

LPWAN COMPARISON

Low Energy Consumption with NB-IoT,
LoRaWAN and Sigfox

WILHELM OELERS & HARALD NAUMANN

Copyright © 2021 Triptec HL UG, Lübeck
Rubinweg 1, D-23566 Lübeck, Germany
E-mail: w.oelers@triptec.de
Phone: +49(0)451 / 30 40 718

1. Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis.....	3
2.	Abbildungsverzeichnis.....	5
3.	Tabellenverzeichnis.....	6
4.	Rückblick 0G und Ausblick 5G Mobilfunk.....	7
5.	Was bedeutet LPWAN?.....	10
6.	Warum ein Report zum Energieverbrauch bei LPWAN?.....	11
6.1	Faktoren welche die Laufzeit beeinflussen.....	11
6.2	Linkbudget.....	12
6.3	Maximales Linkbudget der LPWAN Technologien.....	14
6.3.1	Maximales Linkbudget Sigfox.....	15
6.3.2	Maximales Linkbudget LoRaWAN.....	16
6.3.3	Maximales Linkbudget NB-IoT.....	17
6.4	Maximales Payload im Upload und Download der LPWAN Technologien.....	18
6.4.1	Maximales Payload im UL und DL bei Sigfox.....	18
6.4.2	Maximales Payload im UL und DL bei LoRaWAN.....	18
6.4.3	Maximales Payload im UL und DL bei NB-IoT.....	20
6.5	Maximale Anzahl der Meldungen im UL und DL bei LPWAN.....	20
6.5.1	Maximale Anzahl der Meldungen im UL und DL bei Sigfox.....	20
6.5.2	Maximale Anzahl der Meldungen UL und DL bei LoRaWAN.....	21
6.5.3	Maximale Anzahl der Meldungen UL und DL bei NB-IoT.....	22
6.5.4	Auswahl der Module für den Test.....	22
6.5.5	Auswahl Sigfox Module.....	22
6.5.6	Auswahl LoRaWAN Module.....	22
6.5.7	Auswahl NB-IoT Module.....	22
7.	Linkbudget und Energieverbrauch.....	23
7.1	Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei SIGFOX.....	23
7.2	Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei LoRaWAN.....	23
7.3	Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei NB-IoT.....	24
7.4	Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei SMS.....	24
8.	Reichweite bei LPWAN.....	24
9.	Reichweite eines privaten LoRaWAN.....	26
10.	Analyse der Studie der HS Offenburg.....	28
11.	Analyse der Studie der Universität in Singapur.....	29
12.	Tests der Reichweite von LoRaWAN in Gleiberg.....	30
13.	Gegenüberstellung der Energieverbrauch Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT.....	32
13.1	Upload 12 Byte im Vergleich (kalkuliert).....	33
13.2	Upload 24 Byte im Vergleich (kalkuliert).....	36
13.3	Upload 64 (72) Byte im Vergleich.....	36
13.4	Upload 512 Byte im Vergleich (kalkuliert).....	37
13.5	Erwarteter Energieverbrauch von NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox.....	37
14.	Messung des Energieverbrauchs.....	38

14.1	Messung SIGFOX Modul Wisol (Seong Ji)	39
14.2	Messung LoRaWAN Modul Acsip S76S	40
14.3	Messung NB-IoT Modul Quectel BG95, BC66 und BC68 im Vergleich zu LoRaWAN Acsip und Sigfox Seong Ji.....	40
14.3.1	Messreihe 12, 24, 64, 512 Byte bei 134 bis 154 dB Linkbudget.....	41
15.	Schlussfolgerung.....	46

2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Von 0G in 1918 bis zu 5G in 2019	7
Abbildung 2 IMU-R IMT 2020 requirements, Quelle Etri graphic.....	8
Abbildung 3 LPWAN im Vergleich mit Traktoren, Quelle LPWAN Cookbook	9
Abbildung 4 Kalkulation des Linkbudget, Quelle Harald Naumann, LPWAN Cookbook	13
Abbildung 5 Sigfox UL Sensitivity -142 dBm, Linkbudget 163 dB	15
Abbildung 6 Interference Measurements in the European 868 MHz ISM Band with Focus on LoRa and Sigfox,	16
Abbildung 7 NB-IoT Link budget calculator	17
Abbildung 8 LoRa Modem Calculator, SF12 in EU, 255 Bytes, Time on air 9019 ms	19
Abbildung 9 LoRa Modem Calculator, SF12 in EU, 25 Bytes (12 Bytes net), Time on air 1483 ms	21
Abbildung 10 LoRa Modem Calculator, Maximum payload LoRaWAN in EU and US, Time	24
Abbildung 11 Kalkulation der Reichweite mit Okumura-Hata-Model	25
Abbildung 12 Gemeinde Kirchheim mit ihren 12 Dörfern. Einwohner pro Dorf in blauen Kreisen markiert. Quelle LPWAN Cookbook.....	26
Abbildung 13 Simulation des ersten LPWAN Gateway im Hauptdorf Kirchheim.....	27
Abbildung 14 Simulierte Netzabdeckung der Gemeinde Kirchheim mit 12 LoRaWAN Gateways ..	27
Abbildung 15 Vortrag auf dem Wireless Congress 2019 in München, Field tests - RF coverage & signal quality measurements, Folie 36	28
Abbildung 16 15 % bis 95 % Paketverlust bei LoRaWAN mit SF 12.....	29
Abbildung 17 Test der Reichweite und max. Linkbudget mit LoRaWAN EU mit SF12, -121 dBm mit -17,2 dB SNR.....	30
Abbildung 18 Test der Reichweite und max. Linkbudget mit LoRaWAN EU SF12, -120 dBm mit -8,2 dB SNR.....	31
Abbildung 19 SMS mit 33 dBm Sendeleistung	32
Abbildung 20 Energieverbrauch 12 Byte mit NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox - kalkuliert, nicht gemessen	33
Abbildung 21 Kalkulation des Energieverbrauchs von NB-IoT mit Excel-Datei.....	35
Abbildung 22 Datenvolumen bei 144 dB Linkbudget mit LoRaWAN EU, Sigfox und NB-IoT.....	35
Abbildung 23 Energieverbrauch 72 Byte mit NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox - kalkuliert, nicht gemessen	36
Abbildung 24 Leistung von NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox über die Zeit.....	37

3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox im Vergleich	12
Tabelle 2 Vergleich NB-IoT NB1 und NB2	20
Tabelle 3 Reichweite Indoor NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox berechnet mit Candy Tools ¹	25

¹ Vgl. Gütter, Dietbert: CANDY - Tools - Outdoor wave propagation models, in: <http://www.guetter-web.de/>, [online] <http://www.guetter-web.de/mini-tools/candy-prop-outdoor.htm> [03.02.2021].

4. Rückblick 0G und Ausblick 5G Mobilfunk

Bevor wir mit dem Vergleich der relativ neuen LPWAN-Technologien beginnen, machen wir einen Rückblick in der Geschichte des Mobilfunks. 0G war eine deutsche Erfindung aus dem Jahre 1918. Das erste mobile Telefongespräch² in das öffentliche Telefonnetz wurde aus einem deutschen Schnellzug geführt.

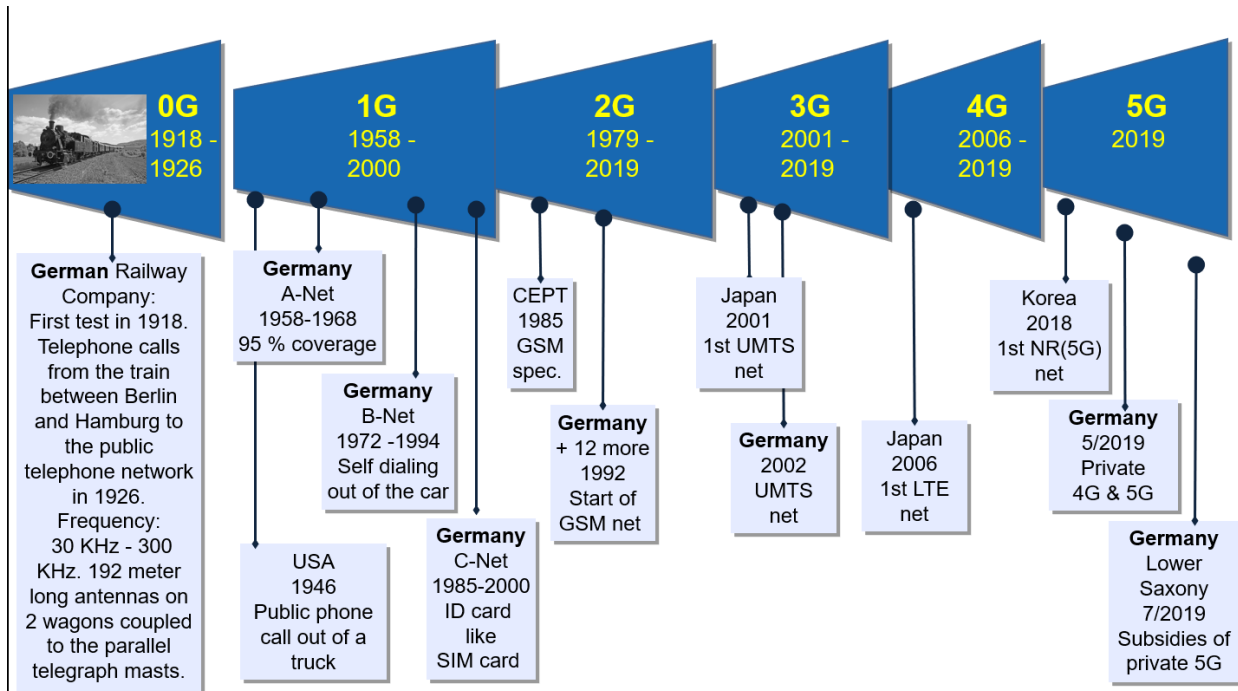


Abbildung 1 Von 0G in 1918 bis zu 5G in 2019

Das funktechnische Babylon bei 1G ist verschwunden und durch ein digitales Esperanto bei 2G ersetzt. Mit 2G kam neben der Sprachverbindung die Datenübertragung. Das digitale Esperanto wurde mit 5G optimiert. 5G gibt es terrestrisch am Boden, per Satelliten am Himmel und wenn gewünscht auch unterirdisch. Im Mai 2019 wurde verkündet, dass 5G-Broadcast ab 2027 DVB-T2 ablösen soll. Das digitale Radio DAB+ könnte das nächste Opfer werden. Bei 5G ist der Frequenzbereich nicht mehr wie bei 0G in Deutschland auf Langwelle begrenzt und reicht nun von 400 MHz bis 28 GHz.

Bei 5G gibt keine Trennung für Sprache und Daten, hoher Geschwindigkeit zur Übertragung von Daten, kurzer Antwortzeit, Niedrigenergiegeräte und Broadcast mehr. Ein Netz für LPWAN, Videostreaming auf das Smartphone und 3D-Gaming wird real. Das Holodeck der Raumschiff Enterprise kann nun mit 3D-Brillen in den Hydepark oder mitten in die Wüste projiziert werden. Funktechnologien haben sich schon immer kontinuierlich weiterentwickelt, um den steigenden Ansprüchen und den höheren technischen Anforderungen gerecht zu werden.

²Vgl. Hessberger, Stephan: ÖbL, Zugfunk 1918 – 1926 – 1940, in: Öffentlicher beweglicher Landfunk, [online] <http://öbl.de/A-Netz/Rest/Zugfunk/Zug1926.html> [06.02.2021].

Wir sind nicht mit bei 192 Meter langen Antennen im Jahr 1918 stehengeblieben, sondern haben die Funktechniken von 0G bis hin zu 5G immer weiter verfeinert. Seit dem Einsatz von Mobilfunknetzen der nullten und ersten Generation steht die Telekommunikationsindustrie vor vielen neuen Herausforderungen in Bezug auf Technologie, effiziente Frequenznutzung und vor allem Sicherheit für die Endnutzer. Zukünftige drahtlose Technologien werden ultraschnelles, funktionsreiches und hochsicheres Mobilfunknetz ermöglichen, zehn Jahre von der Batterie arbeiten und auch Verzögerungszeiten von 1 ms bieten.

Wenn man das gedanklich auf Fahrzeuge überträgt, dann soll das gleiche Fahrzeug zur Formel 1 auf den Nürburgring, auf dem Acker zum Pflügen und die Beschleunigung eines Dragsters genutzt werden. Ein Dragster hat keine große Verzögerung und wird den Rennwagen der Formel 1 in der Beschleunigung in den Schatten stellen. Am Nürburgring gewinnt dann der Rennwagen, weil dem Dragster nach wenigen hundert Metern der Kraftstoff ausgeht. Obendrein kann der Dragster keine Kurven fahren. Mit dem Dragster und dem Rennwagen können wir keinen Pflug ziehen. Beiden fehlt die Ausdauer und das Drehmoment. Mit dem Traktor zum Pflügen gewinnen wir weder beim Rennen der Drags-ter noch in der Formel 1.

Die logische Schlussfolgerung ist somit das 5G mit den Ansätzen und Gedanken aus der 0G bis 3G nicht funktionieren kann. Bei 0G bis 1G wurde immer nur eine Aufgabe für ein Netz verfolgt und es wurde nur Sprache übertragen. Bei 2G und 3G kam neben Sprachübertragung die Datenübertragungen hinzu. Mit 4G ist es schon besser. 4G ist näher an der 5G-Idee, aber immer noch nicht optimal. NB-IoT ist bereits ein Netz im Netz. Dort wurden 200 KHz aus dem Band herausgeschnitten und durch NB-IoT ersetzt. Die 200 KHz Bandbreite für 12 NB-IoT-Kanäle sind pro 5 MHz Bandbreite mehrmals möglich. Obendrein ist der Server zur Verwaltung der Teilnehmer und des Netzverkehrs ein anderer als der für die Smartphones. Bei 5G wurden alle bekannten Anwendungen, alle notwendigen Server und die Möglichkeit der Erweiterung auf noch nicht bekannte Anwendungsfälle auf ein Gesamtsystem migriert. Die heutigen LTE Advanced Networks werden sich in Zukunft Stück für Stück in 5G-Netze wandeln. Um eine höhere Datenrate zu erreichen, wird die 5G-Technologie Millimeterwellen und unlizenzier-tes Spektrum für die Datenübertragung verwenden. Es wurden neue komplexe Modulationstechnik entwickelt, um die massive Datenrate zu bewältigen. Um das Internet der Dinge real zu machen, wird die mögliche Anzahl der Teilnehmer pro Basisstation von 100.000 auf 1.000.000 erhöht. Die Netzwerkarchitektur wird die Funkiona-



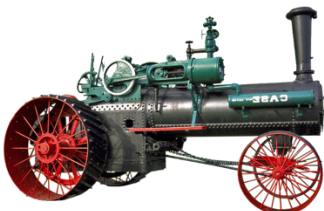
Abbildung 2 IMU-R IMT 2020 requirements, Quelle Etri graphic

litäten und Analysefähigkeiten für Branchen, autonomes Fahren, Gesundheitswesen und Sicherheitsanwendungen erweitern. Wir kommen von 1 GB/s mit LTE-A auf ultraschnelle mobile Internetverbindungen mit bis zu 10 GB/s. Die Latenzzeit reduziert sich auf Millisekunden. Bei 5G kann das Frequenzspektrum dynamisch jederzeit anderen Diensten zugeordnet werden. Frequenzbereiche, welche dem öffentlichen Netzbetreiber zugeordnet sind, können im Katastrophenfall der Polizei und den Rettungsdienst bzw. der Feuerwehr zugeordnet werden. Bei 0G und 1G Mobilfunk wurden große Flächen mit hohen Antennenstandorten versorgt. 150 Basisstationen reichten beim B-Netz aus, um 95 % der Bevölkerung die Möglichkeit des mobilen Telefonierens zu bieten. Wirklich bedienen konnte das Funknetz nur 11.000 Teilnehmer. Bei 5G kommen kleine Zellen (Small-Cells) und Strahlformung (Beamforming) zur Effizienzsteigerung zum Einsatz. 5G-U (5G unlizenziiert) holt uns die 5G-Basisstation ins Wohnzimmer. Jeder wird damit zum Betreiber einer ultrakleinen Basisstation.

Seitenschritt 5G Mobilfunk mit NB-IoT und LTE-M

NB-IoT und LTE-M sind die LPWAN-Technologien der zellularen Netzbetreiber. NB-IoT und LTE-M wurden inzwischen offiziell in 5G integriert. Im obigen Abschnitt haben wir die unterschiedlichen Aufgabenstellungen bei 5G mit dem Formel-1-Rennen Wagen dem Dragster und dem Traktor verglichen. Der Traktor ist langsam und hat ein hohes Drehmoment, um den Pflug zu ziehen. In dieser Ausarbeitung betrachten wir die langsamen Funktechnologien mit hoher Reichweite. Traktor ist nicht Traktor. Es gibt dort sehr große Unterschiede.

LPWAN (NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox) by tractors



Sigfox-Traktor:

- Primarily forward only
- Limited use per hour/day
- No gear
- High energy consumption
- Trailer forward 12 byte loading capacity
- Trailer backwards for 8 bytes with rusted activated brake



LoRaWAN-Traktor:

- Forward and reverse driving
- Limited use per hour/day
- Six-speed gearbox
- Medium energy consumption
- Trailer (US) forward with approx. 11 byte loading capacity
- Trailer backwards with approx. 50 byte loading capacity



NB-IoT-Traktor:

- Forward and reverse driving
- Unlimited use
- Multistage automatic gearbox
- Minimal energy consumption
- Trailer forward with approx. 1200 byte loading capacity
- Trailer backwards with approx. 1200 byte loading capacity

Abbildung 3 LPWAN im Vergleich mit Traktoren, Quelle LPWAN Cookbook

LPWAN ist die Abkürzung für Low Power Wide Area Network. Gemeinsames Merkmal der LPWAN-Techniken ist der geringe Energieverbrauch. Wir vergleichen die bekanntesten Technologien: NB-IoT, LoRaWAN und SIGFOX.

5. Was bedeutet LPWAN?

LPWAN ist die Abkürzung für Low Power Wide Area Network. Zu den Wide Area Networks (Weitbereichsnetzwerken) gehören unter anderem GSM, UMTS und LTE. Zu den LPWAN zählen NB-IoT, LoRaWAN, SIGFOX, Weightless und viele mehr.

Die Formulierung Low Power ist unglücklich gewählt. Power ist das englische Wort für Leistung, die hier wiederum unbedeutend ist. Was zählt, ist der Energieverbrauch, und die Energie erhält man, indem man die Leistung mit der Zeit multipliziert. Besser wäre somit LEWAN (Low Energy Wide Area Network). Überhaupt wird in der LPWA-Welt mit vielen Begriffen umher geworfen, Thesen aufgestellt und die Fakten oft nicht hinterfragt. In diesem Report wollen wir etwas Licht in das Dunkel der Begriffe bringen und ein paar Unterschiede der LPWAN aufzeigen.

Low Power – Leistung – Energie

Wie bereits erwähnt, ist Leistung das falsche Wort. Die Batterie speichert Energie und keine Leistung. Auf der Batterie steht die Kapazität in mAh, wobei es sich hierbei nicht um eine Energiemenge handelt. Die Energie erhält man, wenn man Spannung x Strom x Zeit multipliziert. Wenn man die 2000 mAh einer AA-Zelle mit der mittleren Klemmenspannung multipliziert, erhält man Energie in mWh. $2000 \text{ mAh} \times 1,2 \text{ Volt} = 2400 \text{ mWh} = 2,4 \text{ Wh}$. In der Elektroindustrie neigen wir dazu, Wh oder Ws und Joule zur Beschreibung des Energieverbrauchs zu verwenden. In der Ernährungsindustrie werden Kalorien verwendet.

Wir könnten den Stromverbrauch eines LPWAN-Moduls in Kalorien ausdrücken. 1 Joule sind 0,239006 Kalorien. 1 Joule entspricht 1 Ws. Wattstunden (Wh), oder besser gesagt Kilowattstunden (kWh) zählt der "Stromzähler". Er zählt nicht den Strom, sondern die verbrauchte Energie und ist somit ein Energiezähler. Ein Tag hat 24 Stunden x 60 Minuten x 60 Sekunden = 86.400 Sekunden. Unsere AA-Zelle speichert somit $2400 \times 86.400 \text{ mWs} = 207.360.000 \text{ mWs}$. Nachfolgend betrachten wir den Stromverbrauch der LPWAN-Module etwas genauer.

LPWAN-Module im Vergleich bei 154 dB Linkbudget

Eine SMS mit 33 dBm Sendeleistung, inklusive Einbuchten in das GSM-Netz im Band 8 (880 MHz – 960 MHz), benötigt circa 4000 mWs. Alle LPWA-Module auf Basis NB-IoT, LoRaWAN oder SIGFOX benötigen weniger Energie als die SMS. Wenn man die Technologien auf den Modulen mit LPWA-Chipsets in Serie aus dem Jahr 2018 vergleicht, so trennt sich die Spreu vom Weizen.

