zu gewährleisten (z. B. IoT Solution Guidelines der Deutschen Telekom).

Auch hinsichtlich des **Datenvolumens pro Nachricht** und der **Anzahl an Nachrichten pro Tag** unterscheiden sich die drei Technologien erheblich. Insbesondere kommt bei LPWAN-Technologien im lizenzfreien Band der gesetzlich vorgegebene Duty Cycle zum Tragen. Der Durchsatz ist begrenzt, um Netzüberlastungen vorzubeugen.

Upload: Bei LoRaWAN und insbesondere Sigfox gibt der Duty Cycle strenge Grenzen vor. Bei einem Sigfox-Datenpaket sind die **Nutzdaten** auf 12 Byte pro Zyklus begrenzt. Dies bedeutet, dass ein Sigfox-Modul eine längere Nachricht in mehrere kleine Datenpakete aufteilen muss. Daraus resultieren nachteilige Auswirkungen auf Energieverbrauch und Übertragungsdauer. Außerdem können nur vier Nachrichten mit Bestätigung pro Tag versendet werden (oder sechs Nur-Uplink-Nachrichten pro Stunde, d. h. 144 pro Tag).

Diese Einschränkung ist für Anwendungsfälle wie Tracking zu berücksichtigen, insbesondere für Geräte, die mit WLAN-Sniffing arbeiten. Grundsätzlich ist der Upload (vom Gerät auf den Server) längerer Nachrichten mit NB-IoT- und LoRaWAN-Modulen möglich. Doch bei LoRaWAN kann der Duty Cycle unter weniger günstigen

Max. Nutzlast-Uplink (Byte)



Bedingungen (lange Distanzen, Streufaktor 10) schnell vom theoretisch bestmöglichen Fall (d. h. kurze Distanzen, Streufaktor 7/8, siehe Kasten) von 242 Bytes auf 51 Bytes (EU) oder sogar 11 Bytes (USA) sinken. Da NB-IoT keinen technischen oder gesetzlichen Beschränkungen unterliegt, ist ein Payload von über 1 Kilobyte möglich (siehe Grafik).

Download: NB-IoT ermöglicht auch den Downlink-Empfang größerer Datenpakete. Die Praxis hat gezeigt, dass die üblichen Firmware-Updates (die über kleinere Parameter-Updates hinausgehen) für das Funkmodul oder die Anwendung auf dem Endgerät kein Problem darstellen. Für sehr große Firmware-Updates mit mehreren Megabytes können gängige Multimode-Funkmodule zudem kurz auf 2G oder LTE-M umschalten, um eine schnellere Datenübertragung zu gewährleisten und die Batterie zu schonen. Realistisch gesehen erlaubt Sigfox keine Firmware-Updates. Wenn

überhaupt, sind nur kurze Steuerbefehle möglich. Allgemein gilt, dass der Nachrichtenempfang nur nach der Übertragung möglich und auf 8 Bytes jeweils viermal täglich begrenzt ist. Bei LoRaWAN bedingen Firmware-Updates, sofern sie angesichts der niedrigen Datenraten überhaupt möglich sind, einen hohen Energieverbrauch. Bei beiden proprietären Technologien ist die Downlink-Kapazität im Vergleich zu NB-IoT somit grundsätzlich sehr begrenzt.

Fazit

Im Hinblick auf Uploads, Downloads, Datenvolumen pro Tag oder pro Nachricht oder Anzahl an Nachrichten pro Tag führt NB-IoT das Feld in allen Aspekten an.

Streu faktor

Bei LoRaWAN kann die Signalübertragung über einen breiten Frequenzbereich gestreut werden. Die Bandbreite kann optional entweder für eine hohe Datenrate oder eine solide Übertragung genutzt werden. Der Streufaktor (Spreading Factor, SF) und die Bandbreite bestimmen die Datenrate und die Empfangswahrscheinlichkeit. LoRaWAN-Netze arbeiten zwischen SF7 (bei optimalen Bedingungen) und SF12 (bei schlechter Netzabdeckung).

Datenrate:

Wie schnell können Daten übertragen werden?

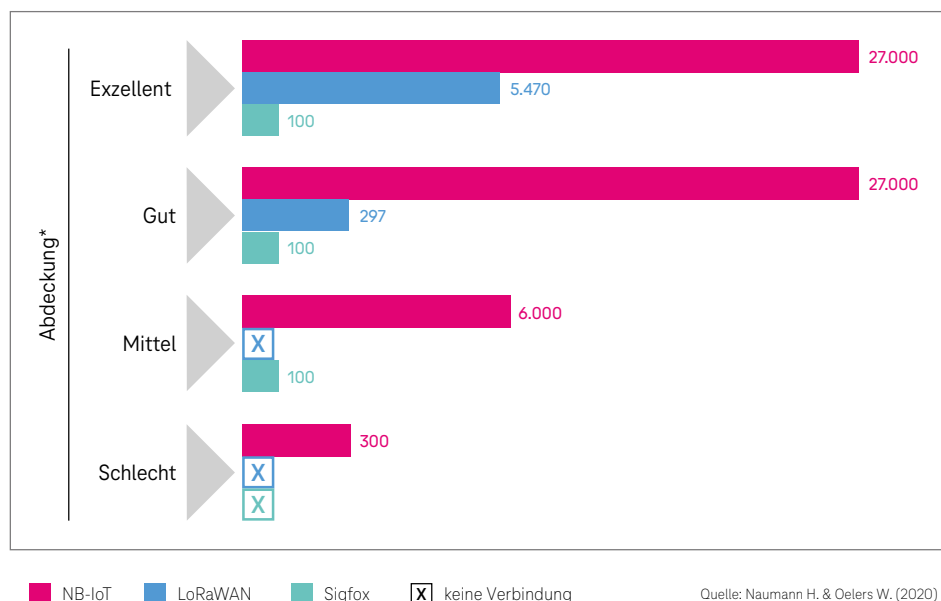
In einigen Szenarien ist eine schnelle Datenübertragung wichtig. Wie die Grafik zeigt, schneidet NB-IoT sowohl bei guten als auch schlechten Übertragungsbedingungen am besten ab. Bei LoRaWAN (EU) senken Interferenzen im ISM-Band die unter idealen Bedingungen theoretisch mögliche Datenrate von 5470 bit/s (mit SF7) auf unter 300 bit/s (mit SF12). Vor allem unter schwierigen Bedingungen gewährleistet nur NB-IoT eine schnelle und zuverlässige Datenübertragung. Bei Sigfox bricht die Verbindung unter ungünstigen Bedingungen ab, bei LoRaWAN sogar bereits bei mittelmäßigen Bedingungen. Dieser Vorteil könnte zukünftig

noch stärker zum Tragen kommen, da NB-IoT grundsätzlich auch das **Mehrtonverfahren** (Multitone) unterstützt, wodurch sich die aktuelle Datenrate wesentlich erhöhen würde.

Fazit

Bei der Datenrate liegt NB-IoT gegenüber Sigfox und LoRaWAN klar im Vorteil – bei guten und vor allem bei schlechten Bedingungen.

Typische Datenraten (Bits pro Sekunde)



Exzellent = Ideale Bedingungen (~130 dB); Gut = Außenbereich (~140 dB); Mittel = Innenraum (~150 dB); Schlecht = Innenraum abgeschirmt (~160 dB)

Reichweite:

Wie weit können Nachrichten unter gegebenen Bedingungen übertragen werden?

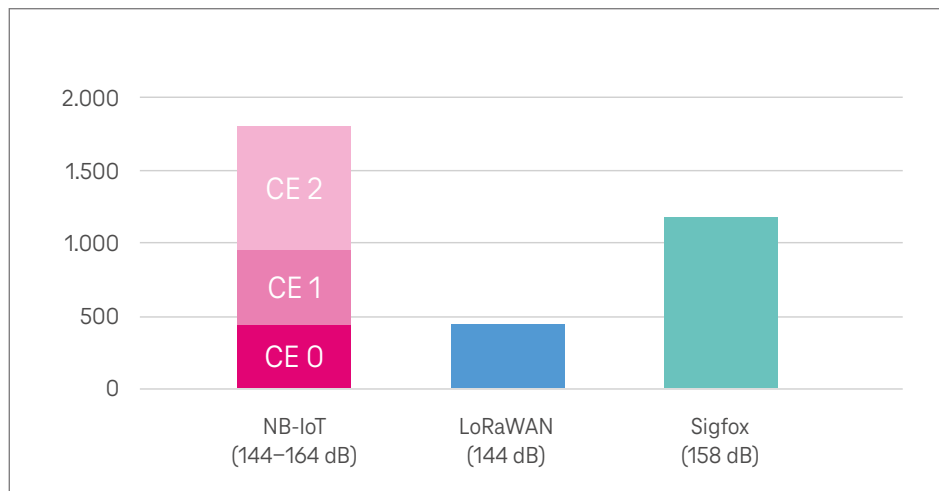
Eine Studie der **Universität Aalborg** hat gezeigt, dass im von LoRaWAN und Sigfox genutzten ISM-Band Rauschen und Interferenzen zu erwarten sind. Dies kann sich negativ sowohl auf die Sensitivität des Empfängers (das Link Budget bzw. die Leistungsübertragungsbilanz mit realem Rauschen) und die Reichweite des Transmitters auswirken. Im Gegensatz hierzu ermöglicht die inhärente Fähigkeit des NB-IoT-Netzes, Daten so oft wie erforderlich zu senden, was in einem entscheidenden Vorteil mit Blick auf die Reichweite resultiert. Das **Okumura-Hata-Simulationsmodell** zeigt zudem, dass in einem typischen urbanen Anwendungsszenario ein NB-IoT- oder Sigfox-Gerät eine wesentlich höhere Reichweite hat als ein LoRaWAN-Gerät, bei dem Interferenzen anderer Benutzer wesentlichen Einfluss nehmen (siehe Grafik). Generell gilt, dass eine Erhöhung des Link Budgets um 10 dB die Übertragungsreichweite verdoppelt und damit die Anzahl der benötigten Basisstationen oder Gateways um den Faktor vier reduziert.

Ein **Feldversuch des unabhängigen Beratungsunternehmens P3 Communications** (heute: Umlaut) zeigte bereits 2018, dass NB-IoT-Module an verschiedenen Standorten in Innenräumen in 95 % der Fälle eine Verbindung zur Basisstation aufbauen konnten. Die Datenübertragung funktionierte in all diesen Fällen. Keine andere Drahtlostechnologie bietet eine derart hohe Zuverlässigkeit, insbesondere in Untergeschossen. LoRaWAN fällt in diesem Zusammenhang besonders negativ auf angesichts der starken Interferenzen durch andere Benutzer, beispielsweise in Einkaufszentren oder Bürogebäuden.

Fazit

Im unlizenziierten ISM-Band beeinträchtigen Rauschen und Interferenzen die Reichweite, vor allem in städtischer Umgebung. Während Sigfox dies mit einer hohen Ausgangsleistung kompensiert, bleibt die Reichweite von LoRaWAN gering. Bei NB-IoT können Reichweite und Gebäudedurchdringung mithilfe der Abdeckungsverbesserungs-Funktion (Coverage Enhancement) verbessert werden.