Um es vergleichbar zu machen, betrachten wir die LPWA-Module zunächst einmal bei 144 und 154 dB Linkbudget (LB). Das maximale Linkbudget ist das Delta aus abgestrahlter Leistung und Empfindlichkeit plus Antennengewinn der Antennen am Sender und am Empfänger. Das Linkbudget ist bei SIGFOX und LoRaWAN im Upload und Download unsymmetrisch.

Diese Asymmetrie führt dazu, dass eine Meldung in die eine oder andere Richtung nicht quittiert werden kann. Die 154 dB Linkbudget sind bei NB-IoT mit CL Level 1 benannt. Der CL-Level gibt die Güte der Verbindung an. Würden wir das maximale Link Budget von 164

dB zum Vergleich ansetzen, fällt SIGFOX und LoRaWAN in diesem Vergleich heraus. SIGFOX ist auf ca. 156 dB im Downlink begrenzt und kann auch nur 12 Byte pro Telegramm im Upload übertragen. Daher begrenzen wir den Vergleich auf 12 Byte pro Meldung.

Die 164 dB Link-Budget bei NB-IoT sind 20 dB besser als die maximalen 144 dB Link-Budget bei GSM. 3 dB Gewinn bedeuten, dass sich bei GSM 900 mit 33 dB Sendeleistung der mittlere Strom beim Senden von 200 mA bei GSM 1800 auf 100 mA reduziert. Da sich die Leistung aus Strom x Spannung x Zeit berechnet, reduziert sich die Energie bei GSM 1800 von ca. 4000 mWs auf 2000 mWs. Um aber das Link-Budget von 144 dB auf 153 dB (144 dB + 3 dB + 3 dB + 3 dB) zu erhöhen, müssen wir die 4000 mWs dreimal verdoppeln. Bei 33 dBm + theoretischen 9 dB = 42 dBm hätten wir 4000 mWs x 8 = 32.000 mWs Energieverbrauch.

6. Warum ein Report zum Energieverbrauch bei LPWAN?

An vielen Stellen liest man immer wieder von der mystischen Laufzeiten von 10 Jahren Laufzeit von der Batterie. Manche Autoren der LPWAN-Artikel nennen sogar 15 Jahre. Warum nicht gleich 20 oder 30 Jahre? Die meisten der Angaben zur Laufzeit 10 bis 15 beziehen sich auf keine mathematische oder physikalische Grundlage zur Berechnung. Daher müssen einige Randbedingungen benannt werden. Die Laufzeit eines LPWAN-Gerätes mit Betrieb von der Batterie wird durch viele Faktoren bestimmt.

6.1 Faktoren welche die Laufzeit beeinflussen

- Benötigter Energieverbrauch pro Aussendung
- Wiederholung der Meldungen bei Paketverlust durch Kollision
- Wiederholung der Meldungen bei mangels Basisstation in der Nähe
- Anzahl der Aussendungen pro Tag
- Kapazität der benutzten Batterie
- Selbstentladung wir benutzten Batterie
- Selbstentladung der Batterie durch Ströme im Schlafmodus

Im Extremfall ist in der gewünschten Region keine Netzabdeckung in den Gebäuden vorhanden. Die Folge ist 100% Paketverlust. Wird eine Versorgung im Innenbereich benötigt, dann ist eine solche LPWAN-Technik von vornherein ungeeignet.

Die Abdeckung eines öffentlichen LPWAN sollte man mit Tests vor Ort ermitteln. Wenn man ein privates LPWAN anstrebt, sollte man sich nicht von den extremen Reichweiten einiger LPWAN-Evangelisten lenken lassen. Realistische Reichweiten mit einer Versorgung im Innenbereich liegen im im Stadtgebiet liegen bei einem Linkbudget von 144 dB zwischen 1 bis 2 km.

In diesem Text haben wir einen Fokus auf den Energieverbrauch pro Aussendung und die Wiederholung von Meldungen. Jede Wiederholung durch Paketverlust einer Meldung vervielfacht den ursprünglichen Verbrauch für ein Paket. Des Weiteren betrachten wir die benötigte Energie für 12, 24, 64 und 512 Byte.

	Sigfox EU	Sigfox US	LoRa EU	LoRa US	NB-IoT NB2 Global	Hier im Vergleich
Max. Linkbudget UL	ca. 163 dB	TBD	ca. 141 bis 146 dB	TBD	164 dB	134 bis 154 dB
Max. Linkbudget DL	ca. 158 dB	TBD	ca. 151 bis 156 dB	TBD	164 dB	134 bis 154 dB
Worst Case Linkbudget	ca. 158 dB	TBD	ca.141 dB	TBD	164 dB	134 bis 154 dB
Max. Payload UL	12 Byte	12 Byte	243 Byte	11 Byte	317 Byte 2536 Bits	12 Byte - 512 Byte
Max. Payload DL	8 Byte	8 Byte	243 Byte	11 Byte	317 Byte 2536 Bits	12 Byte - 512 Byte
Max. Meldungen UL pro Tag	144	144	Duty Cycle 1 %	keine Begrenzung	keine Begrenzung	Nicht betrachtet
Max. Meldungen DL pro Tag	8	8	10 % verteilt auf alle Knoten	keine Begrenzung	keine Begrenzung	Nicht betrachtet
Bps @ 144 dB Linkbudget UL	100 bps	TBD	297 bps	TBD	27000 bps	Nicht betrachtet
Bps @ 154 dB Linkbudget UL	100 bps	TBD	0 bps, keine Verbindung	TBD	ca. 6000 bps	Nicht betrachtet
Funkmodule	Wisol WSS-FM10R 1AT	nicht untersucht	Acsip S76S	nicht untersucht	Quectel BC66, BC68, BG95-M3	5 Funkmodule, siehe links

Tabelle 1 NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox im Vergleich

Die Erläuterungen zu den Parametern und Werten in der Tabelle finden Sie im nachfolgenden Text.

6.2 Linkbudget

Das Link-Budget ist die Summe aller Verluste und Gewinne bei der Übertragung einer Radiowelle. Eine Funkwelle wird durch die Antenne verstärkt oder gedämpft. Bei der Übertragung eines Signals zwischen Sender und Empfänger können Daten verloren gehen. Die Untersuchung von Verlusten und Gewinnen ist daher wichtig, um die Zuverlässigkeit und Effizienz einer Funkverbindung zu berechnen. Damit ein Signal empfangen werden kann, muss das Delta der Ausgangsleistung abzüglich der Summe aller Verluste größer sein als die Empfindlichkeit des Empfängers. Bei bidirektionalen LPWAN-Funkverbindungen gelten die Verluste zwischen Sender und Empfänger in beiden Richtungen. Bei LPWAN-Technologien im unlicenzierten Band ist das Linkbudget in der Regel unsymmetrisch. Das bedeutet, dass der Sender zwar zum Gateway senden und dieses erreichen kann, die Quittung des Gateways den Sender jedoch nicht erreicht. Es kann aber der umgekehrte Fall eintreten. Deshalb müssen die Datenblätter der Funkmodule und der Gateways sorgfältig geprüft werden. Dies wird schwierig, wenn

Hersteller oder Netzbetreiber die Daten nicht veröffentlichen. Sind Sendeleistung und Empfindlichkeit bekannt, müssen nur die Pfadverluste vom Delta abgezogen werden, um festzustellen, ob ein Empfang möglich ist. Einige der Verluste sind unter der Kontrolle des Entwicklers der Hardware: Die Antenne und die Massefläche der Leiterplatte beeinflussen die von der Antenne abgestrahlte Leistung. Mehr als 0 dBd oder die entsprechenden 2,15 dBi sind bei einer Monopolantenne nicht zu erwarten. In den meisten Fällen ist es weniger. Ein Teil der abgestrahlten Energie verschwindet als Pfadverlust im Gehäuse des Gerätes. In der Regel gibt es ein Anpassungsnetzwerk zwischen dem Funkmodul und der Antenne. Auch in der Zuleitung zur Antenne und im Anpassungsnetzwerk geht Energie verloren. Bei einer Rückflussdämpfung von -6 dB oder einem VSWR von 3 verlieren Sie 50 % der Leistung (3 dB). Der Rest, der übrig bleibt, wird nicht immer von der Antenne abgestrahlt. Ein Teil kann als thermische Energie in der Antenne oder im Gehäuse verbleiben. Um diese Verluste zu erkennen, muss das Antennenstrahlungsdiagramm in mindestens drei Achsen gemessen werden.

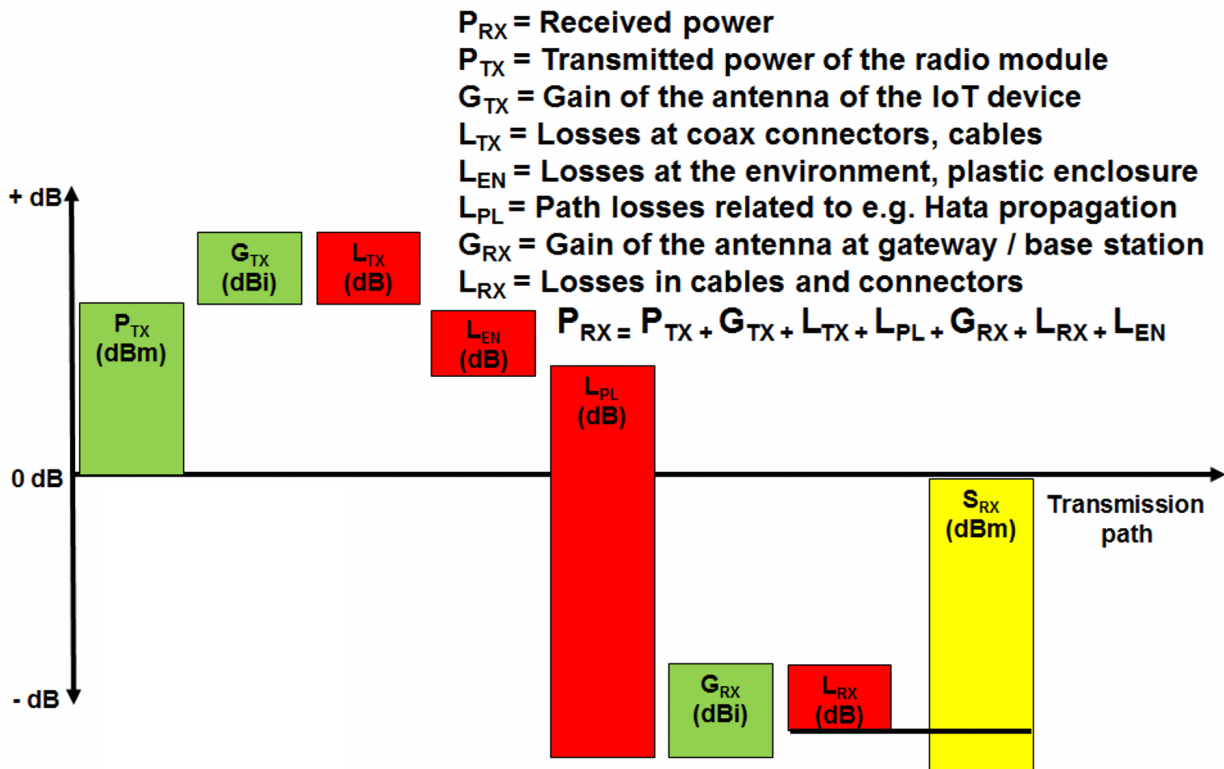


Abbildung 4 Kalkulation des Linkbudget, Quelle Harald Naumann, LPWAN Cookbook

Die Energie, die dann in den freien Raum gelangt, wird über die Entfernung gedämpft. Die Freiraumdämpfung ist nur die halbe Wahrheit, denn die Beschaffenheit des Geländes dämpft ebenfalls die Funkwelle. Eine ebene Wasseroberfläche hat eine geringere Dämpfung als Ackerland. Wenn Büsche, Bäume und Gebäude hinzukommen, wird es schlimmer. Die Topographie beeinflusst ebenfalls den Pfadverlust. Am Ende des langen Pfades trifft die Radiowelle auf eine Gebäudewand. Eine Zementmauer dämpft eine 900-MHz-Welle um etwa 20 dB, eine andere Wand im Gebäude schnell um weitere 8 dB. Verluste durch Fading treten nur im Bereich nahe der Antenne auf und werden mit 8 dB berechnet. Es muss somit mit einem Verlust von 28 dB plus Freiraumdämpfung gerechnet

werden. 1968 untersuchte Okumura³ intensiv die Dämpfung von Funkwellen in Städten und entwickelte ein theoretisches Modell. Dieses Modell nach Okumura-Hata⁴ läuft oft im Hintergrund von Simulationssoftware für Wellenausbreitung. Die Software passt die Dämpfung an die Topographie und die Beschaffenheit der Erdoberfläche an. Alle Wälder werden mit einer einheitlichen Baumhöhe in die Berechnung einbezogen. Wenn Sie eine genauere Annäherung wünschen, können Sie die Höhe der Bäume ändern. Gebäude und ihre Dämpfung werden ebenfalls mit allgemeinen Werten eingesetzt. Dasselbe gilt für Wasserflächen, bewirtschaftete Felder und Wiesen. Bei Bedarf kann sogar die Brechung der Radiowelle an der Spitze eines Berges oder Hügels einbezogen werden. Die komplexen Brechungen, die durch Dächer oder die Reflexion an Wänden hervorgerufen werden, können mit einfacher Simulationssoftware nicht berechnet werden. Dazu benötigt man 3D-Modelle der Gebäude in den Städten und teure Simulationssoftware. Die einfache Software ist in der Regel ausreichend für die Planung von privaten LPWANs. Die durch Refraktion an Dächern und Reflexion an Hauswänden verursachte Dämpfung kann von jedermann in Form eines statischen Wertes in den Pfadverlust einbezogen werden. Die Summe der Verluste sind im gleichen Gelände bzw. der gleichen Stadt für NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox identisch, weil diese drei Technologien den Frequenzbereich von ca. 900 MHz benutzen.

6.3 Maximales Linkbudget der LPWAN Technologien

Bei den meisten LPWAN-Technologien im lizenzfreien Band ist das Linkbudget⁵ im Upload und Download unsymmetrisch. Um eine Meldung vom Knoten zur Basisstation/Gateway und umgekehrt mit einer Quittung zu übertragen, muss das Linkbudget symmetrisch sein oder man muss in der Betrachtung den schlechteren der beiden Werte einsetzen. Wenn man dies nicht beachtet, kann eine Meldung bei einem unsymmetrischen Linkbudget nicht quittiert werden.

Zu der maximal erlaubten Sendeleistung am Knoten sind Antennen mit einem Antennengewinn von 2,15 dBi am Knoten erlaubt. Im unlicenzierten Band ergibt das eine Leistung von 14 dBm plus 2,15 dBi Antennengewinn eine abgestrahlte Leistung von 16,15 dBi. In den nachfolgenden Betrachtungen werden die 2,15 dBi auf 2 dBi abgerundet. Verluste im Gehäuse des Gerätes setzen wir auf 0 dB. Am Gateway sind im unlicenzierte Band bei LoRaWAN und Sigfox 27 dBm Sendeleistung erlaubt. Auch hier kommen die 2,15 dBi hinzu, die wir abrunden. Auf der Seite des Gateways sind Antennen mit 5,15-7,15 dBi Antennengewinn nicht ungewöhnlich. Je höher der Antennengewinn ist, desto kleiner wird aber der Öffnungswinkel. Wird durch zu hohen Antennengewinn der Winkel zu klein, dann kann man unterhalb der Antenne des Gateways keine Signale empfangen. Wir setzen daher in unseren Betrachtungen einen Antennengewinn von 5 dBi ein. Dieser Antennengewinn ist dann 3 dB höher als erlaubt. Um das auszugleichen, muss man die maximal erlaubte Sen-

³ Okumura, Y.; Ohmori, E.; Kawano, T.; Fukuda, K.: Feldstärke und ihre Variabilität im VHF- und UHF-Landmobilfunkdienst. Rezension des Labors für elektrische Kommunikation, 1968, H. 9-10, S. 825-873.

⁴ Vgl. Wikipedia Autoren: Hata model, in: Wikipedia.org, [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Hata_model [06.02.2021].

⁵ Vgl. Wikipedia Autoren: Link budget, in: Wikipedia.org, [online] https://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget [06.02.2021].

deleistung am Gateway um 3 dB erniedrigen, damit am Ende 29 dBi abgestrahlte Leistung entstehen.

Ein NB-IoT ist die übliche Sendeleistung 23 dBm und wird durch die 2 dBi Antennengewinn zu 25 dBm abgestrahlte Leistung. Bei zellularen Basisstationen sind Sektor Antennen mit bis zu 11 dBi Antennengewinn üblich. Im lizenzierten Band gibt es erst einmal keine Begrenzung der Sendeleistung an der Basisstation und am Funkknoten. GSM-Module senden mit 33 dBm und bei NB-IoT wurde die Sendeleistung auf 23 dBm reduziert, um den Energieverbrauch zu reduzieren. In den nachfolgenden Betrachtungen gehen wir auf die Verluste in den Antennenkabeln vom Gateway so Gateway Antenne nicht ein und setzen diese auf 0 dB.

6.3.1 Maximales Linkbudget Sigfox

Da Sigfox eine proprietäre Funktechnik ist, ist die Empfindlichkeit des Gateways nicht leicht einsehbar. Hinzu kommt, dass die Antennen am Gateway ebenfalls nicht dokumentiert sind. Laut einem Video⁶ von Sigfox ist die Empfindlichkeit am Gateway -142 dBm. Wenn man die 14 dBm Sendeleistung mit dem zwei dBi Antennengewinn am Funkknoten, den 5 dBi Antennengewinn am Gateway und die -147 dBm Empfindlichkeit am Sigfox-Gateway addiert, dann erhält man ein Linkbudget von 163 dB im Upload.

Das Linkbudget im Download lässt sich leicht ermitteln. 27 dBm Sendeleistung am Gateway addiert mit zwei dBi Antennengewinn am Gateway +2 weitere dBi Antennengewinn am Knoten und -127 dBm Empfindlichkeit laut Datenblatt des Funkmoduls ergeben ein maximales Linkbudget im Download von 158 dB. Im Download ist das Budget daher 5 dB schlechter als im Upload.

Ultra Narrow Band brings Long-Range

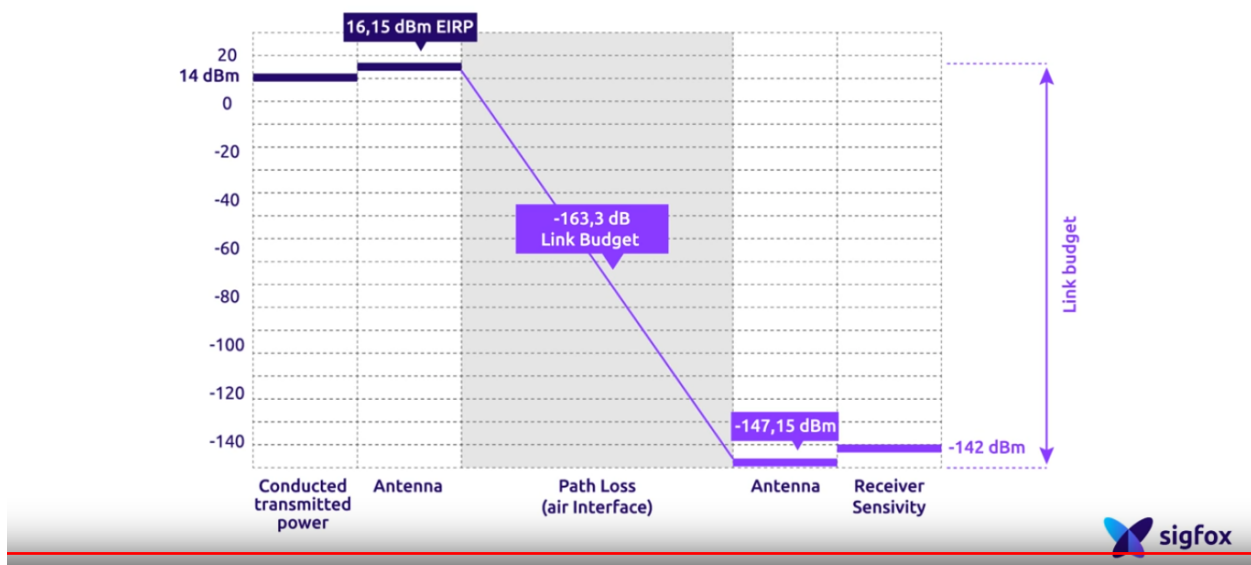


Abbildung 5 Sigfox UL Sensitivity -142 dBm, Linkbudget 163 dB

⁶ Vgl. Sigfox: YouTube, in: Radio Access Network, 08.02.2017, [online] <https://www.youtube.com/watch?v=gGvM6KEDIdE> [06.02.2021].