Max. Reichweite in Städten in Innenräumen (m)



Coverage Enhancement (CE) Levels: CE 0 = gut CE 1 = mittel CE 2 = schlecht Quelle: Naumann H. & Oelers W. (2020)

Szenario:

- Groß-/Mittelstadt (Hata-Funkausbreitungsmodell)
- Eine Wand zwischen Basisstation/Gateway und Gerät
- 28 dB Verlust (Durchdringungsverlust, Fading)
- Höhe Basisstation/Gateway: 30 m
- Höhe Gerät: 1 m
- Bidirektionale Übertragung mit Bestätigung (UL/DL)





2. Abdeckung

Es gibt wesentliche Unterschiede bei der Netzabdeckung zwischen den drei Technologien, doch NB-IoT hat in diesem Bereich einen entscheidenden Vorteil. Es basiert auf dem LTE-Industriestandard der 3GPP, läuft auf denselben Basisstationen und kann daher die bestehende LTE-Netzinfrastruktur nutzen. In Deutschland beispielsweise ist über rund 60.000 LTE-Basisstationen – also etwa 20.000 pro Netzanbieter – eine landesweite Versorgung sichergestellt, insbesondere vor dem Hintergrund einer immer breiteren Verfügbarkeit von nationalem Roaming. Die Einrichtung und der Betrieb einer ausreichenden Anzahl dedizierter LoRaWAN-Gateways bzw. Sigfox-Basisstationen wären hingegen wirtschaftlich nicht tragfähig. LoRaWAN bietet öffentliche Community-Netzwerke an vielen städtischen Standorten, jedoch ohne jede Qualitätsgarantie. Ähnliches gilt für die internationale Verfügbarkeit:

Mehr als 100 Mobilfunkbetreiber **in 54 Ländern** (Stand Ende 2020) betreiben bereits **NB-IoT-Netze**, hierin eingeschlossen alle Industrienationen. Für NB-IoT als globaler 3GPP-Standard ist ein länder-, netz- und providerübergreifendes Roaming bereits Realität. Im Jahr 2020 wurden die ersten kommerziellen Roaming-Vereinbarungen geschlossen. Seither weiten die Provider ihre Roaming-Präsenz immer schneller aus. Um eine globale Verfügbarkeit von Drahtlosverbindungen zu gewährleisten, können zudem viele NB-IoT-Module auf 2G/3G- oder LTE-M-Funknetze zurückgreifen, falls NB-IoT noch nicht verfügbar ist.

LoRaWAN-Netzwerke sind laut den Angaben der **LoRa Alliance** in über 160 Ländern verfügbar, vornehmlich als lokale Installationen. Roaming ist schwierig, weil es nur in wenigen Fällen einen zuverlässigen vertraglichen Rahmen gibt. Das dezentrale Roaming zwischen privaten, öffentlichen und offenen Netzwerken birgt Risiken bezüglich Zuverlässigkeit und Sicherheit. Aufgrund unterschiedlicher Frequenzbänder und nationaler Vorschriften (z. B. zu Arbeitszyklen) sind LoRaWAN-Module außerdem zwischen Europa, Nordamerika und Asien nicht universell kompatibel.

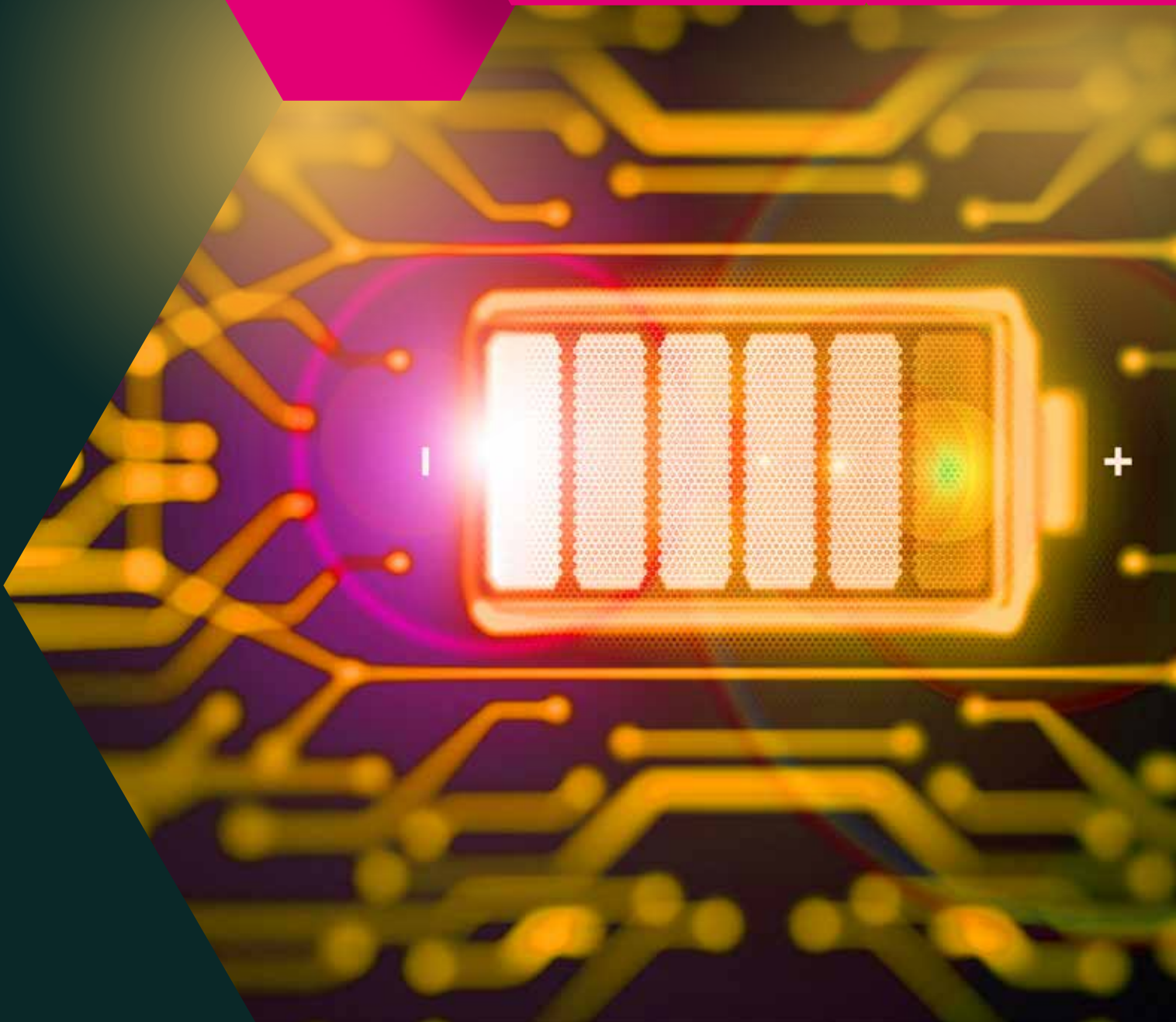
Sigfox ist gemäß den Angaben **auf der eigenen Website** in rund 70 Ländern im Einsatz. Eine global zentralisierte Netzwerkinfrastruktur ermöglicht zwar eine internationale Nutzung, doch aufgrund der geringen Anzahl an Basisstationen pro Land gibt es keine zuverlässige internationale Netzabdeckung (vor allem nicht in Innenräumen). Auch Ende 2020 gab es immer noch kein Sigfox-Funkmodul mit weltweiter Zertifizierung.