6.3.2 Maximales Linkbudget LoRaWAN

In einigen Ausarbeitungen zur Berechnung des Linkbudget von LoRaWAN werden -137 dBm Empfindlichkeit am Gateway benutzt. Die -137 dBm kann man nur der Laborbedingungen einer Messkammer erreichen. Laut dem Hersteller Semtech können die LoRa-IC in Europa bei 125 KHz Bandbreite und Spreading-Faktor 12 noch bei 20 dB unter dem Rauschpegel empfangen. Laut einer Studie⁷ der Universität in Dänemark ist das Rauschen in den Städten zwischen -85 dBm und -105 dBm.

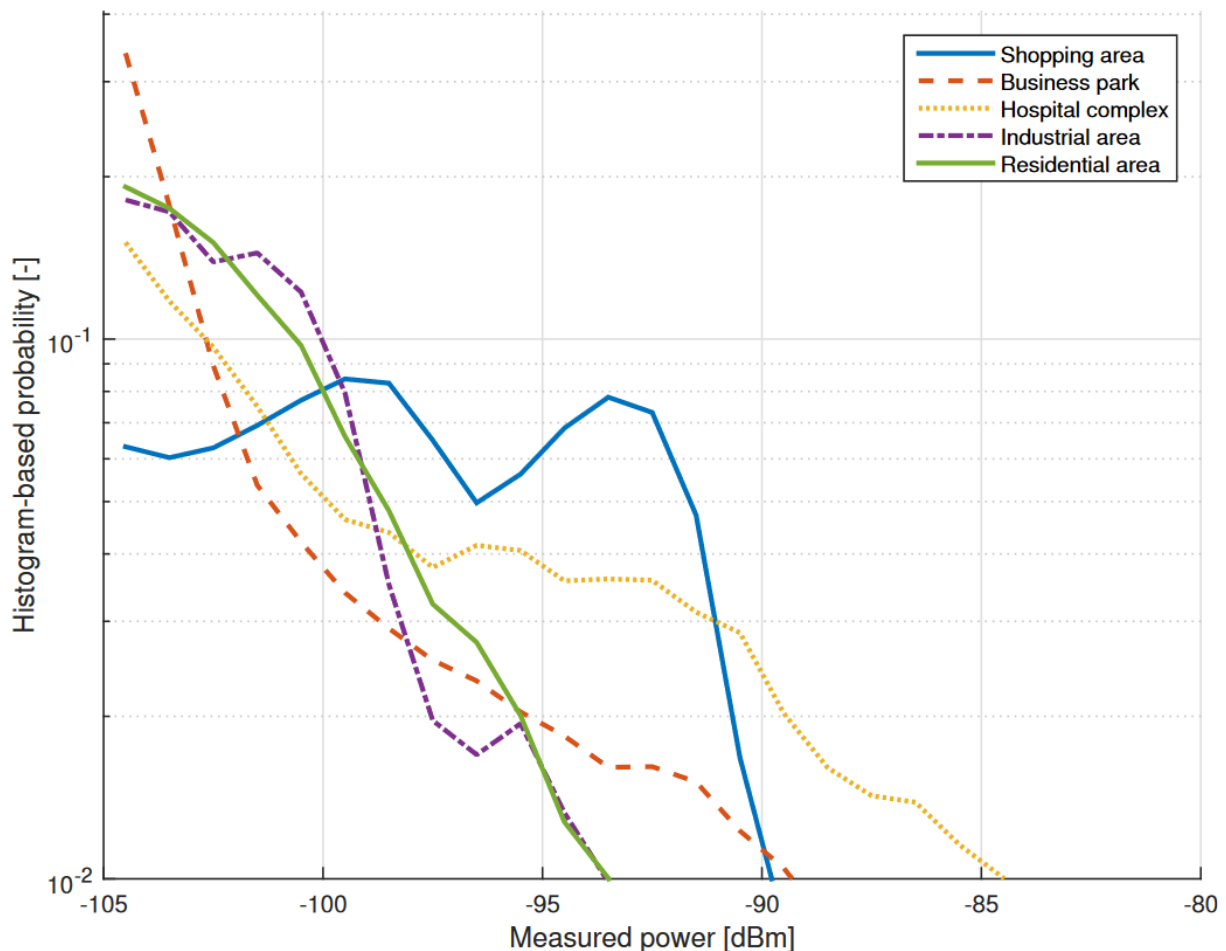


Abbildung 6 Interference Measurements in the European 868 MHz ISM Band with Focus on LoRa and Sigfox,

Das bedeutet, dass die reale Empfindlichkeit des Gateways bei -120 bis -125 dBm zu finden ist. Wenn man in das Userforum von TTN schaut und sich die Testreihe im nachfolgenden Kapitel näher betrachtet und genauer diverse Testreihen im Internet analysiert, dann stellt man fest das -120 dBm bis -125 dBm ein Wert ist, der immer wieder auftaucht. In unseren Betrachtungen setzen wir nicht den schlechtesten Wert von -85 dBm ein, sondern benutzen -100 dBm Rauschpegel zur Berechnung der Empfindlichkeit. Wer ein eige-

⁷ Lauridsen, Mads: Interference measurements in the European 868 MHz ISM band with focus on LoRa and SigFox, in: Aalborg University's Research Portal, 19.03.2017, [online] <http://vbn.aau.dk/en/publications/interference-measurements-in-the-european-868-mhz-ism-band-with-f> [23.01.2021].

nes LPWAN mit LoRaWAN plant, sollte vorab in Industrieanlagen den örtlichen spezifischen Rauschpegel ermitteln.

14 dBm Sendeleistung am Knoten addiert mit 2 dBi Antennengewinn am Funkknoten plus weitere 5 dBi Antennengewinn am Gateway und -120 dBm Empfindlichkeit ergeben ein Linkbudget von 141 dB im Upload. Wenn wir optimistisch sind und mit 5 dB weniger Rauschen kalkulieren, dann kommen wir auf 146 dB Linkbudget im Upload.

27 dBm Sendeleistung am Gateway +2 dBi Antennengewinn am Gateway +2 dBi Antennengewinn am Knoten plus -120 dBm Empfindlichkeit am Knoten ergibt ein Linkbudget von 151 dB im Download. Wir kalkulieren optimistisch und setzen 146 dB Linkbudget ein. Diese 146 dB Linkbudget im sind aber weit entfernt von den idealen Werten in einer Messkammer mit 158 dB. Extrem idealisierte Reports kalkulieren mit Antennen am Gateway mit unrealistisch hohem Antennengewinn, um das Linkbudget höher als 158 dB auszuweisen.

6.3.3 Maximales Linkbudget NB-IoT

Das maximale Linkbudget ist bei NB-IoT im Upload und Download symmetrisch beträgt 164 dB. Das maximale Budget ist aber nicht erstrebenswert, weil bei 164 dB Linkbudget der Energieverbrauch ca. zehnmal höher ist als bei 154 dB. NB-IoT Netze werden oft auf 154 dB oder sogar 144 dB Linkbudget geplant. Wir werden uns bei unseren Messungen auf 144 und 154 dB Linkbudget begrenzen. Die 164 dB sind unter realen Bedingungen nur schwer zu erreichen. Bei Asymmetrie des Linkbudgets wird die Verbindung in der Nähe 164 dB leicht abbrechen.

Mit dem online Tool kann man sich das Linkbudget bei NB-IoT⁸ selber kalkulieren.

<https://5g-tools.com/nb-iot-link-budget-calculator/>

NB-IOT LINK BUDGET CALCULATOR

Link Budget, dBm: **-135.37**

Radio Channel Status: **Pass**

Reception sensitivity, dBm: **-136.29**

INPUT DATA

Cell Radius, m

d(2d): Distance between Tx and Rx

3000

Centre frequency for Tx, MHz

(Support 0.5–100 GHz)

890

Direction of Link

DL (downlink)

UL (uplink)

UL tone mode

Single-tone: 3.75 kHz

Abbildung 7 NB-IoT Link budget calculator

⁸ Vgl. Vinogradov, Oleg: NB-IoT Link budget calculator | 5G-Tools.com, in: 5G Tools for RF Wireless, 13.09.2020, [online] <https://5g-tools.com/nb-iot-link-budget-calculator/> [06.02.2021].

Wenn man die Bandbreite von 15 KHz pro Kanal bei NB-IoT auf 3,75 kHz umschaltet, dann sieht man, dass sich die Empfindlichkeit um 6 dB ändert. Die Empfindlichkeit eines Empfängers jeglicher Funktechnik wird von der Bandbreite beeinflusst. Je größer die Frequenzbandbreite ist, desto mehr thermisches Rauschen wird empfangen. Deshalb wird unterhalb 154 dB Linkbudget die Empfindlichkeit bei NB-IoT durch eine Änderung der Bandbreite verbessert. Je geringer die Bandbreite ist, desto geringer ist auch die Übertragungsrate. Das gilt nicht nur für NB-IoT, sondern für alle Funktechniken. Damit Sigfox die extrem hohe Empfindlichkeit von -142 dBm erreicht, wird dort eine Bandbreite von nur 100 Hz benutzt.

6.4 Maximales Payload im Upload und Download der LPWAN Technologien

6.4.1 Maximales Payload im UL und DL bei Sigfox

Das maximale Payload ist bei Sigfox im Upload auf 12 Byte begrenzt. Im Download ist Sigfox auf 8 Byte begrenzt.

6.4.2 Maximales Payload im UL und DL bei LoRaWAN

Das maximale Payload im Upload und Download ist bei LoRaWAN für Europa und USA ungleich. In Europa ist das maximale Payload nur durch die physikalische Größe von 255 Byte des LoRa-IC begrenzt. Der Header im LoRaWAN-Protokoll hat 13 Byte. Dadurch ist die theoretische Nutzlast für ein Telegramm auf 242 Byte begrenzt. Wenn man aber beim Spreading-Faktor 12 255 Byte versendet, dann ist der Kanal für fast 14 Sekunden belegt. Ein weiteres Telegramm kann dann auf diesem Kanal für 14 Sekunden nicht empfangen werden. Da LoRaWAN das un- und unsynchronisierte Aloha-Verfahren benutzt führt lange Kanalbelegung zu einem extrem hohen Paketverlust. Das LoRaWAN-Protokoll nutzt bei SF11 und SF12 in Europa nur 51 Byte maximale Nutzlast.

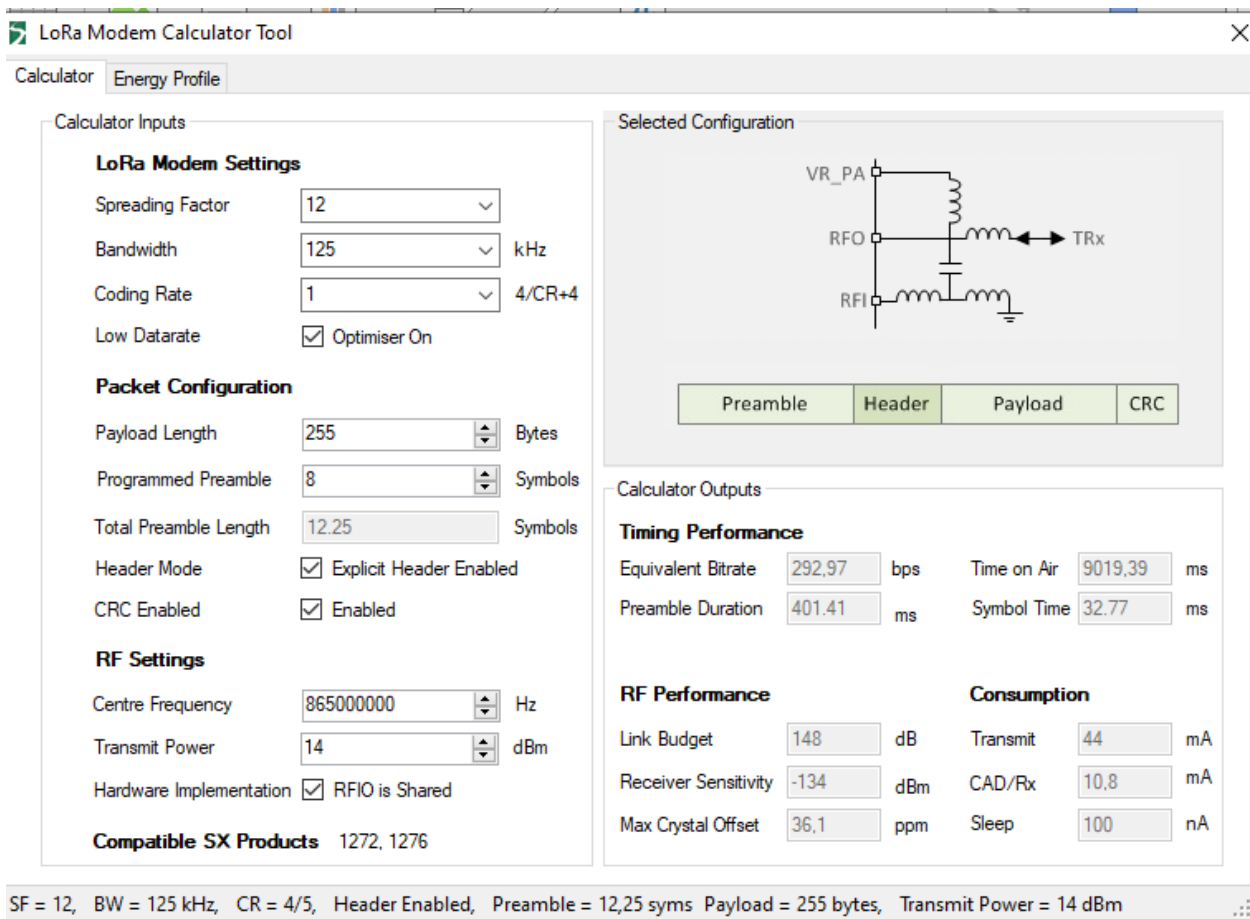


Abbildung 8 LoRa Modem Calculator, SF12 in EU, 255 Bytes, Time on air 9019 ms

Plant man aber ein globales IoT-Produkt, dann muss man die Randbedingungen für LoRa-WAN in USA berücksichtigen. In USA darf man im Upload oder Download den Kanal nur 400 ms belegen. Nimmt man dann den LoRa-Kalkulator zur Hand, dann stellt man fest, dass man maximal den Spreading-Faktor 10 benutzen kann und obendrein das Payload auf 11 Byte begrenzt ist. Die Änderung von Spreading-Faktor 12 auf 10 führt dazu, dass die Empfindlichkeit um 6 dB sinkt. Das wiederum kann man mit einer Erhöhung der Sendeleistung um 6 dB ausgleichen. Die typische maximale Leistung eines LoRa-Moduls liegt bei 20 dBm, welche man ohne einen Verstärker erreichen kann. Wird ein Transistor zur Verstärkung eingesetzt, dann werden diese LoRaWAN-Module automatisch teurer.

Wenn man ein globales Produkt auf LoRaWAN entwickeln möchte, dann muss man sich auf 11 Byte Payload begrenzen.

6.4.3 Maximales Payload im UL und DL bei NB-IoT

Bei NB-IoT ist das maximale Payload im Upload und Download unsymmetrisch. Des Weiteren wird das Payload in der öffentlichen Literatur meistens in Bit angegeben. Hinzu kommt, dass das Payload bei NB-IoT NB1 und NB-IoT NB2 ungleich groß ist. NB2 bringt eine Verbesserung durch das größere maximale Payload. Größere Datenmengen müssen dann nicht mehr in viele kleine Pakete zerlegt werden.

3GPP barrier	NB-IoT NB1	NB-IoT NB2
3GPP Release	Release 13	Release 14
Voice	No	Push to talk
SMS	Mainly not	Mainly not
Bandwidth	200 KHz	200 KHz
Bandwidth per channel	15 or 3.75 KHz	15 or 3.75 KHz
Number of channels	12	12
Data	Half duplex	Half duplex
Max. link budget	164 dB	164 dB
Latency	0,5 - 10 Seconds	0,5 - 10 Seconds
Mobility	Up to 100 km/h, Nomadic mobility (reconnection)	Up to 100 km/h, Better mobility (reconnection)
Max uplink data rate	65 kbps	159 kbps
Max uplink TBS	1000 bits, 125 bytes	2536 bits, 317 bytes
Max DL data rate	27 kbps	127 kbps
Max downlink TBS	680 bits, 85 bytes	2536 bits, 317 bytes
Power level	20, 23 dBm	14, 20, 23 dBm
Positioning	Cell-ID	OTDOA, E-CID

Tabelle 2 Vergleich NB-IoT NB1 und NB2

6.5 Maximale Anzahl der Meldungen im UL und DL bei LPWAN

6.5.1 Maximale Anzahl der Meldungen im UL und DL bei Sigfox

Die maximale Anzahl der Meldungen im Upload ist bei Sigfox auf 140 Meldungen pro Tag begrenzt. Diese Begrenzung ist auf dem europäischen Duty-Cycle von 1 % begründet. Sigfox wiederholt ein Telegramm bei jeder Aussendung zweimal. Jedes Telegramm belegt den Kanal ca. 2 Sekunden. In Summe ergibt das dann ca. 6 Sekunden pro Meldung. 1 % von 1 Stunde gleich 3600 Sekunden ergeben 36 Sekunden. 36 Sekunden/6 Sekunden ergibt 6 Telegramme pro Stunde. 6 × 24 ergibt 144. Ein Sigfox-Gerät ist durch die europäischen Regulierungen mit dem 1 % Duty-Cycle auf 144 Meldungen pro Tag begrenzt. Sigfox selber hat sich dann eine Grenze auf 140 Meldungen pro Tag gesetzt. Wenn man die 6 Nachrichten pro Stunde genauer betrachtet, stellt man fest, dass man im Mittelwert nur alle 10 Minuten senden darf. Für eine Verfolgung von bewegten Objekten ist ein Rhythmus von 10 Minuten denkbar ungeeignet. Man darf die sechs Nachrichten pro Stunde in einem kürzeren Abstand senden, muss aber dann entsprechend lange den Sendebetrieb einstellen.

Im Download ist man bei Sigfox auf vier Meldungen pro Tag begrenzt. Hinzu kommt, dass im Download nur 8 Byte möglich sind. Diese extreme Begrenzung ist im unlizenziierten Frequenzband notwendig, weil eine Sigfox Gateway auf 10 % Duty-Cycle pro Stunde begrenzt ist. Diese 360 Sekunden müssen ausreichen, um alle Teilnehmer eines Gateways mit Quittungen zu versorgen. Im Download gibt es keine Absicherung der Telegramme durch Wiederholung. Es wird mit 600 Bit/s gesendet. 8 Byte + 12 Byte Header ergeben 20 Byte Brutto bzw. 160 Bit. 160 Bit / 600 Bit pro Sekunde ergibt eine Kanalbelegungszeit von 267 Millisekunden. 360 Sekunden / 267 ms ergibt maximal 1350 Download pro Gateway und Stunde bzw. 1350×24 Stunden gleich 32.400 Downloads pro Tag. Das Sigfox-Protokoll ist ungeeignet eine größere Anzahl von Teilnehmern im Download zu bedienen.

6.5.2 Maximale Anzahl der Meldungen UL und DL bei LoRaWAN

Auf den ersten Blick gibt es bei LoRaWAN keine Begrenzung der Anzahl der Meldungen im Upload oder im Download. Auf den zweiten Blick erkennt man 1 % Duty-Cycle im Upload und 10 % Duty-Cycle im Download. Wenn man sich auf ca. 12 Byte Nutzlast begrenzt und Spreading-Faktor 12 benutzt, dann belegt ein Telegramm die Kanal 1,483 Sekunden. Wenn man Paketverluste durch Kollision oder Störung auf dem Funkkanal ähnlich Sigfox mit hinzu nimmt, dann belegt man den Kanal 4,45 Sekunden und kann dadurch nur 8 Meldungen pro Stunde übertragen.

The screenshot shows the 'LoRa Modem Calculator Tool' interface. It is divided into several sections:

- Calculator Inputs:**
 - LoRa Modem Settings:** Spreading Factor: 12, Bandwidth: 125 kHz, Coding Rate: 1 (4/CR+4), Low Datarate: Optimiser On (checked).
 - Packet Configuration:** Payload Length: 25 Bytes, Programmed Preamble: 8 Symbols, Total Preamble Length: 12.25 Symbols, Header Mode: Explicit Header Enabled (checked), CRC Enabled: Enabled (checked).
 - RF Settings:** Centre Frequency: 865000000 Hz, Transmit Power: 14 dBm, Hardware Implementation: RFIO is Shared (checked).
 - Compatible SX Products:** 1272, 1276
- Selected Configuration:** A block diagram of an RF circuit with labels VR_PA, RFO, RFI, and TRx. Below it, a bar chart shows the packet structure: Preamble, Header, Payload, and CRC.
- Calculator Outputs:**
 - Timing Performance:** Equivalent Bitrate: 292.97 bps, Time on Air: 1482.75 ms, Preamble Duration: 401.41 ms, Symbol Time: 32.77 ms.
 - RF Performance:** Link Budget: 148 dB, Receiver Sensitivity: -134 dBm, Max Crystal Offset: 36.1 ppm.
 - Consumption:** Transmit: 44 mA, CAD/Rx: 10.8 mA, Sleep: 100 nA.

At the bottom, a summary line reads: SF = 12, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Enabled, Preamble = 12,25 syms Payload = 25 bytes, Transmit Power = 14 dBm

Abbildung 9 LoRa Modem Calculator, SF12 in EU, 25 Bytes (12 Bytes net), Time on air 1483 ms

Im Download ist man durch die 10 % Duty-Cycle auf 360 Sekunden Sendezeit am Gateway begrenzt. Bei einem Spreading-Faktor 7 wird der Kanal nur wenige Millisekunden be-

legt. Bei Spreading-Faktor 12 mit 12 Byte Nutzlast 1,483 Sekunden. Im Mittelwert ist der Kanal daher für eine Quittung 0,74 Sekunden belegt. Wenn man die 360 Sekunden maximaler Sendezeit 0,74 Sekunde pro Telegramm dividiert dann erhält man maximal 486 Quittungen pro Stunde. Bei 1000 oder gar 5000 Teilnehmern pro Gateway versorgt ist ein realer Quittungsbetrieb unmöglich.

6.5.3 Maximale Anzahl der Meldungen UL und DL bei NB-IoT

Bei NB-IoT gibt es kein Duty-Cycle und daher keine Zeitbegrenzung. Ein Block bei LTE mit 200 KHz Bandbreite gibt uns zwölf Kanäle für NB-IoT. Die Übertragungsgeschwindigkeit ist maximal bei 21.000 Bit/s und extremen Linkbudget von 164 dB nur noch bei 300 Bit/s. In unserem Vergleich begrenzen wir das Linkbudget auf 154 dB und erhalten dadurch eine untere Geschwindigkeit von ca. 6000 Bit/s. 6000 Bit/s ist aber viel schneller als 100 Bit/s mit Sigfox oder 297 Bit/s mit LoRaWAN. Die Kapazität eines Blockes bei NB-IoT ist nicht unendlich, jedoch um ein Vielfaches größer als im unlicenzierten Band. NB-IoT wird meistens durch den Netzbetreiber begrenzt. Mit einer NB-IoT-SIM-Karte bekommt man nicht beliebig Datenvolumen pro Tag.

6.5.4 Auswahl der Module für den Test

6.5.5 Auswahl Sigfox Module

Bei der Auswahl Sigfox-Modul fiel auf, dass auf der Webseite von Sigfox am 1.9.2020 kein Funkmodul mit einer Funkzertifizierung in allen Regionen gab. Es gab Funkmodule, welche die Frequenzen in den unterschiedlichen Regionen unterstützen aber diesen Modulen fehlte am Ende die Zertifizierung. Ein IoT-Gerät auf einem Sigfox-Modul mit Vorzertifizierung in den benannten Sigfox-Territorien ist nicht möglich. Das führt dazu, dass in den vielen Regionen eventuell auf Chiplevel geprüft wird und die Kosten für die Zertifizierung extrem hoch werden. Hinzu kommt, dass bei einem Fehler in der Konzeption des Moduls keine Änderung erfolgen kann und die Zertifizierung nicht erteilt werden kann. Wir haben uns daher für den Vergleich für Produkte von Wisol (Seong Ji) entschieden, weil man dort Funkmodule beziehen kann, welche eine vor Zertifizierung in den notwendigen Regionen haben und diese Module einen niedrigen Preis haben.

6.5.6 Auswahl LoRaWAN Module

Nach Rücksprache mit Semtech vor dem Projektstart am 01.09.2020 gibt es auf dem neuen LoRaWAN Chipsatz noch kein Funkmodul. Funkmodule mit einer Zertifizierung in allen Frequenzbereichen für LoRaWAN waren ebenfalls nicht auffindbar. Wir haben uns daher für Funkmodule von ACSIP entschieden, weil es dort Funkmodule gibt welche man pin-kompatibel für unterschiedliche Regionen beziehen kann.

6.5.7 Auswahl NB-IoT Module

Bei den Funkmodul für NB-IoT haben wir uns für Funkmodule von Quectel entschieden, weil der Hersteller das größte Spektrum an Funkmodulen und unterschiedlichen Herstellern von Chipsätzen liefern kann. Des Weiteren erhalten wir von Quectel direkten Support.

7. Linkbudget und Energieverbrauch

7.1 Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei SIG-FOX

Da das Funkprotokoll von Sigfox komplett statisch ist, kann man den Energieverbrauch leicht ermitteln. Ein Sigfox-Modul in Europa sendet jede Meldung dreimal auf drei unterschiedlichen Funkkanälen mit jeweils ca. 2 Sekunden pro Meldung. Daraus ergeben sich dann 6 Sekunden Sendezeit für 12 Byte Nutzlast. Da ein Sigfox-Modul nicht prüft, ob überhaupt ein Gateway in der Nähe ist, muss man mit AT Befehlen nur die 12 Byte übertragen, senden und den Strom messen. Das uns ausgewählte Sigfox-Modul kann mit 2,4 V betrieben werden. Zwei alkalinen AA Zellen mit 1,2 V Nennspannung reichen aus das Funkmodul zu betreiben.

7.2 Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei LoRaWAN

Das Protokoll von LoRaWAN EU ist ungleich zum Protokoll LoRaWAN-Netz US. Wir begrenzen unsere Messungen auf das europäische LoRaWAN mit 14 dBm Sendeleistung und Spreading-Faktor 12. Wir benutzen bei den Messungen keine Verbindung zum LoRaWAN-Gateway, sondern betreiben das LoRa-Modul im Peer to Peer Mode. Wir emulieren die Nutzlast von 12 Byte und 13 bei Header, indem wir 25 Byte versenden und dabei die bekannten Parameter des Protokolls einstellen. Bei Spreading-Faktor 11 und 12 muss das Low-Data-Bit gesetzt werden.

LoRaWAN-Payload, Spreizfaktor (SF) und Paketgröße in Europa:

- 51 Bytes für die langsamsten Datenraten, SF10, SF11 und SF12 auf 125 KHz
- 115 Bytes für SF9 auf 125 KHz
- 222 Bytes für schnellere Raten, SF7 und SF8 auf 125 KHz

TTN⁹ in den Niederlanden betreibt eine kostenfreies LoRaWAN mit einen extremen Begrenzung von 30 Sekunden Uplink pro Tag und 10 Quittungen bzw. Downlink pro Tag. In USA ist die maximale Paketgröße bei Spreading-Faktor zehn auf 11 Byte¹⁰ Nutzlast begrenzt. In USA darf man den Funkkanal nur nicht mehr als 400 ms belegen. Mit 12 Byte Nutzlast wären diese 400 ms überschritten.

⁹ Vgl. van Boven, Arjan: Limitations: data rate, packet size, 30 seconds uplink and 10 messages downlink per day Fair Access Policy [guidelines], in: The Things Network, 26.07.2020, [online] <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/limitations-data-rate-packet-size-30-seconds-uplink-and-10-messages-downlink-per-day-fair-access-policy-guidelines/1300> [06.02.2021].

¹⁰ van Bentem, Arjan: Airtime calculator for LoRaWAN, in: Github.io, 06.09.2020, [online] <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868> [23.01.2021].

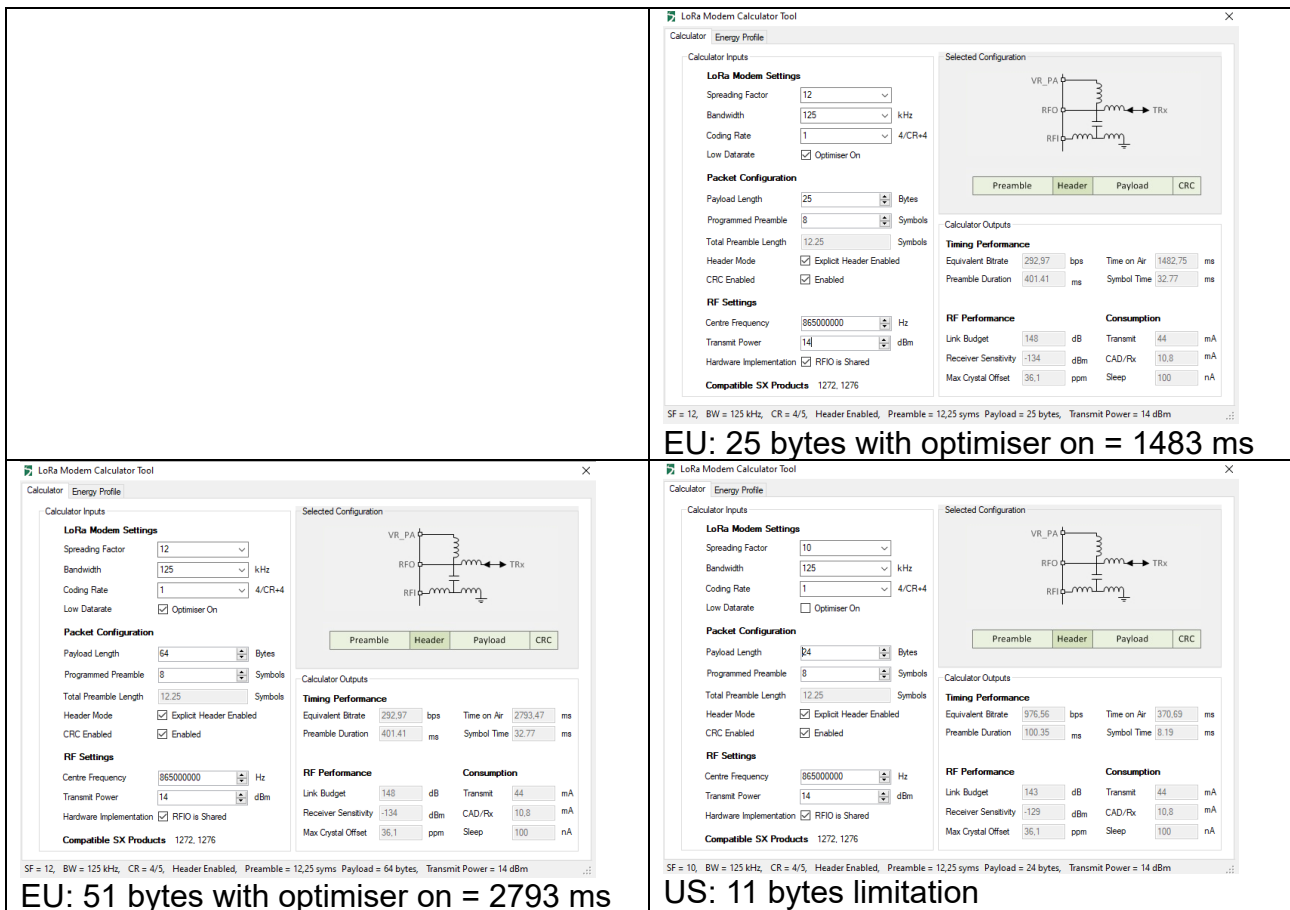


Abbildung 10 LoRa Modem Calculator, Maximum payload LoRaWAN in EU and US, Time

7.3 Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei NB-IoT

Wenn man den Energieverbrauch von NB-IoT statisch im Messlabor ermitteln möchte, dann benötigt man einen recht teuren NB-IoT-Messplatz. Damit unsere Messreihen von jeder Entwickler nachbilden kann, wählen wir einen preiswerten Weg. Wir dämpfen das empfangene Signal an der Antenne mit Dämpfungsgliedern so lange, bis das gewünschte Pfadverlust von 134, 144 und 154 dB erreicht sind. Damit dieser Messaufbau funktioniert, muss das Messobjekt mit den Dämpfungsgliedern in eine abgeschirmte Kiste. Ohne diese Abschirmung würden die Testplatinen über andere Wege ein Signal empfangen und damit die Messung verfälschen. Die ausgewählten NB-IoT-Module besitzen alle AT Kommandos, um RSSI und RSRP auszulesen.

7.4 Ermittlung des maximalen Energieverbrauch bei SMS

Alle erwähnten LPWAN-Technologien benötigen weniger Energie als eine SMS. Deswegen fügen wir der Messreihen eine SMS mit 12 Byte und 140 Byte Nutzlast bei GSM 900 mit 33 dBm Sendeleistung zu.

8. Reichweite bei LPWAN

Reichweiten von LPWAN Technologien werden durch das maximale Linkbudget, die Sendefrequenz, die Höhe der Antenne der Basisstation und die Höhe der Antenne am Sensorknoten bestimmt. Das maximale Budget haben wir in den vorangegangenen Kapiteln er-

mittelt und in der Tabelle unten eingesetzt. Des Weiteren haben wir den absoluten Wert und 20 dB Dämpfung für die erste Wand und 8 dB für Fading reduziert. Mit diesen Parametern für das Nettobudget haben wir die größtmögliche Reichweiten für einen Antennenmast mit 30 m und mit 60 m Höhe mit einem Online-Tool ermittelt. Jeder kann gerne mit einem geringeren Pfadverlust für die erste Wand oder mit anderen Höhen für die Antenne „spielen“. Von den immer wieder zitierten 50 km Reichweite oder mehr ist aber nichts erkennbar.

	Gross link budget (dB)	Net link budget = gross - (20 dB first wall and 8 db Fading) (dB)	Hata properagation calculation, mast 30 m, mobile 1 m, distance (m)	Hata properagation calculation, mast 60 m, mobile 1 m, distance (m)
Max. LB LoRa-WAN EU and NB-IoT CL0	144 dB	116 dB	490 m	600 m
NB-IoT CL1	154 dB	126 dB	900 m	1200 m
Max. LB Sigfox EU UL	158 dB	130 dB	1190 m	1610 m
Max. LB Sigfox EU UL	163 dB	135 dB	1650 m	2300 m
NB-IoT CL2	164 dB	136 dB	1700 m	2400 m

Tabelle 3 Reichweite Indoor NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox berechnet mit Candy Tools¹

Okumura Hata		
Frequency	900	[MHz]
Distance of Antennas	0.9	[km]
Height Base Station	30	[m]
Height mobile Station	1.0	[m]
Area	4	1-open, 2-suburban 3-small_city, 4-city
$L = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(hb) + (-6,55 \lg(hb) + 44,9) * \lg(d) - K$ <p>1: $K = 4,78 * (\lg(f))^2 - 18,33 \lg(f) + 40,94$ 2: $K = 2 * (\lg(f/28))^2 + 5,4$ 3: $K = (1,1 \lg(f) - 0,7) * h_m - (1,56 \lg(f) - 0,8)$ 4: $K = 8,29 * (\lg(1,54 h_m))^2 - 1,1$ (for $f < 300$ MHz) $K = 3,2 * (\lg(11,7554 h_m))^2 - 4,97$ (for $f \geq 300$ MHz)</p>		
Path Loss	126.11206132705193	[dB]

Abbildung 11 Kalkulation der Reichweite mit Okumura-Hata-Model

Das Beispiel zeigt einen 30 m hohen Mast und angenommener Dämpfung in einer Stadt. Es wurden die Werte für NB-IoT CL1 (154 dB Link Budget) mit 20 dB Verlust in der ersten Wand und 8 dB für das Fading benutzt. Also in Summe ein Pfadverlust von 28 dB.

In der Tabelle ist deutlich erkennbar das 10 dB mehr Linkbudget zu einer Verdopplung der Reichweite führen. Aus 600 m 144 dB Linkbudget werden 1200 m Reichweite, wenn auf 154 dB erhöht wird. Bei 164 dB werden bereits 2400 m erreicht. Da LoRaWAN auf 141-46 dB beschränkt ist, ist die Reichweite im Vergleich zu NB-IoT mit 154 dB um 50 % schlechter. Da die Fläche eines Kreises aus $\text{Radius}^2 \times \pi$ berechnet wird, bedeutet dies, dass in

einer Stadt für Indoorabdeckung mit LoRaWAN viermal mehr Antennenstandorte benötigt werden als mit NB-IoT.

9. Reichweite eines privaten LoRaWAN

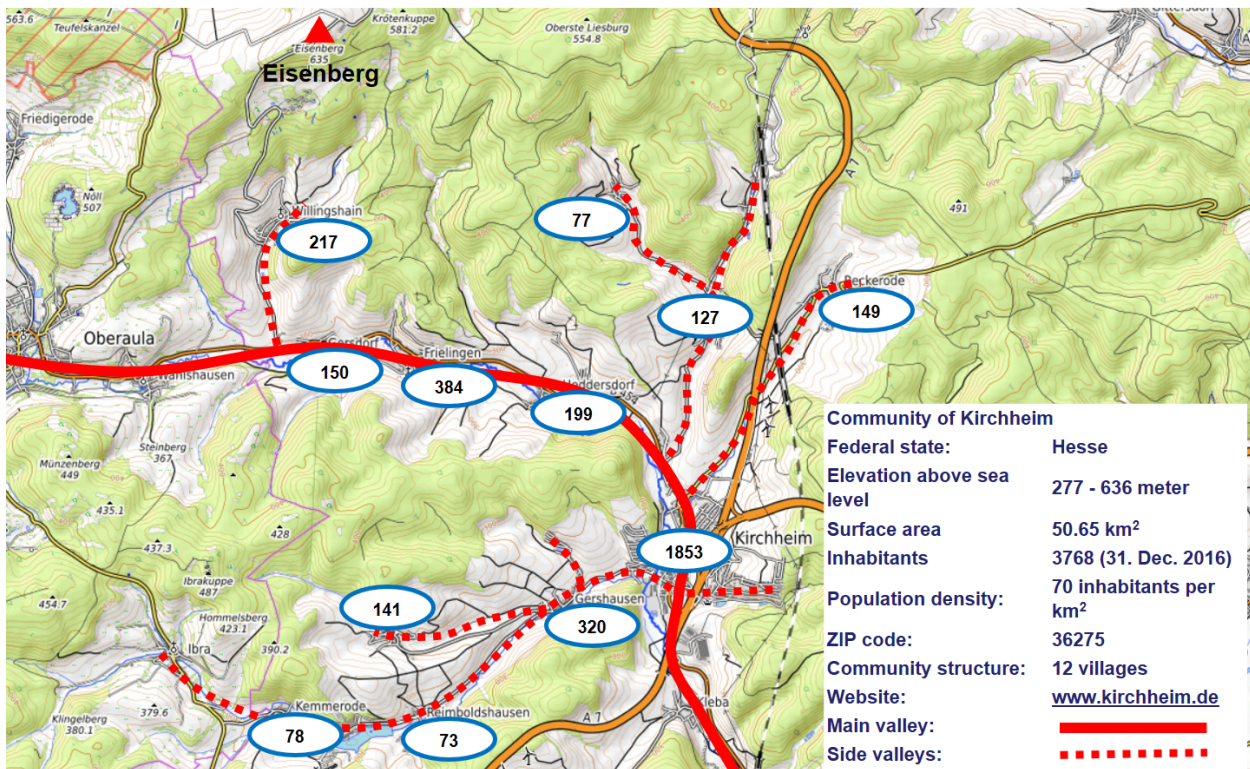


Abbildung 12 Gemeinde Kirchheim mit ihren 12 Dörfern. Einwohner pro Dorf in blauen Kreisen markiert. Quelle LPWAN Cookbook

Um die Aufgabe für ein privates LPWAN¹¹ sichtbar zu machen, wurde das Hauptdorf Kirchheim mit seinen 11 weiteren Ortschaften in der Gemeinde visualisiert. Die blauen umrandeten Ovale stellen Dörfer mit der Anzahl der Einwohner im Jahr 2016 dar. Kirchheim mit 1853 Bewohnern verteilt sich über zwei Täler. Einige der Dörfchen haben weniger als 80 Einwohner und vier befinden sich am Ende eines kleinen Seitentals. Das Haupttal wurde mit einer durchgezogenen roten Linie gekennzeichnet. Die Seitentäler wurden mit gestrichelten roten Linien markiert. Teilweise verzweigen sich diese erneut in weitere kleine Täler und die Ortschaften verteilen sich über zwei Täler.

Das erste LPWAN-Gateway wird am Hang oberhalb von Kirchheim auf dem Dach eines zweistöckigen Wohnhauses installiert. Die mobile Installation erfolgt Testzwecken mit einem tragbaren LPWAN-Gateway. Diese Anordnung gewährleistet, dass wir die gleiche Antennenanlage unterschiedlichen Standorten in der Gemeinde austesten können. Von dem Schornstein des Hauses haben wir einen Blick in das Tal des Flusses Aula mit den Ort. Da sich Kirchheim in ein Seitental verzweigt, werden zwei Gateways nötig.