Fazit

Wer IoT-Anwendungen landesweit oder sogar über die Landesgrenzen hinaus betreibt, wird feststellen, dass allein Mobilfunkstandards wie NB-IoT die erforderliche Netzabdeckung anbieten können. Proprietären Technologien im unlizenzierten Spektrum fehlt die internationale Netzabdeckung (in Innenräumen) und insbesondere LoRaWAN mangelt es an einer sicheren und zuverlässigen Roaming-Option.



3. Energie- effizienz



Mehr Datenpakete = mehr Energieverbrauch

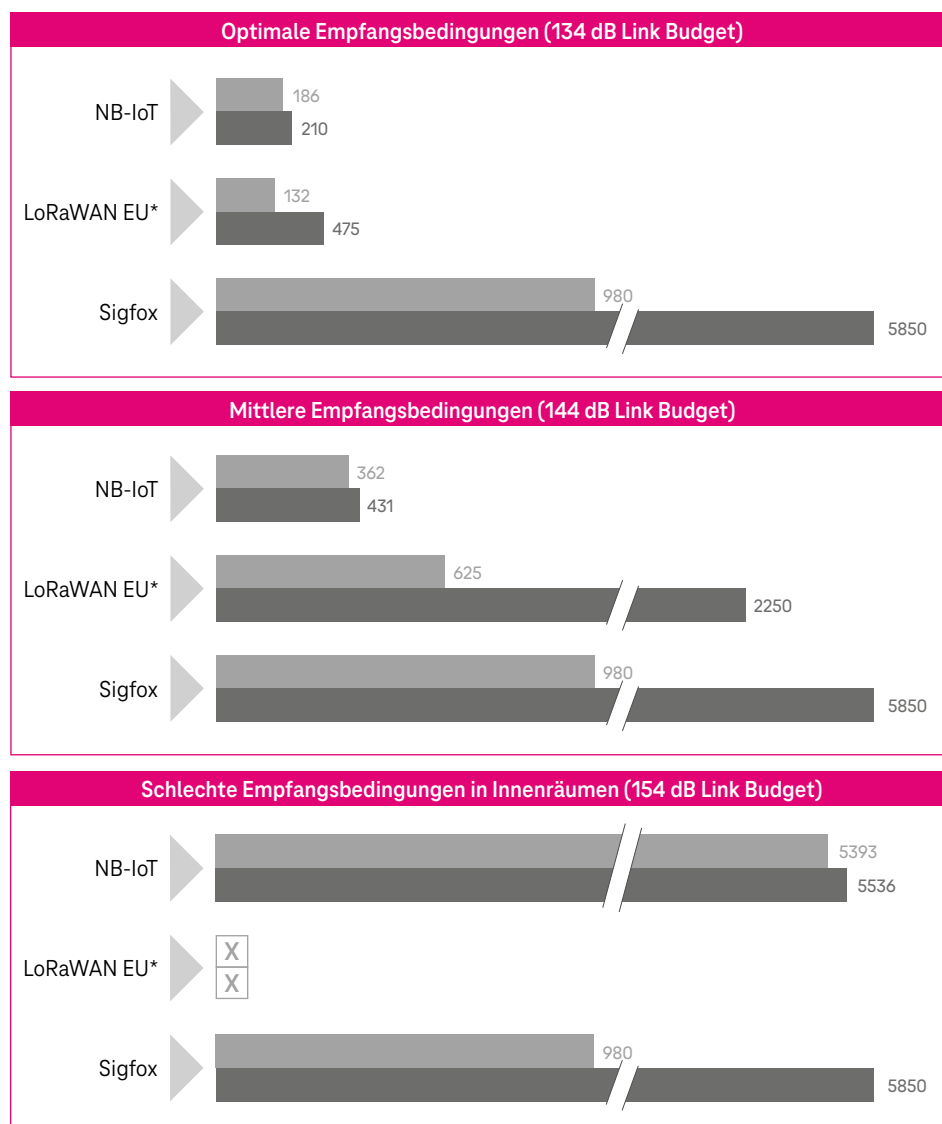
Für IoT-Anwendungsfälle wie die Vernetzung von Parkplatzsensoren, Abfallbehältern oder Trackern ist es wichtig, dass die Funkmodule so wenig Strom wie möglich verbrauchen. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Module lange Zeit wartungsfrei mit einer Batterieladung laufen. Auf diese Weise werden nicht nur die Unabhängigkeit der Geräte von einer fest installierten Stromquelle wie beispielsweise einer Steckdose gewährleistet, sondern auch niedrige Betriebskosten. Energieeffizienz ist somit für LPWA-Masenanwendungen unerlässlich, zum Beispiel in einer Smart City.