¹¹ Vgl. Naumann, Harald: LPWAN Cookbook: How to develop LPWAN technology - real products, real networks, 1. Aufl., 2021, [online] <https://www.linkedin.com/pulse/lpwan-cookbook-table-content-harald-naumann/>.

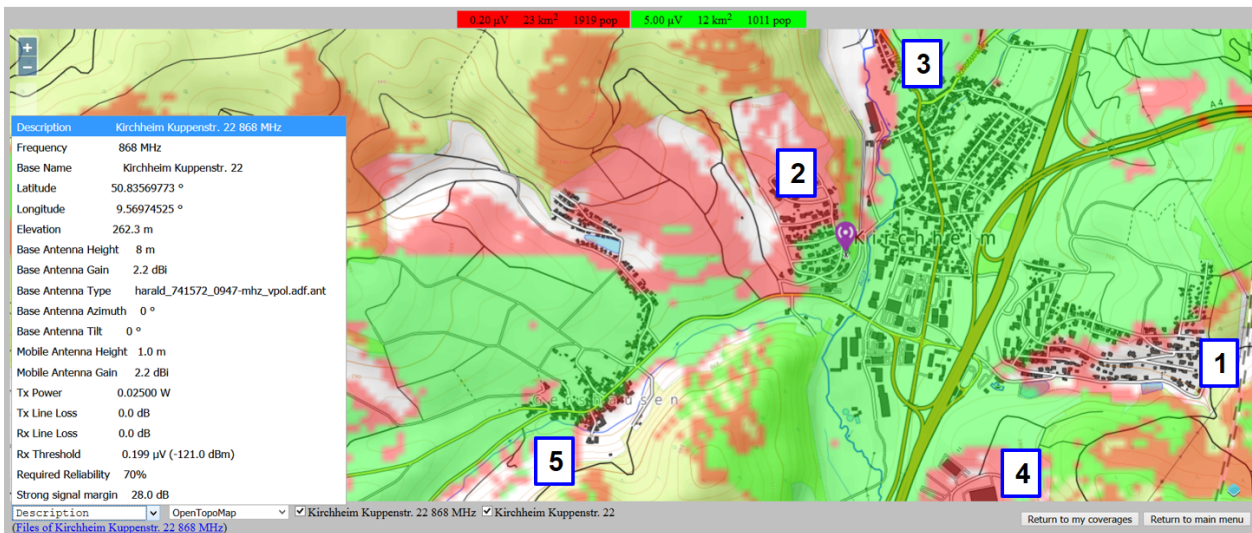


Abbildung 13 Simulation des ersten LPWAN Gateway im Hauptdorf Kirchheim

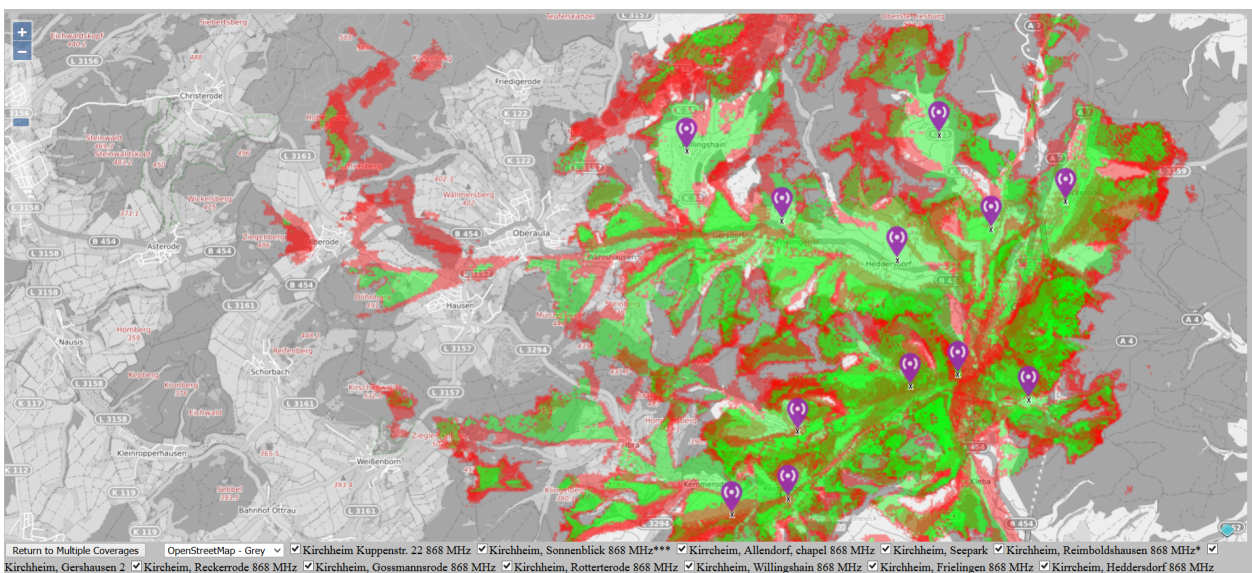


Abbildung 14 Simulierte Netzabdeckung der Gemeinde Kirchheim mit 12 LoRaWAN Gateways

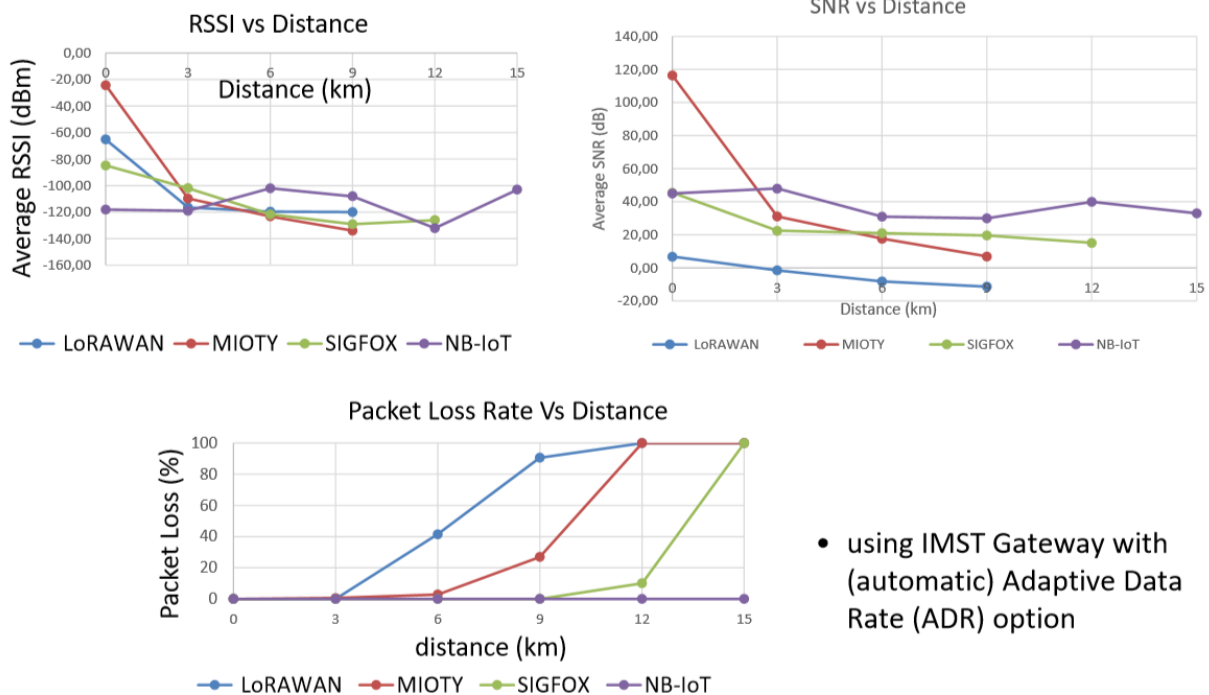
In der Graphik oben zeigen die violetten Marker die zwölf Standorte für die LPWAN-Gateways. Um den Kontrast zu erhöhen, wurde die Karte im Hintergrund mit Grautönen ohne Höhenlinien ausgewählt. Grün markierte Flächen weisen die Regionen für eine Indoorabdeckung. Rot kenntlich gemacht Flächen zeigen Regionen mit einer Abdeckung im Außenbereich. Die Deckkraft des Grünen und der roten Farblayer wurde auf 40 % gesetzt. Wenn sich zwei grüne Flächen oder mehr überdecken, dann entsteht eine Fläche mit einem dunkelgrünen Farbton. Sobald sich eine grüne Fläche oder mehrere Grünflächen oder mehrere rote Flächen und eine grüne Fläche überdecken, entstehen Brauntöne. Wenn sich drei rote Layer mit einem grünen Layer überschneiden, dann wird das Auge eventuell das minimale Braun durch die Mischung der Farben nicht mehr erkennen.

Diese zwölf Dörfer verteilen sich auf ca. 50 km². Wenn wir die 50 km² durch zwölf teilen denn ergibt dies im Mittel ca. 4,2 km² pro LoRaWAN Gateway. $4,12 \text{ km}^2 / \pi$ und daraus die Wurzel ergibt 1,15 km Radius pro Gateway. Wo sind die 50 km oder 150 km Reichweite geblieben?

10. Analyse der Studie der HS Offenburg

Die Folie unten ist aus einer Präsentation der Hochschule Offenburg¹² auf dem Wireless Congress 2019 in München. Diese vier Illustrationen zeigen deutlich, dass NB-IoT LoRaWAN deutlich überlegen ist. Die linke obere Graphik zeigt wie viele andere im Internet, dass LoRaWAN nur bis ca. -120 dBm empfangen kann. Die rechte obere Kurve zeigt SNR versus Entfernung. Man erkennt dort ca. -18 dB bei LoRaWAN bei 9 km und ca. 30 dB SNR bei NB-IoT. Sigfox weist ca. 20 dB SNR auf. Am interessantesten ist aber der dritte Graphik. Bei Entfernung von 9 km und maximalen Pfadverlust wurden 80 % Paketverlust dokumentiert. Selbst bei 6 km ist der Verlust der Pakete immer noch 40 %. Ähnlich hohe Paketverluste findet man bei anderen Reports zu LoRaWAN. Aus diesem Grund nehmen wir bei LoRaWAN in unserer Testreihe zwei Wiederholungen der Telegramme korrespondierend zu Sigfox an.

ch.6.2: field tests – RF coverage & signal quality measurements



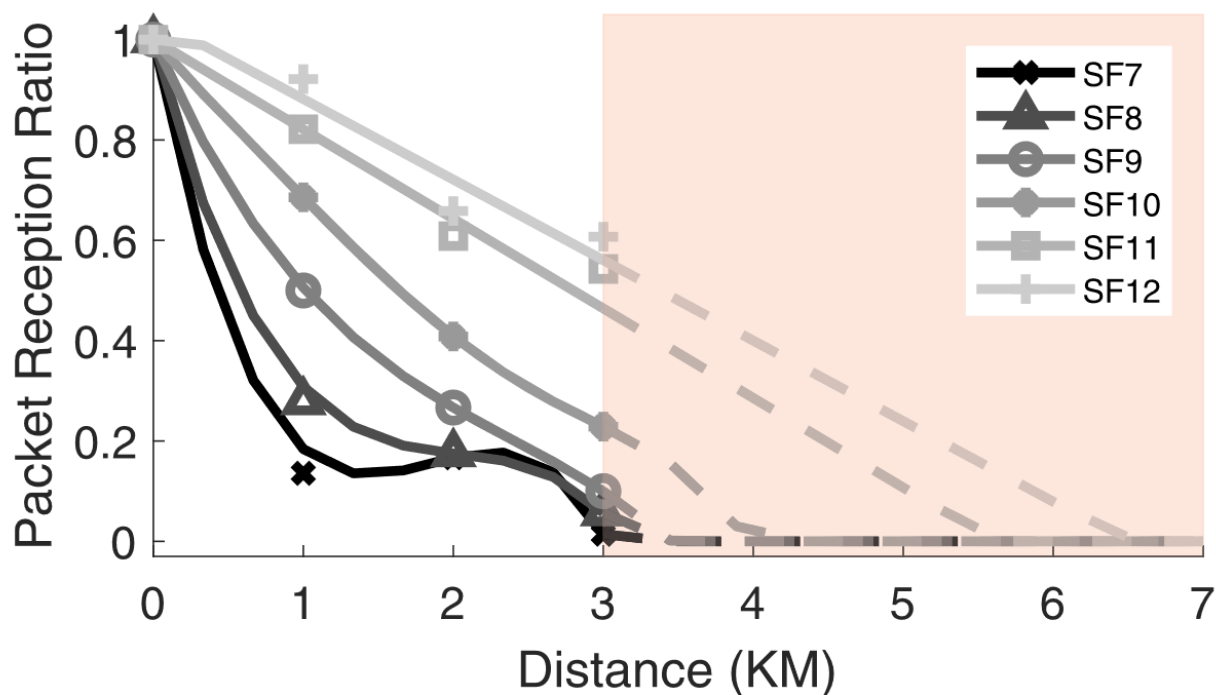
- using IMST Gateway with (automatic) Adaptive Data Rate (ADR) option

Abbildung 15 Vortrag auf dem Wireless Congress 2019 in München, Field tests - RF coverage & signal quality measurements, Folie 36

¹² Vgl. Sikora, Axel: Field tests - RF coverage & signal quality measurements, Folie 36, in: Wireless Congress 2019, 23.10.2019, [online] <https://electronica.de/de/rahmenprogramm/electronica-conferences/wireless-congress/> [30.10.2019].

11. Analyse der Studie der Universität in Singapur

LoRaWAN gleicht den Pfadverlust über die Änderung des Spreizfaktors (SF) aus. In der Studie der Universität in Singapur¹³ erkennt man, dass bei 1 km Entfernung der Paketverlust in Abhängigkeit SF 7-12 zwischen ca. 15 % und 90 % liegt. LoRaWAN kann bei kurzem Abstand Abstand zum Gateway mit SF7 den Spreizfaktor nachregeln. Bei 2 km Entfernung ist eine Regelung ebenfalls noch erkennbar. Der Paketverlust bei SF12 liegt aber bereits bei ca. 25 %. Mehr als SF12 ist bei LoRaWAN nicht möglich. Bei 3 km Entfernung ist bei maximal SF12 der Paketverlust bereits 55 %. SF 7-9 enden bei 3 km in einem extrem hohen Paketverlust. Wenn man nun die Entfernung von 3 km auf 6 km verdoppelt dann endet man in einem Paketverlust von ca. 95 %. Sobald also ein LoRaWAN Modul auf SF12 betrieben werden muss, ist keine weitere Regelungen möglich und größere Entfernung endet automatisch in einem Paketverlust. Jede Wiederholung eines Paketes bedeutet aber auch eine Vervielfachung des Energieverbrauchs. Jede unnötige Wiederholung betrifft aber auch, dass ein Paket mit einem anderen Paket eines anderen Knoten kollidieren kann. Ständig unnötig wiederholte Pakete führt aber auch dazu das andere Teilnehmer im lizenzfreien Band durch Paket eines LoRaWAN-Netz gestört bzw. blockiert werden.



(b) Non-Line-of-Sight.

Abbildung 16 15 % bis 95 % Paketverlust bei LoRaWAN mit SF 12

¹³ Vgl. LIANDO, JANSEN C./Amalinda Gamage/Agustinus W. Tengourtius/Mo Li: Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large-scale Measurement Study, in: Github, 01.02.2019, [online] https://jansenc.github.io/publication/2019-02-01_TOSN-2019 [06.02.2021].

12. Tests der Reichweite von LoRaWAN in Gleiberg

Der Test der Reichweite LoRaWAN und in Gleiberg in Hessen statt. Gleiberg liegt ein Mittelgebirge und ist von Bergen umringt. In den beiden Graphiken unten wird gezeigt, dass ein Signal zwischen einem LoRaWAN-Gateway und einem LoRaWAN-Knoten auf einen Berg überwinden kann. Das Signal wird an der Spitze eines Berges bzw. eines Gebäudes auf dem Berg gebrochen und abgelehnt. Die grünen bzw. türkis gefärbten Flächen im Geländeschnitt zeigen den Bewuchs durch Bäume bzw. Sträucher an. Die Software zur Simulation der Funkverbindung zeigt uns in den beiden Geländeschnitten an, dass eine Sichtverbindung unmöglich ist. Mittels LoRaWAN ist die Verbindung trotzdem möglich. Diese Eigenschaft wird zum Nachteil, wenn ein LoRa-Netzwerk in Gleiberg errichtet wird und durch die Überreichweiten der Knoten durch Brechung an den Bergen in anderen Regionen reicht.

Wenn man in Reichweitentest genauer betrachtet, dann liegt das SNR mehrfach in einem negativen Bereich und zeigt, dass LoRaWAN im Rauschen Signale empfangen kann. Der Test belegt auch, dass bei ca. -121 dBm die Grenze für einen Empfang erreicht ist. Der extremste Wert ist -121 dBm mit einem SNR von -17,2 dB. Dieser Wert von -121 dBm ist 16 dB von den idealen Wert mit -137 dBm im Labor entfernt. Der Paketverlust wurde bei diesem Reichweitentest nicht analysiert und ausgewertet. Dieser Test untermauert noch einmal, dass es maximale Linkbudget von LoRaWAN bei ca. 141-145 dB liegt. Die 165 dB an vielen Stellen zitiert sind in der realen Welt mit realem Rauschen nicht möglich.

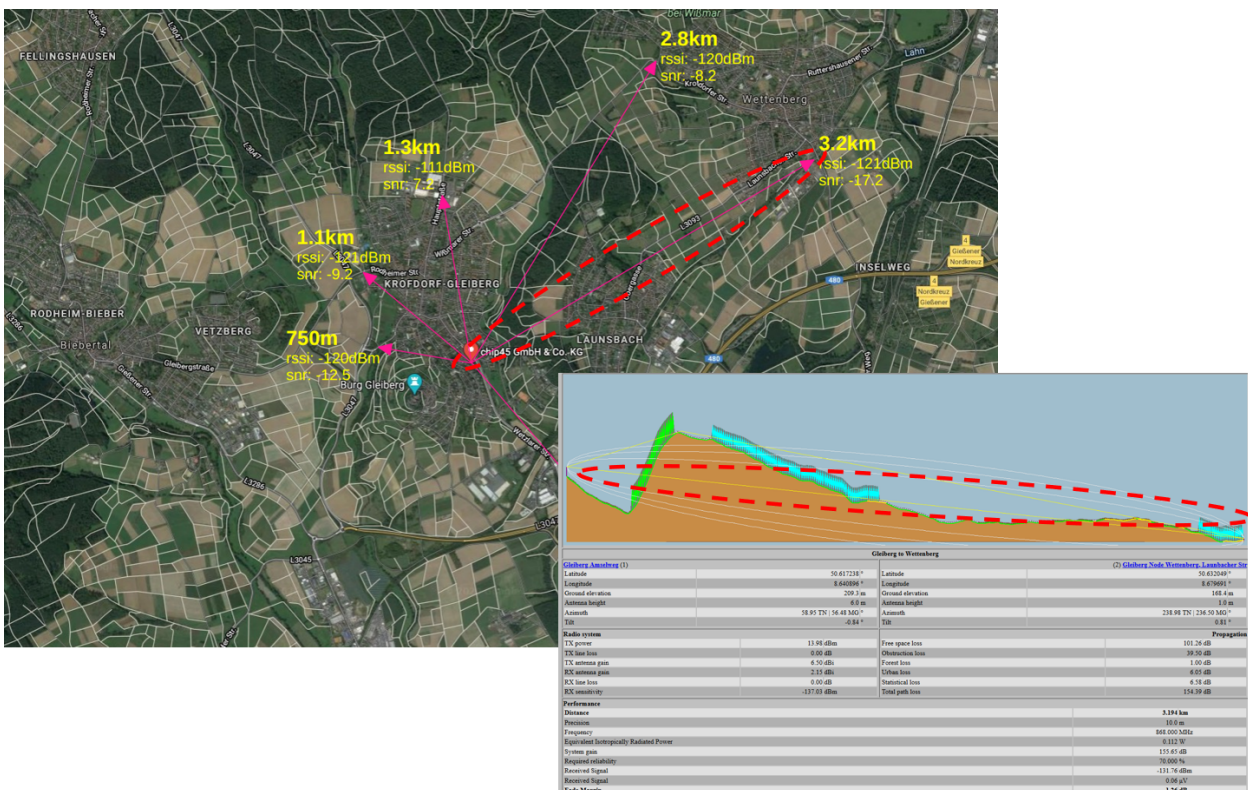


Abbildung 17 Test der Reichweite und max. Linkbudget mit LoRaWAN EU mit SF12, -121 dBm mit -17,2 dB SNR

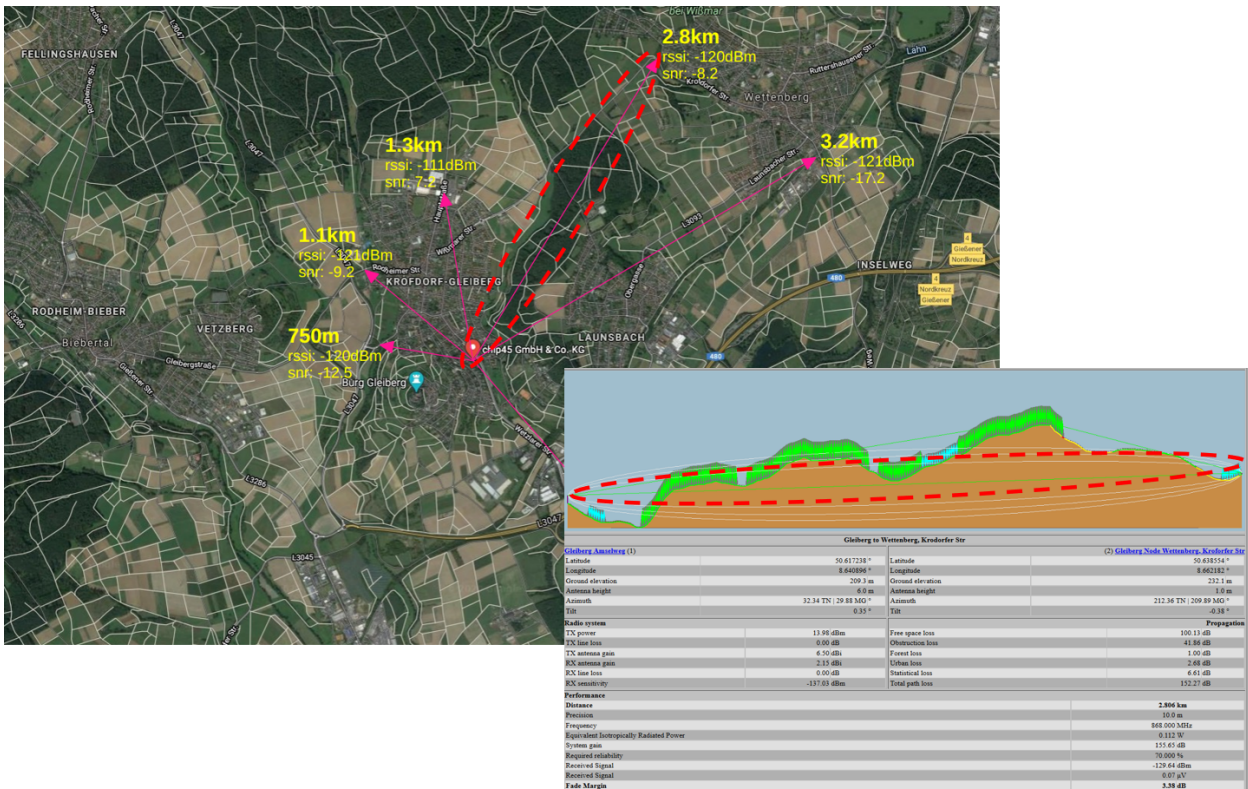


Abbildung 18 Test der Reichweite und max. Linkbudget mit LoRaWAN EU SF12, -120 dBm mit -8,2 dB SNR

13. Gegenüberstellung der Energieverbrauch Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT

Alle LPWAN-Technologien benötigen auf den ersten Blick weniger als eine SMS. Eine SMS kann 140 Zeichen mit je 1 Byte übertragen. Bei Sigfox passen nur 12 Byte in eine Nachricht. SMS kann mit und ohne Quittung benutzt werden. Sigfox kann nur 4 Quittungen pro Tag senden. Wenn mehr als 12 Byte benötigt werden, benötigt eine SMS teilweise weniger Energie als bei Sigfox. Hinzu kommt, dass bei SMS die Energie in Abhängigkeit zum Linkbudget nachgeregelt wird und bei Sigfox die Sendeleistung statisch ist. Ein tieferer Vergleich mit SMS und Messreihen mit 12, 24, 64 und 512 Byte ist nicht Bestandteil des Reports.

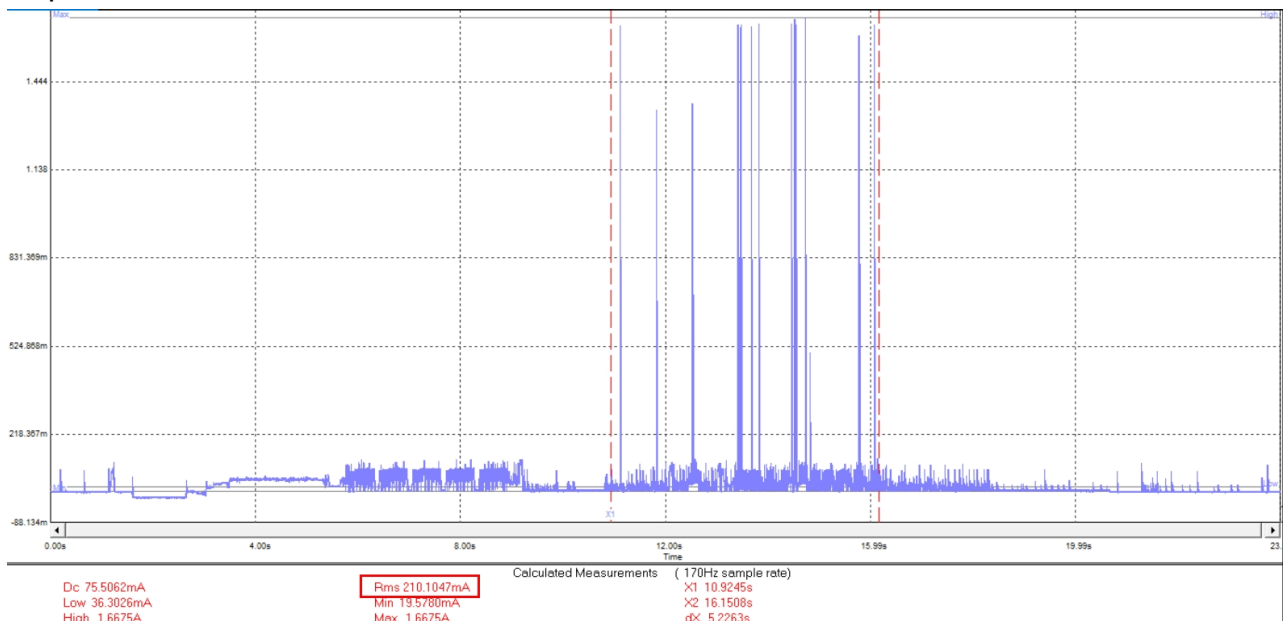


Abbildung 19 SMS mit 33 dBm Sendeleistung

13.1 Upload 12 Byte im Vergleich (kalkuliert)

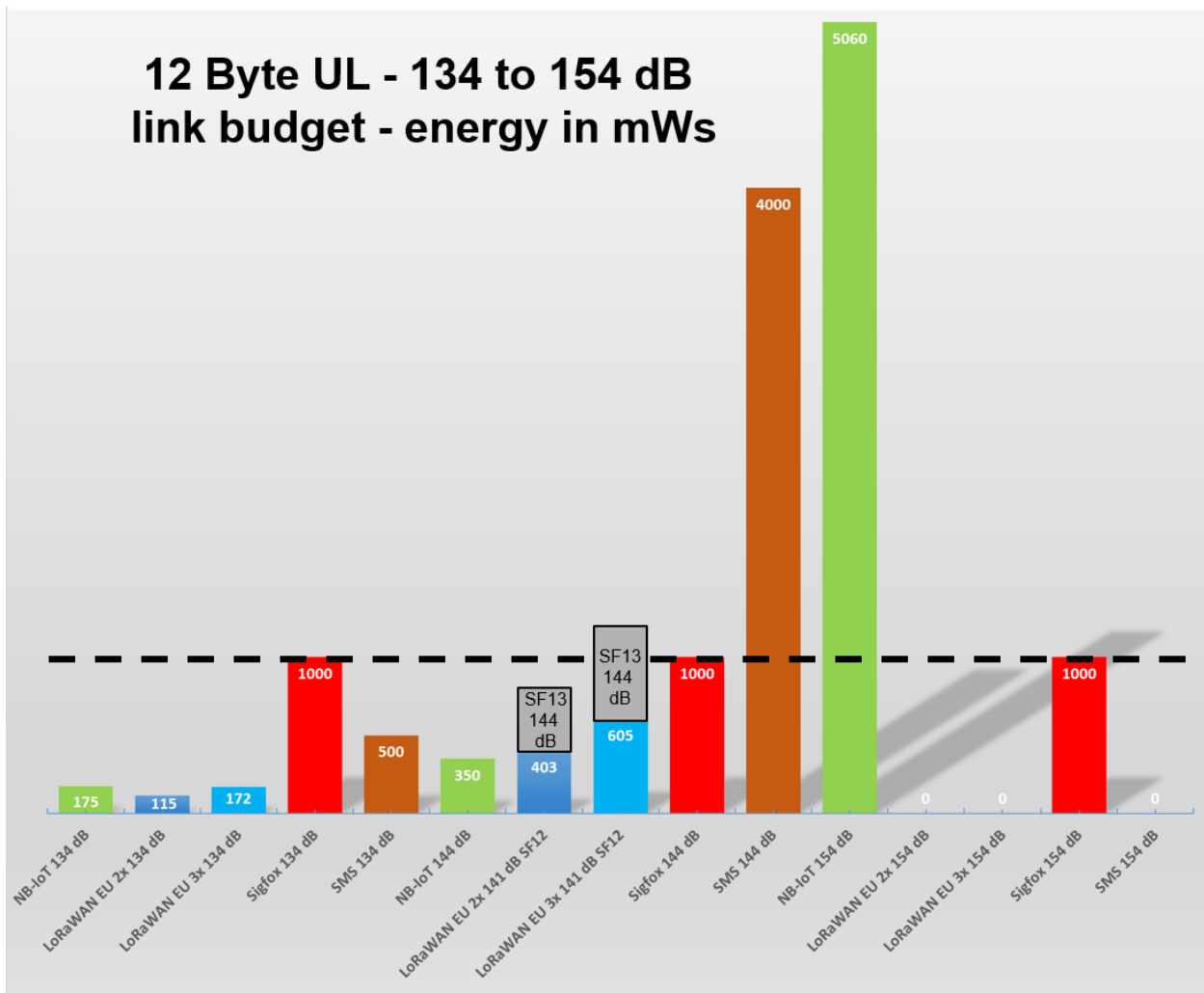


Abbildung 20 Energieverbrauch 12 Byte mit NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox - kalkulierte, nicht gemessen

Der Energieverbrauch für 12 Byte wurde für diese Graphik kalkuliert und wird im nächsten Abschnitt mit Messreihen verifiziert. Für den Energieverbrauch mit dem Sigfox-Modul werden die 2 Sekunden für ein Telegramm mit dem Stromverbrauch bei 14 dBm laut Datenblatt mit der nominalen Spannung von 2,4 V für zwei alkalischen AA-Zellen multipliziert. Diese Energiemenge wird dann mit drei multipliziert, weil das Sigfox Protokoll zur Minimierung des Paketverlusts jedes Paket auf drei unterschiedlichen Kanälen dreimal aussendet. Nutzt man anstatt zwei AA-Zellen eine Lithium-Zelle mit 3,6 V, steigt der Energieverbrauch um 50 % an. Die 1000 mWs sind somit bereits der beste Fall, und aus 1000 mWs werden dann 1500 mWs. Die Kalkulation für das Sigfox Modul ist einfach.

Bei LoRaWAN wurde ebenfalls mit Best-Case mit 2,4 Volt gerechnet. Die Messungen wurden dann mit 3,3 V durchgeführt, weil das ausgewählte LoRa-Modul 2,4 V nicht unterstützt. Den Strom und die benötigte Zeit kann mit dem LoRa-Kalkulator berechnet werden. 13 Byte Header und 12 Byte Nutzlast ergeben 25 Byte brutto. Für die 144 dB Linkbudget muss man SF12, 125 KHz Bandbreite und „Low-Data“ auswählen. Wer sich unsicher ist,

nimmt das bei TTN erwähnte Online-Tool. Das rechnet richtig und beherrscht auch die LoRaWAN-Einstellungen für andere Regionen. Das Protokoll unterstützt im Gegensatz zu Sigfox und NB-IoT von Haus aus keine Wiederholung. LoRaWAN überlässt das Wiederholen der nächsthöheren Protokollschicht. NB-IoT wiederholt im Kern des Protokolls auch bei hoher Feldstärke. Um die drei LPWAN-Protokolle vergleichbar zu machen, wurde LoRaWAN mit einer und zwei Wiederholungen kalkuliert. Den Spreizfaktor 13 haben wir „erfunden“, um zu zeigen, dass sich mit jedem Sprung im Spreizfaktor der Energieverbrauch verdoppelt bzw. halbiert. Die NB-IoT Module haben wir bei 3,6 Volt betrieben, obwohl eines der drei Module auch mit 2,4 Volt betrieben werden kann. Über 134 bis 154 Linkbudget betrachtet verliert in dem Vergleich Sigfox, weil dieses Protokoll nicht nachregelt. LoRaWAN kann statisch nachregeln und sich dem Pfadverlust anpassen. Der Spreizfaktor und somit die Empfindlichkeit haben wir bei der Anmeldung zum Gateway einmalig ausgehandelt. Wenn durch Änderung des Rauschens im Kanal oder Gegenstand im Funkfeld ein anderer Spreizfaktor nötig wäre, dann wird nicht geändert und die Pakete gehen verloren. Es gibt keine konstante Verbindung, sondern nur eine einmalige Zuweisung des Spreizfaktors. Deshalb wird bei bewegten Objekten auch ein möglichst hoher Spreizfaktor empfohlen.

Bei NB-IoT ist das komplett dynamisch. Nach dem erstmaligen Anmelden wird beim erneuten Senden die Wiederholrate und auch die Kanalbreite dynamisch auch in der bestehenden Verbindung angepasst. Es wird mehr wiederholt oder auch weniger. Zur Berechnung des erwarteten Energieverbrauchs wurde eine Excel-Datei des Herstellers Quectel für das Modul BC95 genutzt. Da man die gleiche Excel-Datei auch von anderen Herstellern mit gleichen Chipsets findet, ist der Ursprung wahrscheinlich Huawei. In der ursprünglichen Datei befinden sich zwei „kleine“ Fehler, welche erst auffallen, wenn man an den Timer von NB-IoT-Änderungen vornimmt. Interessierten stellen wir gerne die ursprüngliche Version und die Korrektur zur Verfügung. Die Datei rechnet statisch von 144, 154 und 164 dB Linkbudget. 164 dB Linkbudget wurde in dieser Ausarbeitung gar nicht betrachtet. LoRaWAN ist bei 144 dB Budget bereits am Limit. Bei Sigfox ist das Limit im Download bei ca. 158 dB.

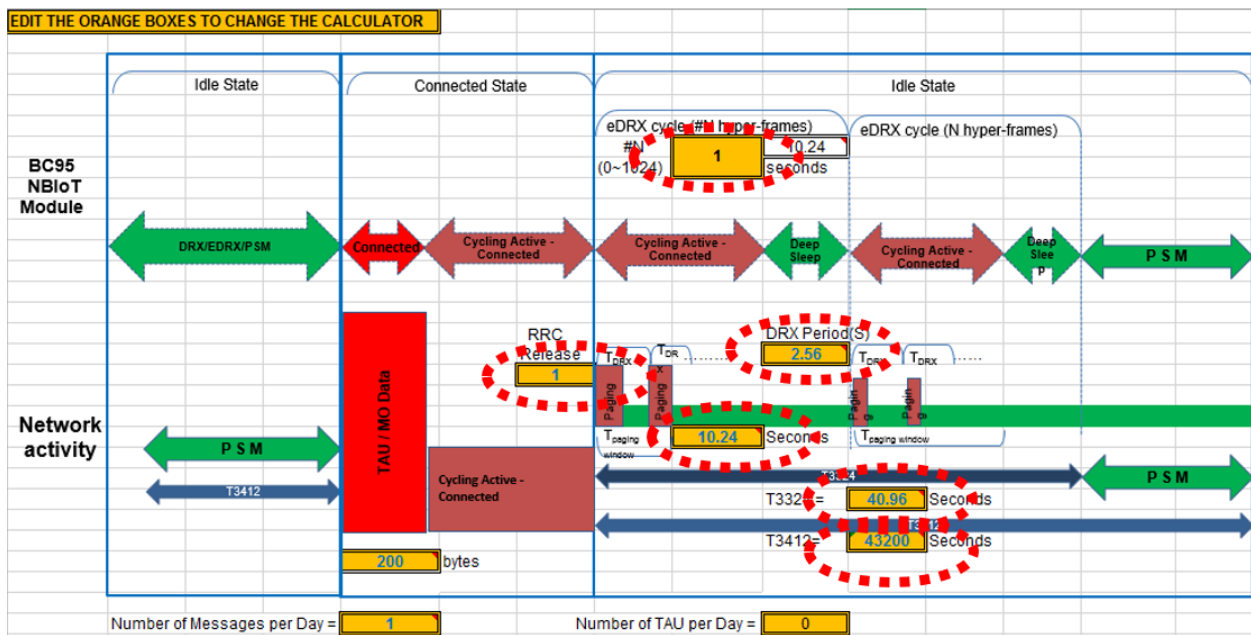


Abbildung 21 Kalkulation des Energieverbrauchs von NB-IoT mit Excel-Datei

Alle gelb markierten Felder kann man verändern. Die Anzahl der Meldungen pro Tag und die Anzahl der Bytes sind einfach zu verstehen. Je mehr Meldungen pro Tag, desto höher ist der Energieverbrauch. Je mehr Bytes pro Payload, desto höher ist der Energieverbrauch. Bei den vielen weiteren Parametern und Timern wird es schon schwierig, diese ohne Erfahrung richtig zu setzen.

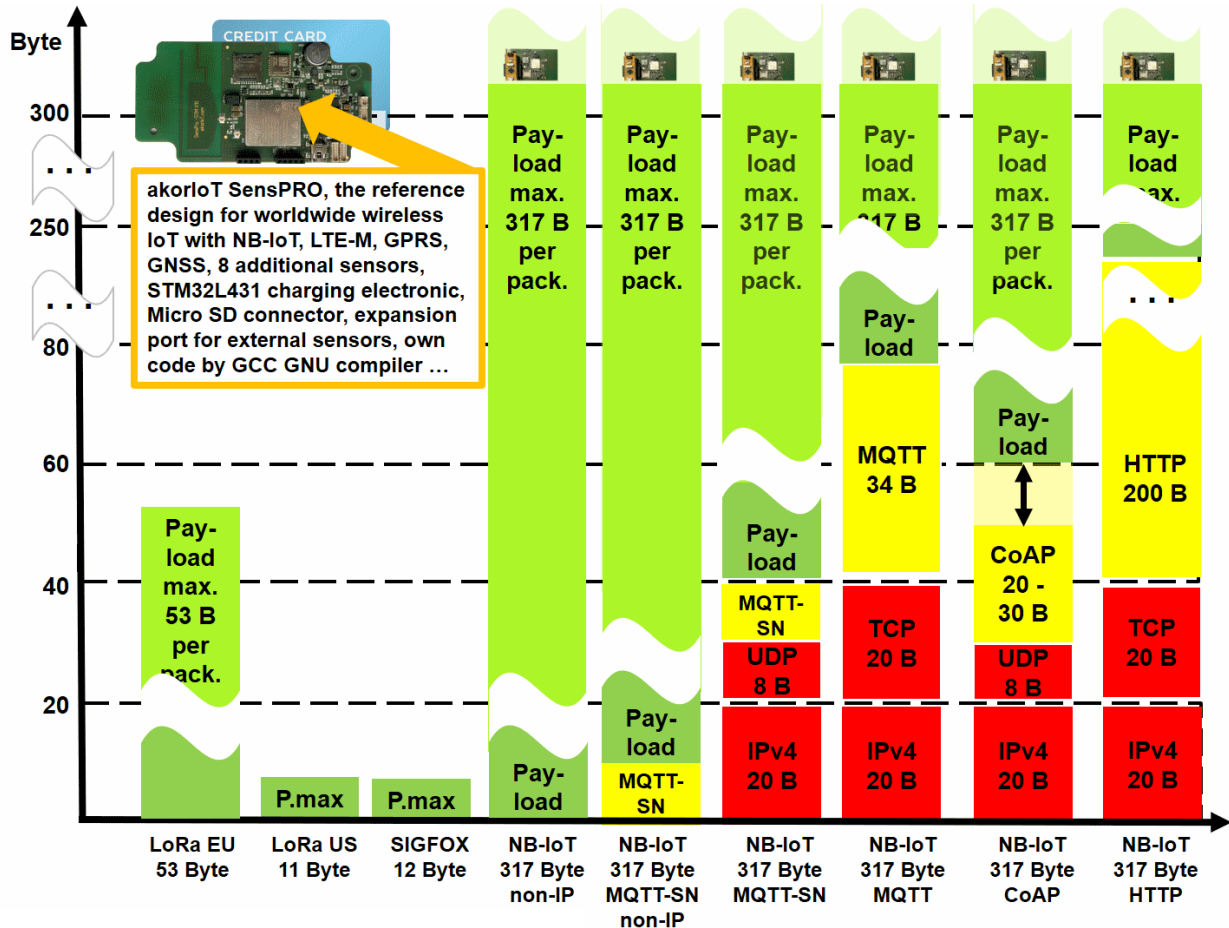


Abbildung 22 Datenvolumen bei 144 dB Linkbudget mit LoRaWAN EU, Sigfox und NB-IoT

Die Kalkulationen wurden mit NB-IoT-Non-IP gemacht und die Messungen später mit UDP-IP. Der UDP-Header auf IPv4 führt dazu, dass die Datenmenge von 12 Byte auf 40 Byte ansteigt. Eine Änderung von 12 Byte auf 72 Byte mit NB-IoT-Non-IP in der Kalkulation führt dazu, dass der Energieverbrauch von 350 mWs auf 360 mWs ansteigt. 60 Byte mehr Payload verursachen 10 mWs mehr Energieverbrauch. 10 mWs / 60 ergibt 167 uWs pro Byte. Einige NB-IoT-Entwickler streben MQTT-SN auf NB-IoT-Non-IP an, weil dies ca. 48 Byte einspart. Man spart ca. 8 mWs in Relation zu 350 mWs. $8 \text{ mWs} / 350 \text{ mWs} \times 100 \% = 2,3 \%$ Einsparung. Wenn man 64 oder gar 512 Byte überträgt reduziert sich die Einsparung in Richtung 1 %. 1 % oder 2,3 % sind aber in den nachfolgenden Messreihen im echten NB-IoT-Netz gar nicht messbar. Ein gutes Antennenkonzept mit 3 dB Systemgewinn bringt viel mehr als 2,3 % mit MQTT-SN mit NB-IoT-Non-IP.