Viele der in der Vergangenheit hierzu durchgeführten Studien beruhten vornehmlich auf Laborergebnissen unter Verwendung kleiner Datenpakete. Aus diesem Grund führte die Lübecker IoT-Ingenieure von Triptec Praxistests unter realen Bedingungen mit Datenpaketen mit einer Größe von 12, 24, 64 und 512 Byte durch. Diese Messanalyse erfolgte unter optimalen (Außenbereich), mittleren und schlechten Empfangsbedingungen in einem Kellerschoss (siehe Grafik).

Da viele Anwendungen leicht eine Nachrichtengröße von 200 Byte oder mehr benötigen, haben diese Praxistests, gezeigt, dass NB-IoT-Geräte hier den Vorteil bieten, große Datenpakete in einem Stück zu übermitteln. Sigfox würde hingegen bereits eine 64-Byte-Nachricht in sechs Einzelpakete aufteilen müssen und damit für die Übertragung das Sechsfache an Energie verbrauchen. Bei jeweils fast 1.000 mW/s wäre der Energieverbrauch extrem hoch, da die Sigfox-Technologie keine Anpassung der Übertragungsleistung an die Empfangsbedingungen erlaubt. Folglich sind häufige Status- oder Positionsmeldungen nicht mit einer langen Batterielebensdauer vereinbar.

LoRaWAN ist nur bei guter Netzabdeckung und sehr kleinen Datenmengen relativ energiesparend, fällt jedoch bei zu schlechten Bedingungen ab (siehe Grafik). Längere Distanzen führen automatisch zu höheren Paketverlusten und erfordern Übertragungswiederholungen, was den Energieverbrauch nach oben treibt.

Energieverbrauch bei Uplink-Datenübertragungen (mWs)



Fazit

Wenn ein sehr geringer Energieverbrauch für eine IoT-Anwendung wichtig ist, gibt es in den meisten Fällen keine Alternative zu NB-IoT. Sigfox und LoRaWAN stoßen an ihre Grenzen, insbesondere bei größeren Datenpaketen und schlechten Übertragungsbedingungen.

Mit dem IoT Solution Optimizer der Deutschen Telekom können Entwickler den Energieverbrauch von NB-IoT-Geräten für verschiedene Anwendungsfälle und Netzabdeckungen simulieren und optimieren. (Link: <https://iot.telekom.com/en>)

Eine SMS-Textnachricht als Übertragungsmedium wäre – hinsichtlich ihrer Energieeffizienz – keine tragfähige Alternative zu LPWA-Technologien. Für ihre maximale Reichweite (144 dB) sind 3.500 mWs erforderlich, und selbst im Optimalfall (134 dB) wären immer noch 450 mWs vonnöten.

■ 12 Bytes (sehr kurze Nachricht) ■ 64 Bytes (gängiger Anwendungsfall) □ keine Verbindung

*Die Protokolle NB-IoT und Sigfox verfügen über integrierte Funkübertragungswiederholungen. Bei LoRaWAN müssen diese von der Anwendung initiiert werden, um (mit der Übertragungsstanz zunehmende) Paketverluste und Kollisionen zu mindern. Um einen gleichwertigen Vergleich sicherzustellen, wurde daher von zwei Wiederholungen für 134 dB und drei Wiederholungen für 144/154 dB ausgegangen.

Quelle: Naumann H. & Oellers W. (2020)

4. Sicherheit

```
...rpc = new fast)  
init: function(  
  setTimeout(func  
    Community.res  
    , 500);  
  ,  
  authorised: funct
```

```
var href = local  
if (href.indexof  
  else href = href
```

```
if (href.indexof  
  location.href =  
  return;  
},  
unauthorised  
href = href
```

Realistisch betrachtet räumen IoT-Entwickler dem Faktor Sicherheit weiterhin eine geringere Priorität ein als anderen Aspekten wie technische Zuverlässigkeit, Energieeffizienz und Kosten. Oft wird zudem davon ausgegangen, dass es sich für einen Hacker nicht lohnen würde, kleine unkritische IoT-Geräte anzugreifen. Dies ist jedoch eine gefährliche Fehleinschätzung. Sicherheitsaspekte sollten daher bereits in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden, auch wenn sie typischerweise erst mit zunehmender Reife einer Technologie ins Zentrum der Aufmerksamkeit rücken.

LoRaWAN für IoT: Sicherheitslücken in v1.0

Bei LoRaWAN hängt die Sicherheit maßgeblich von der Version ab. 2017 wurden mit der neuen v1.1-Architektur verschiedene Sicherheitslücken und Schwachstellen aus Version 1.0 behoben, beispielsweise das Problem, dass bei der Ende-zu-Ende-Verschlüsselung von Frame-Nutzdaten der Netzwerkservers während des Verbindungsaufbaus zum Endgerät Zugang zum Schlüssel erhält. Stand Ende 2020 wird die neue Version 1.1 jedoch noch nicht flächendeckend genutzt.

Sigfox: anfällig für Angriffe

Sigfox ist trotz der integrierten Sicherheitsmechanismen inhärent anfälliger für Angriffe. Aufgrund der sehr kurzen Nachrichtenlängen und der kurzen 12-Bit-Sequenznummer kann mit einfachen Brute Force-Angriffen Schaden angerichtet werden. Replay- und DoS-Angriffe wurden mehrfach erfolgreich simuliert.

Die kritischsten Schwachstellen bei LoRaWAN v1.0 und vor allem Sigfox sind in den jeweiligen Endgeräten zu finden. Aus Kostengründen sind sie nicht standardmäßig mit einem Sicherheitselement ausgestattet – also einem Chip, auf dem Verschlüsselungsdaten wie geheime Schlüssel sicher gespeichert sind. Hacker könnten daher geheime Schlüssel erfolgreich entschlüsseln oder das Gerät mit gehackter Firmware flashen. Beim Einsatz von Geräten ohne Sicherheitselement kann selbst eine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung wirkungslos sein.

NB-IoT: sicherer Schlüsselaustausch

NB-IoT profitiert hingegen von LTE-Sicherheitsmerkmalen, die sich in der Praxis seit langem bewährt haben. Zu diesen Merkmalen zählen die wechselseitige Authentifizierung von Endgerät und Netz, etablierte Verschlüsselungsalgorithmen wie AES sowie sichere Schlüsselerzeugung und sicherer Schlüsselaustausch. Netzseitig ist die Luftschnittstelle bei NB-IoT immer verschlüsselt. Ein weiterer bedeutender Vorteil besteht darin, dass NB-IoT-SIM-Karten manipulationssicher sind, weil sie ein Sicherheitselement enthalten. Die Entschlüsselung ist damit extrem schwierig und in den meisten Fällen unmöglich.

Eine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung ist nicht Standard, doch der Netzbetreiber kann die Sicherheit erhöhen, indem beispielsweise ein Sicherheitstunnel (IP-VPN) zwischen dem Kernnetz und dem Anwendungsserver verwendet wird. Beim Roaming in NB-IoT-Netzwerken sollten zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen wie Ende-zu-Ende-Verschlüsselung implementiert werden. Wenn jedoch ein NB-IoT-Anwendungsfall allein im Heimatnetz des Netzbetreibers stattfindet, sind während der Übertragung keine zusätzlichen Sicherheitsmechanismen erforderlich.

Fazit

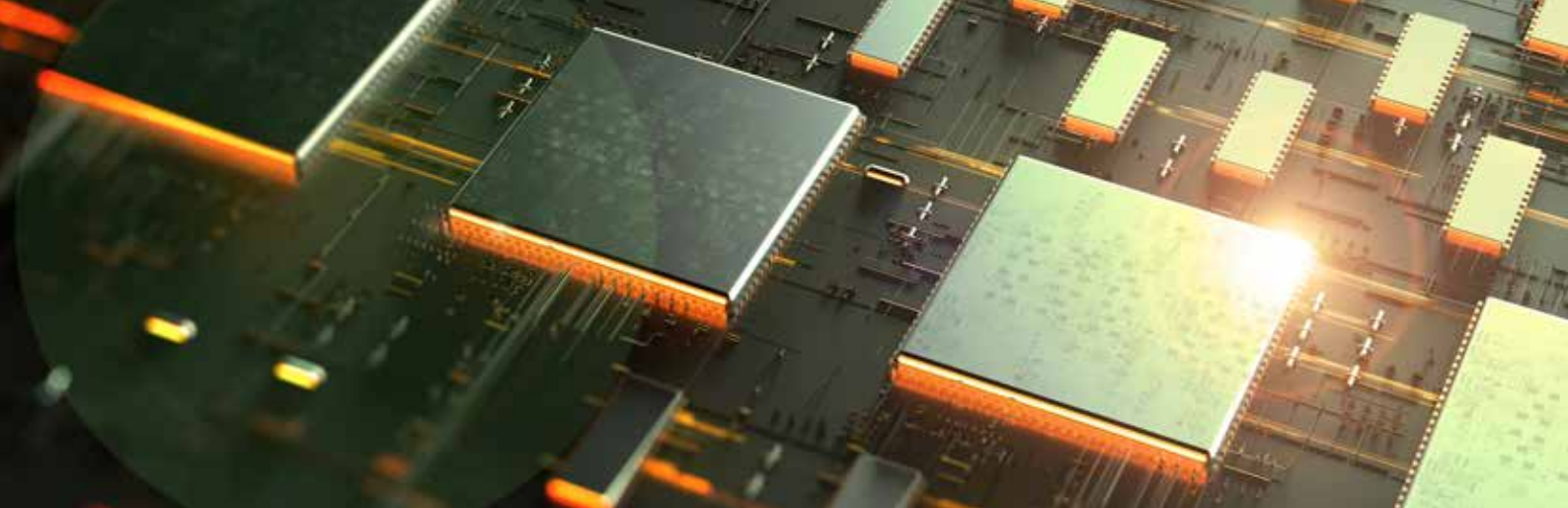
Ist die geplante IoT-Anwendung sicherheitskritisch, sind LoRaWAN v1.0 und insbesondere Sigfox nicht geeignet. NB-IoT bietet mehr Sicherheit, vor allem weil die eingesetzten SIM-Karten manipulationssicher sind. Mit zunehmender Reife des IoT-Marktes ist jedoch davon auszugehen, dass die Sicherheitsmechanismen aller drei Technologien kontinuierlich geprüft und verbessert werden.

Einen detaillierten Vergleich der Sicherheitsmechanismen von NB-IoT und LoRaWAN finden Sie in unserem Whitepaper **Mobile IoT Security Comparison**.





5. Kosten



Die Kostenstruktur für die Einrichtung eines IoT-Funknetzes mit LPWA-Technologie hängt in entscheidendem Maße vom Betriebsmodus ab, also davon, ob ein Vertrag mit einem Netzbetreiber geschlossen oder eine eigene Netzinfrastruktur aufgesetzt und betrieben wird (siehe Tabelle). Sigfox-Geräte und -Funkmodule sind derzeit (Stand 2020) am preiswertesten, unter anderem weil sie auf der bei weitem einfachsten Technologie basieren. LoRaWAN-Module sind seit 2015 am Markt erhältlich und haben daher gegenüber NB-IoT den Vorteil eines zeitlichen Vorsprungs von rund zwei Jahren. Doch die Preise für NB-IoT-Hardware fallen aufgrund hoher Produktionsmengen (insbesondere in China) und kontinuierlich steigender Umsätze rapide. Aus diesem Grund wurde das ursprüngliche Preisziel von 4 USD pro Funkmodul bereits wenige Jahre nach Einführung der ersten NB-IoT-Netze unterschritten.

Nutzungsgebühren vs. Investitionskosten

Die Kosten für SIM-Karten (oder SIM-Profile für integrierte SIM wie **nuSIM**) sind im Vergleich zu den Gerätekosten zu vernachlässigen. Die jährlichen Nutzungsgebühren pro Gerät (*) – üblicherweise im einstelligen Bereich für NB-IoT und im zweistelligen Bereich für Sigfox oder providerbetriebenem LoRaWAN – machen hingegen einen großen Unterschied aus, vor allem bei langfristigen Projekten.