13.2 Upload 24 Byte im Vergleich (kalkuliert)

Zu den 24 Byte wurde im Vorfeld nichts kalkuliert.

13.3 Upload 64 (72) Byte im Vergleich

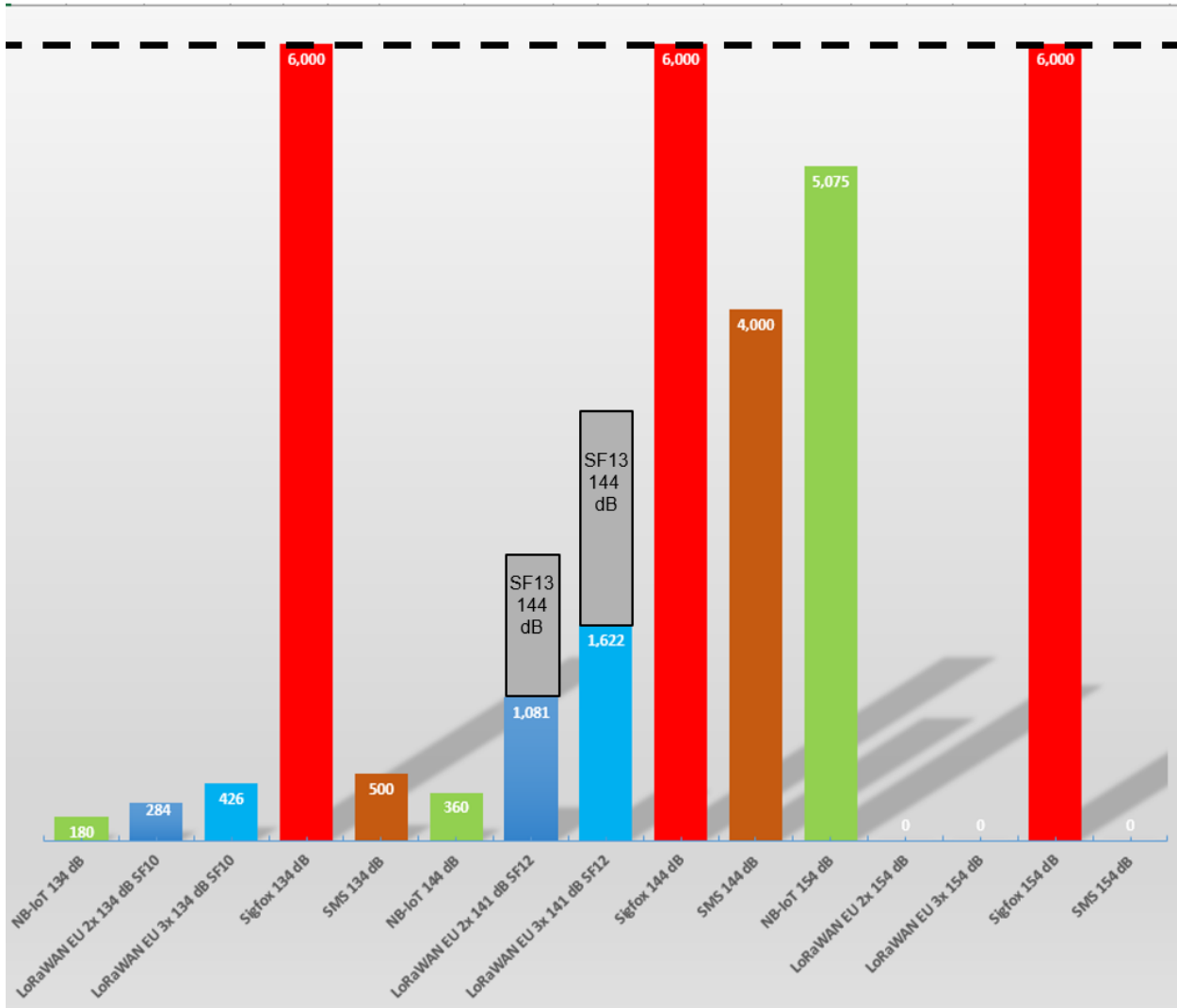


Abbildung 23 Energieverbrauch 72 Byte mit NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox - kalkuliert, nicht gemessen

Die Berechnung für 72 Byte wurde vor der dem endgültigen Wunsch für 64 Byte durchgeführt und in der Kalkulation nicht mehr angepasst. Sigfox verliert total an Boden, weil die 72 Byte auf 6 Meldungen verteilt werden müssen. Hinzu kommt, dass man von den 12 Byte ein Byte oder Halbbyte für den Meldungsähler und die Meldungs-ID aufwenden muss. Durch das Duty-Cycle und den kleinen Overhead darf man das letzte Paket mit 72 Nutzdaten erst nach 60 Minuten der ersten Meldung versenden. Es gibt bei Sigfox nur 4 Quittungen pro Tag. Bei kleinen Mengen von nur 72 Byte oder mehr als 4 Quittungen pro Tag ist das Sigfox total ungeeignet.

Bei LoRaWAN mit SF11 und SF12 stehen nur 51 Byte zur Verfügung. Das LoRaWAN-Modul muss somit 2 Meldungen mit 2 x Header versenden. Das passiert aber nach dem Prinzip der Hoffnung. Das LoRaWAN Gateway hat nur 360 Sekunde pro Stunden zum quittie-

ren aller Meldungen. 512 Byte mit LoRaWAN endet in über einer Stunde, weil über 10 Pakete notwendig sind. Ein Quittungsbetrieb ist auf Grund Duty-Cycle an mittlere oder gar hohe Anzahl der Teilnehmer nicht möglich.

Das Excel-File von Quectel kennt NB-IoT NB1 und somit den maximalen Payload von NB1. Bei NB2 ist der maximale physikalische Payload größer. Da 64 Byte aber deutlich kleiner als der physikalische Payload ist, muss NB-IoT kein weiteres Paket senden.

13.4 Upload 512 Byte im Vergleich (kalkuliert)

512 Byte wurde erst gar nicht im Voraus mit NB-IoT betrachtet, weil der 1000 Bit (125 Byte) große physikalischen Payload zu 4,1 Paketen innerhalb der logischen Verbindung führt. Wenn die Verbindung einmal steht, machen 12 Byte oder 125 Byte keinen großen Unterschied. Von 125 Byte zu 512 Byte ist es aber auch kaum mehr Energie. Die meiste Energie benötigt man für den Verbindungsaufbau. Wenn mehrere Pakete a 125 Byte benötigt werden, dann wird das vom Excel-File berücksichtigt. Das Ergebnis findet man in der Messreihe.

13.5 Erwarteter Energieverbrauch von NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox

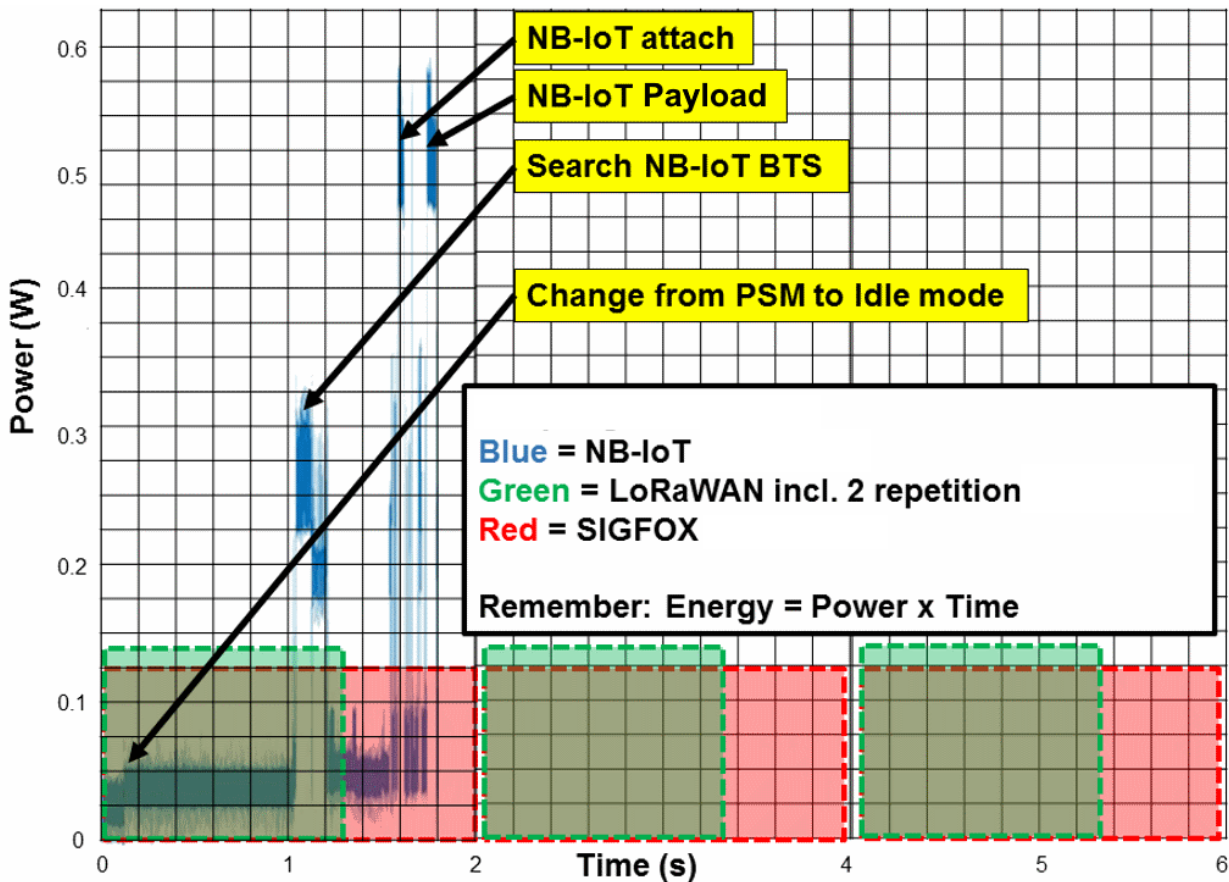


Abbildung 24 Leistung von NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox über die Zeit

Die Leistung über die Zeit in der Fotomontage zeigt, was wir in den nachfolgenden Messungen erwarten. Die Leistungskurve für NB-IoT ist nicht linear und teilt sich in unter-

schiedliche Phasen der Kommunikation auf. Nach dem Wechsel vom PSM-Mode muss der Mikrocontroller im NB-IoT-Module erst einmal hoch fahren, den Empfänger einschalten, die Basisstation suchen, ein Attach machen und dann den Payload senden. Da NB-IoT bei 144 dB Linkbudget mit 27 KBit/s sendet, sind die Anmeldungen und Senden des Payload in sehr kurzer Zeit erwartet. Im Vergleich dazu wird LoRaWAN mit 297 Bit/s und Sigfox mit 100 Bit/s sehr viel mehr Zeit aufwenden. Energie ist aber Leistung x Zeit. Durch die langsame Modulation bei den beiden LPWAN-Technologien im lizenzfreien Band wird dort ein höherer Energieverbrauch erwartet als mit NB-IoT.

14. Messung des Energieverbrauchs

Für den Messaufbau wurden keine speziellen teuren Messgeräte verwendet. Das Messgerät zum Messen der dynamischen Ströme bei NB-IoT-Modulen sollte eine ausreichende Sampling-Rate haben, damit der Messfehler klein gehalten wird. Die Sampling-Rate sollte so gewählt werden, dass ein kurzer NB-IoT-Burst beim Senden oft abgetastet wird. Bei 134 und 144 dB Linkbudget sind die Bursts extrem kurz. Den Bereich sollte man als Benchmark nehmen. Wir haben 2 ms gewählt. Bei Sigfox und LoRaWAN reicht ein Speicheroszilloskop. 12 Byte bei Sigfox führen zu 2,08 Sekunden und bei LoRaWAN EU SF12 zu 1,483 Sekunden Kanalbelegungszeit. Die Stromkurve auf dem Oszilloskop ist eine einfache rechteckige Kurve. Mit 2 ms Abtastrate und 2008 ms bzw 1483 ms ist der Fehler ca. 0,1 %. Wenn der Spreizfaktor um ein Digit geändert oder ein Telegramm wiederholt werden muss, dann ist der Fehler im Verbrauch 100 %.

Die Schirmbox von Willtek wurde mit Dichtbändern modifiziert, um die Dämpfung auf ca. 81 dB zu erhöhen. Selbst die 81 dB Dämpfung reichen nicht aus, um die NB-IoT Module zu 134 bis 154 dB Linkbudget zu zwingen. Am Ende wurden diese Messungen im Keller durchgeführt.

Verwendete Messgeräte / Software

- Digitaloszilloskop Tektronik 2004
- Digital-Multimeter Keithley 2100
- Multimeter Keithley DMM6500
- Schirmbox Willtek 64 dB Schirmdämpfung, die ca. 81dB wurden durch Modifikationen an den Dichtungsbändern erreicht.
- Labornetzteil
- Laptop Lenovo
- Microsoft Excel
- Terminalsoftware Quectel QCOM V1.6.

Verwendete Hardware

- Messplatine NB-IoT mit Quectel BG95-2 BG95M2LAR02A04_01.003.003
- Messplatine NB-IoT mit Quectel BC66 BC66NAR01A03

- Messplatine NB-IoT mit Quectel BC68 BC68JAR01A07
- Messplatine LoRaWAN mit Asip S76S
- Messplatine Sigfox Seong Ji WSSFM10R1AT
- NB-IoT-fähige SIM-Karte von Deutsche Telekom
- NB-IoT-Basisstation im Raum Lübeck mit Cell-ID 3740 im Band 8
- Breitbandantenne Antenna SREL036-10P
- SMA-Dämpfungsglieder 2 dB, 4 dB, 6 dB, 10 dB, 20 dB Typ Radiall
- 50 Ohm Dummy-Load (selbst aufgebaut)

Die Messplatinen mit den fünf Funkmodulen wurden für die Messreihe auf einer Platine in Größe einer Kreditkarte extra entwickelt, damit alle Module die gleichen Voraussetzungen haben. Die PCB-Antennen in den Platinen sind so konstruiert, dass diese die benötigten Frequenzbänder abdecken. Für diese Messreihen sind die internen PCB-Antennen unnötig, aber für geplante weitere, andere Messreihen werden sie benötigt. Die Platinen haben eine minimale Bestückung, um unerwünschte Kriechströme zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden auch keine Evaluierungskits der drei Hersteller eingesetzt. Alle Module haben somit die gleichen Voraussetzungen. Die Antenne von Antenna deckt alle benötigten Frequenzbänder weltweit ab. Der Testaufbau kann somit leicht in zum Beispiel Australien und USA reproduziert werden. Die Firmware des Quectel BG95-M2 BG95M2LAR02A04_01.003.003 war zum Start des Projekts gültig. Inzwischen gibt es BG95M2LAR02A04_01.003.004. Mit der neuen Version könnte das Messergebnis erneut besser werden. Das gleiche gilt für das Quectel BC66 und BC68. Nur beim Sigfox- und LoRaWAN-Modul gab es seit langem keine Änderung. Das Sigfox-Protokoll ist nun 10 Jahre alt und LoRaWAN hat seit Version 1.0 keine Änderung erhalten, welche den Energieverbrauch optimiert.

14.1 Messung SIGFOX Modul Wisol (Seong Ji)

Das Seong Ji WSSFM10R1AT ist mit 2,20 Euro pro Stück wahrscheinlich das günstigste Sigfox-Modul am Markt. Es kann nicht weltweit eingesetzt werden. Für andere Regionen gibt es Derivate. Ein weltweites Produkt in allen Sigfox-Regionen ist auf einem vorzertifizierten Sigfox-Modul nicht möglich, weil es nach unserer Recherche im September 2020 kein Modul dazu gibt.

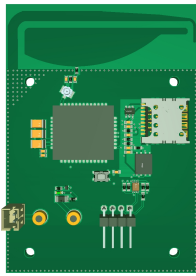
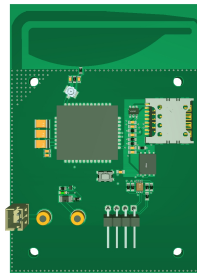
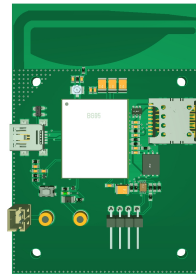
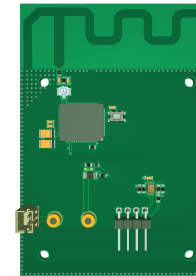
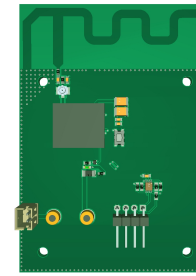
Die Messung mit dem Seong Ji WSSFM10R1AT wurde mit Standardbefehlen zum Senden von 12 Byte durchgeführt. Die Betriebsspannung wurde auf 3,3 Volt fest gelegt, weil dies für Mikrocontroller üblich ist. Ob die Meldung ankommt, wurde nicht geprüft. Da Sigfox ein verbindungsloses Protokoll ist, kann man einfach senden und hoffen, dass ein Paket ankommt. Ein Sigfox-Modul sendet ohne zu wissen, ob ein Sigfox-Gateway erreichbar ist. Daher wurden die erwarteten 1000 mWs für 12 Byte in der Kalkulation in der Messreihe mit 980 mWs bestätigt. Dazu schließt man statt der Antenne einfach einen 50-Ohm-Dummy-Load an. 24, 64, 72 und 512 Byte kann man einfach mathematisch aus der Messung für 12 Byte ableiten. Die 64 Byte mit Quittung sind mit Sigfox unmöglich, weil die Anzahl der Quittungen auf 4 pro Tag im Download begrenzt ist.

14.2 Messung LoRaWAN Modul Acsip S76S

Das Acsip-Modul S76S ist ein günstiges LoRaWAN-Modul. Es kann weltweit nicht eingesetzt werden. Die Betriebsspannung musste 3,3 Volt werden, weil die MCU im Modul 3,3 Volt erwartet. Das Modul mit LoRaWAN EU von Acsip gibt es auch mit LoRaWAN US mit Zulassung nach FCC. Da LoRaWAN ein verbindungsloses Protokoll ist, welches primär darauf hofft, dass die Meldung ankommt, benötigt man zur Messung des Energieverbrauchs kein Gateway. Das LoRaWAN-EU-Protokoll besteht aus 13 Byte Header und maximal 51 Byte Nutzlast. Das Acsip S76S kann mit dem Protokoll LoRaWAN mit LoRa Peer-to-Peer genutzt werden. 13 Byte Header mit 12 Byte Nutzlast ergeben 25 Byte Payload im Peer-to-Peer-Mode. 24 Byte Payload können noch mit einem Telegramm übertragen werden. Bei 64 Byte muss bereits in zwei Telegramme aufgeteilt werden. 512 Byte teilen sich dann in viele Telegramme auf und eine Quittung wird bei wenigen Funkknoten unmöglich. 24, 64 und 512 Byte kann man einfach mathematisch aus der Messung für 12 Byte Nutzlast ableiten. Die Kalkulation und die Messreihe ist ähnlich. Die Kalkulation ist sogar ein wenig besser, weil dort mit geringer Betriebsspannung kalkuliert wurde.