Mit der Einrichtung eines privaten LoRaWAN-Netzwerks können zwar Nutzungsgebühren vermieden werden. Allerdings fallen Investitionen in die Netzwerkinfrastruktur an, beispielsweise für den Kauf und die Installation lokaler Gateways und Netzwerkserver (auch wenn letztere mittlerweile als Cloud-Service eingekauft werden können). Wartung und Betrieb, die Miete für Gateway-Standorte und Stromkosten müssen ebenfalls finanziert werden. Alternativ sind all diese Kosten in den variablen Nutzungsgebühren für ein anbieterbetriebenes Netz enthalten und daher besser planbar (pro Gerät).

Fazit

Bei den meisten IoT-Anwendungsfällen liegen die Gesamtkosten (Total Cost of Ownership, TCO) für NB-IoT niedriger als für LoRaWAN und Sigfox. Je länger also eine IoT-Anwendung genutzt werden soll, desto höher der Kostenvorteil von NB-IoT. Es sind jedoch auch Fälle vorstellbar, in denen ein lokales privates LoRaWAN-Netzwerk die bessere Alternative sein kann.

Kostenfaktoren für Deployments

	NB-IoT	LoRaWAN		Sigfox
		Eigenes lokales Netzwerk	Vertrag mit Betreiber	
Geräte inkl. Funkmodul	€	€	€	€
SIM-Karten	€	–	–	–
Nutzungsgebühren*	€	–	€	€
Eigene Netzwerkinfrastruktur	–	€	–	–
Netzwerkbetrieb und -wartung	–	€	–	–
Anwendung (Server)	€	€	€	€

(*) Die aktuellen Preise finden Sie auf den Provider-Websites.

6. Zukunfts- fähigkeit



Neben Überlegungen zu technischer Qualität und Kosten, wie in den vorherigen Kapiteln beleuchtet, sollten alle Unternehmen, die IoT-Anwendungen und -Geräte entwickeln oder nutzen, die Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit der gewählten Technologie berücksichtigen. Folgende Fragen sollten insbesondere geklärt werden:

- Ist sichergestellt, dass meine eingerichteten IoT-Geräte über ihre gesamte Lebensdauer funktionieren werden? Wird mein Provider dann noch existieren und das Netz betreiben? Sind zukünftige rechtliche Einschränkungen denkbar, durch die ich zum Austausch meiner Geräte gezwungen sein könnte?
- Werden die Preise für Hardware und Nutzung bei zukünftigen Gerätegenerationen sinken oder steigen? Wird es ausreichend Akteure am Markt geben, um einen harten Wettbewerb um beste Qualität und Preise zu gewährleisten, oder werde ich von einem einzelnen Anbieter abhängig sein?
- Wird es genug Ressourcen für und Investitionen in die kontinuierliche Verbesserung dieser Technologie geben? Wird es regelmäßige Updates geben, um Qualität und Leistung weiter zu verbessern und neue Sicherheitslücken zu schließen?
- Gibt es eine aktive Entwickler-Community, die mich in der Anwendungsentwicklung und Fehlersuche unterstützen kann?

Sigfox ist ein eigenständiges Unternehmen, das eigene Standards setzt. Produkte, die in Sigfox-Netzen eingesetzt werden, müssen (kostenpflichtig) zertifiziert werden. In den vergangenen Jahren ist eine breite Auswahl an Hardware und Software entstanden, die jedoch meist **von kleineren Anbietern stammt**. Die Entwickler-Community wird zentral von Sigfox organisiert.

LoRaWAN wird von Semtech dominiert. Das Unternehmen ist Inhaber der Patente für die LoRa-Modulationstechnologie. Die LoRa Alliance, eine offene gemeinnützige Vereinigung mit über 500 Mitgliedern, unterstützt eine große und dynamische Gemeinschaft, die LoRaWAN-basierte Hardware und -Software entwickelt. Die Halbleiter sind jedoch weiterhin nur von Semtech oder Lizenznehmern erhältlich. Obwohl es bereits eine beeindruckende Auswahl einsatzbereiter Geräte gibt, muss man dennoch feststellen, dass die Anbieterlandschaft für LoRaWAN-Halbleiter, -Geräte

oder -Gateways im Vergleich zu den typischen Lieferanten für mobile 3GPP-Industriestandards wie NB-IoT oder LTE(-M) aus eher kleinen Akteuren besteht. Die LoRaWAN-Entwicklergemeinschaft ist dezentral und vielfältig aufgestellt. Die größten Communitys finden sich bei Semtech, The Things Network und Actility.

Trotz des im Vergleich zu LoRaWAN und Sigfox eher späten Markteintritts ist NB-IoT im Gegensatz zu diesen proprietären Technologien ein offener Industriestandard, der von 3GPP, einer weltweiten Kooperation von Standardisierungsgremien mit über 500 Mitgliedern, entwickelt wurde und diverse Mobilfunktechnologien abdeckt. Im Ergebnis genießen NB-IoT-Benutzer den Vorteil, dass die von ihnen verwendete Hardware global einheitlich und kompatibel ist, beispielsweise Mehrfrequenzmodule zur Verarbeitung unterschiedlicher Frequenzbänder. Unternehmen können frei aus den Produkten verschiedener namhafter Hersteller und Provider auswählen und laufen nicht Gefahr, von einem Anbieter abhängig zu werden. Zwar gibt es bisher noch nicht so viele verschiedene Gerätemodelle wie für LoRaWAN, doch die Zahl der am Markt erhältlichen NB-IoT-Funkmodule ist wahrscheinlich bereits vergleichbar. Die Entwicklerlandschaft ist dezentral organisiert und entwickelt sich schnell. Die Deutsche Telekom bietet verschiedene hilfreiche Ressourcen und Community-Support über iotcreators.com. Als wesentliche Komponente des 5G-Standards für Massive IoT ist NB-IoT (sowie LTE-M) weltweit einheitlich einsetzbar und ist langfristig eine sichere Wahl.

Fazit

Angesichts des sich schnell verändernden Marktumfelds kann hier keine definitive Antwort auf die vorherigen Fragen gegeben werden. Letztendlich ist es eine individuelle Entscheidung, ob man lieber in etablierte proprietäre Technologien wie Sigfox oder LoRaWAN investiert, die beide weiterhin von ihrem frühen Markteintritt profitieren, oder ob man auf NB-IoT setzt mit dem Vorteil eines mobilen IoT-Industriestandards (und Teil von 5G), der von der internationalen Mobilfunkbetreiber-Gemeinschaft unterstützt wird.



Überblick:

Welche LPWA-Technologie ist für mein IoT-Projekt am besten geeignet?

Wie wir in diesem Bericht aufgezeigt haben, unterscheidet sich die Leistung der drei Technologien in den wichtigsten Kategorien erheblich, wobei **NarrowBand-IoT** im direkten Vergleich meist als Sieger hervorgeht (siehe Liste).

Unternehmen sollten entscheiden, welche Kriterien ein LPWA-Netz definitiv erfüllen muss – und welche als sekundär eingestuft werden können. In unseren Gesprächen mit Kunden kristallisieren sich Netzabdeckung und Übertragungsqualität als die aktuell bedeutendsten Faktoren für Unternehmen heraus.

Angesichts der Schwächen von Sigfox und öffentlich betriebenen LoRaWAN bei eben diesen Kriterien gibt es nur zwei Optionen für Unternehmen, die nach einem zuverlässigen, sicheren und leistungsstarken LPWA-Netz für ihre IoT-Projekte suchen (siehe Tabelle unten).

Wenn Sie also an einem Unternehmensstandort mit unzureichender Mobilfunkabdeckung eine größere Zahl von IoT-Geräten sicher verbinden möchten und wenn die Datenmengen und Zahl der Nachrichten begrenzt sind, kommt LoRaWAN als lokales IoT-Netzwerk in Frage. In allen anderen Fällen – zum Beispiel wenn eine landesweite oder gar internationale Abdeckung, ein hoher Datendurchsatz, eine hohe Bandbreite und Übertragungsqualität in Verbindung mit einem geringen Energieverbrauch und niedrigen Kosten gefordert sind – ist NarrowBand-IoT die LPWA-Technologie der Wahl – heute und vor allem mit Blick auf die Zukunft.

Zentrale Vorteile von NB-IoT

- 1. Beste Übertragungsqualität**
Lizenziertes Funkspektrum, unbegrenzte Nutzung, beste Gebäudedurchdringung, höchste Daten- und Durchsatzrate, gute Downlink-Übertragung
- 2. Beste nationale und internationale Abdeckung**
Funktioniert mit vorhandener LTE-Infrastruktur und bestehenden Roaming-Verträgen
- 3. Beste Energieeffizienz**
Geringster Energieverbrauch in den meisten Empfangsszenarien, da die Übertragung in der Regel in einem Paket erfolgen kann
- 4. Sicherstes Netzwerk**
LTE-basierte Sicherheitsmechanismen, am wenigsten anfällig für Angriffe, sichere Schlüsselspeicherung auf SIM
- 5. Niedrigste Gesamtkosten**
In den meisten Fällen geringste Total Cost of Ownership (TCO) aus Nutzerperspektive – eigene Netzinfrastruktur, eigener Betrieb und eigene Wartung nicht erforderlich
- 6. Zukunftssicherheit**
Globaler 3GPP-Industriestandard für 5G Massive IoT, unterstützt durch alle großen Netzbetreiber und Hersteller (keine Anbieterabhängigkeit)

Fazit: Welches IoT-Netz für welchen Zweck?

NB-IoT ist eine Option, wenn ...
→ eine landesweite/internationale Abdeckung erforderlich ist
→ Geräte über mehrere Standorte verteilt sind
→ eine zuverlässige Qualität entscheidend ist (kein Datenverlust bei der Übertragung)
→ höhere Durchsatzraten erforderlich sind
→ eine moderate Latenz von bis zu 10 Sekunden gefordert ist
→ Datenübertragungen über verschiedene Netzbetreiber akzeptabel sind

Lokales privates LoRaWAN ist eine Option, wenn ...
→ lokal kein (stabiles) Mobilfunknetz vorhanden ist
→ es eine ausreichende Anzahl von Geräten an einem Standort gibt, die den Betrieb eigener Gateway(s) rechtfertigen
→ gelegentliche Datenverluste bei der Datenübertragung hinnehmbar sind
→ geringere Durchsatzraten in Ordnung sind (bis 1,6 kB/Tag)
→ die Latenz unerheblich ist
→ die Daten das eigene Netz nicht verlassen dürfen

Quellen

- [1] Narrowband IoT Delivers: Insights from the largest NB-IoT Indoor Measurement Campaign (Januar 2019)
- [2] GSMA: Mobile IoT Deployment Map (November 2020)
- [3] Comparison and Analysis of Security Aspects of LoRaWAN and NB-IoT (Januar 2021)
- [4] Security Issues in Internet of Things: Vulnerability Analysis of LoRaWAN, Sigfox and NB-IoT (Juni 2019)
- [5] Naumann H. & Oellers W.: „LPWAN Comparison – Low Energy Consumption with NB-IoT, LoRaWAN and Sigfox“ (2021)
- [6] Naumann H. & Oellers W.: „Smart City – Deployment with public or private LPWAN?“ (2021)
- [7] Hochschule für Technik Offenburg, Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik
„Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed“
- [8] Nanyang Technological University, Singapore; Liando, J. C., Gamage, A. , Tengourtius, A.W., Mo Li. : „Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study.“

Kontakt

iot@telekom.de
iot.telekom.com

Herausgeber

Deutsche Telekom AG
Friedrich-Ebert-Allee 140
53113 Bonn, Deutschland