14.3 Messung NB-IoT Modul Quectel BG95, BC66 und BC68 im Vergleich zu LoRaWAN Acsip und Sigfox Seong Ji

Platinen zur Messung

				
Quectel BC66 NB-IoT PCB antenna	Quectel BC68 NB-IoT PCB antenna	Quectel BG95-M2 NB-IoT LTEM GNSS GPRS opt. on M3 PCB antenna	Acsip S76S LoRaWAN EU PCB antenna	Seong Ji WSS- FM10R1AT Sigfox EU PCB antenna

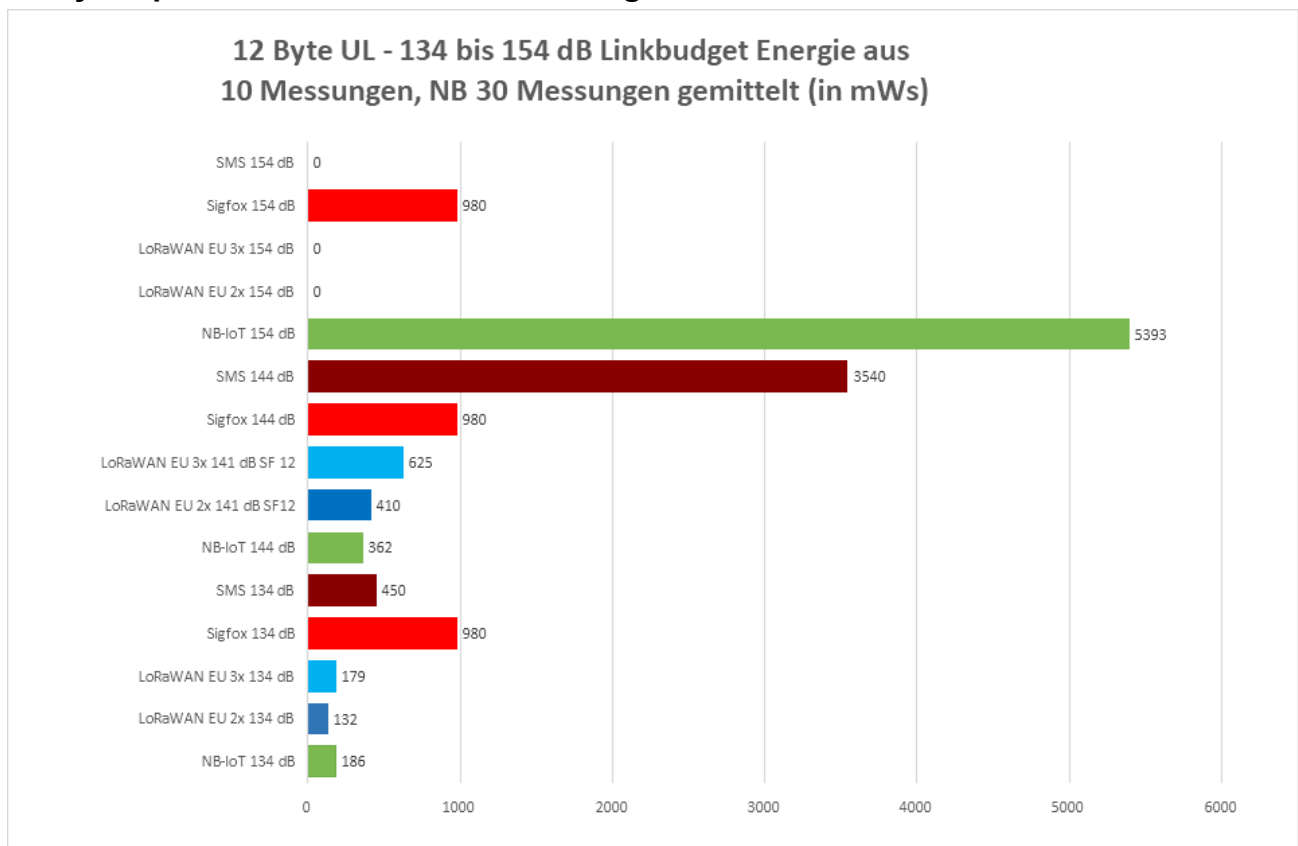
Alle Platinen wurden gleich groß für alle Funkmodule und LPWAN-Protokolle erarbeitet. Die Abmaße sind wie bei einer Kreditkarte 55 mm x 85 mm. Die Platinen wurden so konstruiert, dass diese für weitere Messreihen zum Vergleich anderer Parameter benutzt werden können. Der vierpolige Steckverbinder auf der Platine dient zum Anschluss eines Steuerkabels mit Konverter von UART auf USB. Der zweipolige Steckverbinder auf der linken Seite der Platine dient zum Anschluss des Labornetzteils oder der Batterie. Die beiden gelben Steckverbinder zwischen dem Stecker für die Betriebsspannung und dem Steuerkabel dienen zum Anschluss des Messgeräts zur Messung des Stromverbrauchs.

Die NB-IoT-Versorgung an unserem Standort ist so gut, dass die benutzte 80-dB-Schirm-

box nicht ausreicht, die 134, 144 und 154 Linkbudget zu erzwingen. Die Funkwelle kommt über die externe Antenne (die PCB-Antennen sind gekappt und nicht in Betrieb), wird mit Dämpfungsgliedern gedämpft, und weitere Funkenergie kommt über die Schirmbox auf die Platine. Diese unerwünschte Energie erreicht ebenfalls das NB-IoT-Modul. Um das Ziel von 134 bis 154 dB LB zu erreichen, wurden die Messungen in den Keller verlegt. Die Gerber-Dateien, Stückliste, Schaltbilder, Messung der Antenne (Rückflussdämpfung / Radiation Pattern in 3 Achsen) werden auf Anfrage kostenfrei zur Verfügung gestellt. Jeder Interessierte kann somit die Messungen mit vertretbarem Aufwand nachvollziehen.

14.3.1 Messreihe 12, 24, 64, 512 Byte bei 134 bis 154 dB Linkbudget

12 Byte Upload - 134 bis 154 dB Linkbudget

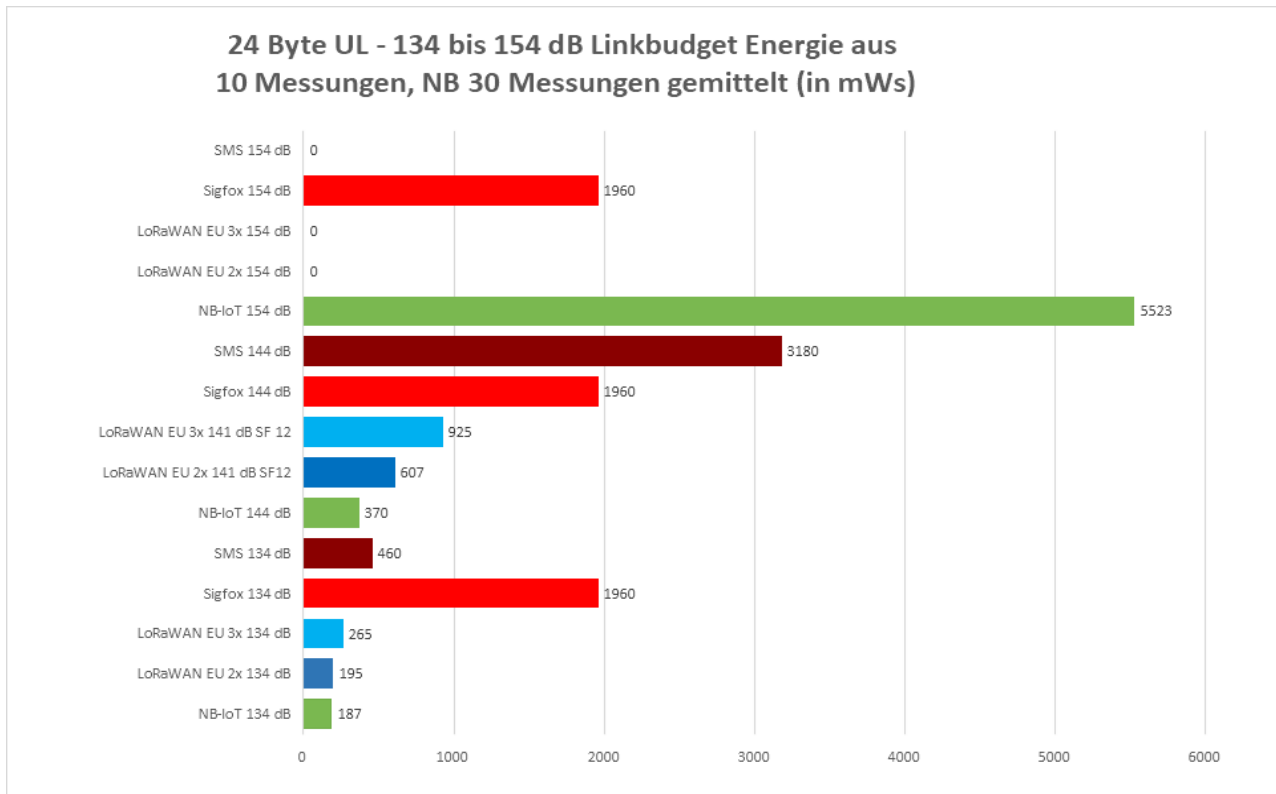


Um die LPWAN-Technologien vergleichbar zu machen, wurde als unterstes Payload 12 Byte gewählt, weil Sigfox nur maximal 12 Byte im Upload übertragen kann. Da ein Sigfox-Modul ein Paket immer zweimal wiederholt und NB-IoT auch bei hoher Feldstärke von mit 134 dB Linkbudget einmal wiederholt, wurde auch LoRaWAN mit Wiederholung einmal und zweimal angewendet. Dass bei LoRaWAN bei Extrema auch 90 % Packetverlust erreicht werden, wurde hier nicht berücksichtigt. Ohne Wiederholung können Sigfox und NB-IoT das angestrebte Ergebnis von möglichst wenig Paketverlust nicht erreichen.

Das Benchmark sind 3530 mWs für eine SMS bei 144 dB Linkbudget. NB-IoT und LoRaWAN sind bei 144 dB besser. Die 3530 mWS beinhalten das Aufwachen, Einbuchen ins

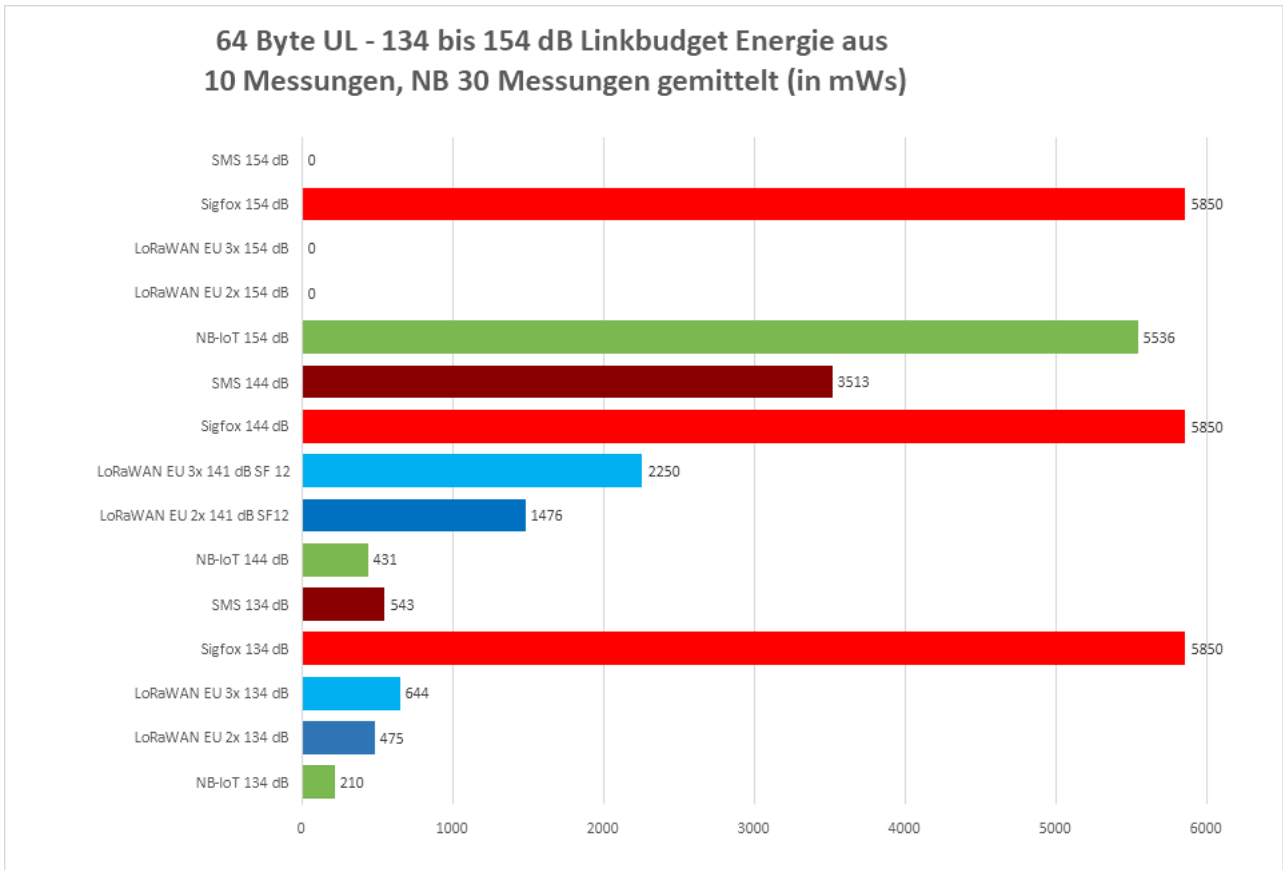
GSM-Netz und das Übertragen von 12 Byte. Bei 144 dB Linkbudget ist NB-IoT besser als LoRaWAN und Sigfox. Bei 154 dB ist Sigfox besser als NB-IoT. LoRaWAN EU hat bei 154 dB einen Paketverlust von 100 %. Bei 134 dB verliert Sigfox sogar gegen die uralte SMS. LoRaWAN EU ist bei 134 dB Linkbudget besser als NB-IoT, weil die statistische Regelung von LoRaWAN bei unserer stationären Betrachtung durch die Einfachheit des Protokolls besser passt.

24 Byte Upload - 134 bis 154 dB Linkbudget



Sigfox ist einfach zu erklären. Sigfox muss bei 24 Byte bereits zwei Meldungen senden. Auf 12 Byte Nutzlast kommen 12 Byte Header. Wenn man von 12 Byte auf 24 Byte Nutzlast erhöht, dann erhöht sich auch die Menge der benötigten Energie. Selbst bei 24 Byte Nutzlast mit 154 dB LB ist Sigfox besser als NB-IoT oder LoRaWAN EU. LoRa kann keine 154 dB LB und endet in 100% Paketverlust. Bei 144 dB und 134 dB LB überholt NB-IoT und LoRaWAN EU Sigfox. Das Sigfox-Protokoll verliert gegen LoRaWAN und NB-IoT. Das 10 Jahre alte, sehr einfache Protokoll von Sigfox ohne Regelung wird von NB-IoT und LoRaWAN mit Regelung geschlagen. Selbst die uralte SMS schlägt bei 134 dB Linkbudget das alte Sigfox.

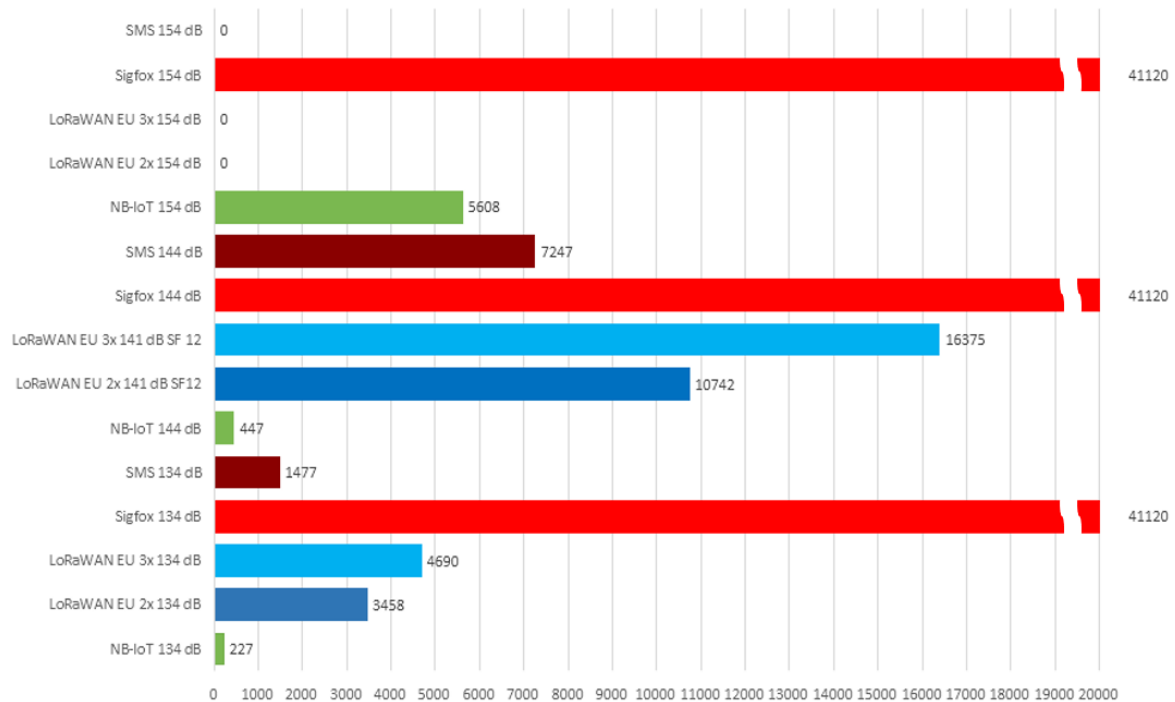
64 Byte Upload - 134 bis 154 dB Linkbudget



Bei 64 Byte verliert Sigfox bei 144 dB LB gegen die SMS. Bei 154 dB LB ist Sigfox ähnlich NB-IoT. NB-IoT regelt aber konstant nach. Bei 134 dB Linkbudget ist sogar eine SMS besser als LoRaWAN mit einer Wiederholung. Plant man keine Wiederholung, dann sieht LoRaWAN sofort besser aus. Das Risiko des Paketverlustes hat Sigfox bereits vor 10 Jahren erkannt und dies in das Protokoll integriert. Eine Funkzelle besteht aber nicht nur aus dem Extrema von 154 LB, sondern reicht bis weit unter 134 dB Linkbudget. Bei 64 Byte und 134 dB Linkbudget gewinnt NB-IoT vor LoRaWAN und Sigfox.

512 Byte Upload - 134 bis 154 dB Linkbudget

512 Byte UL - 134 bis 154 dB Linkbudget Energie aus
10 Messungen, NB 30 Messungen gemittelt (in mWs)



512 Byte ist mit Sigfox und LoRaWAN nur mit extrem hohem Energieaufwand möglich. Durch das 1 % Duty Cycle im Upload muss man 512 Byte über einen langen Zeitraum verteilen. Auf Quittungsbetrieb muss man verzichten, weil das Gateway auf 10 % Duty Cycle für allen Knoten begrenzt ist. Bei 1000 Knoten und somit 360 ms Zeit für den Download pro Knoten benötigt eine Quittung bei 144 dB Linkbudget bereits mehr Zeit als 360 ms. Quittungen sind bei 512 Byte mit LoRaWAN und Sigfox unmöglich. Bei 64 Byte ist das aber auch mit 1000 Byte unmöglich.

Wenn man bei NB-IoT genau hinschaut, stellt man fest, dass bei 154 dB LB mit 12 Byte bis 512 Byte 5393 bis 5606 mWs benötigt werden. 12 Byte oder 512 Byte machen keinen großen Unterschied. Bei 134 bzw. 144 dB Linkbudget setzt sich das fort.

24, 64 und 512 Byte in Tabellen

24Byte/134dB Linkbudget					24Byte/144dB Linkbudget					24Byte/154dB Linkbudget				
Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis	Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis	Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis
1	182	189	186	-95 bis -105	1	362	378	370	-112 bis -116	1	5366	5412	5389	-120 bis -126
2	185	188	187	-91 bis -104	2	366	386	376	-111 bis -113	2	5478	5522	5500	-119 bis -127
3	181	191	186	-95 bis -102	3	359	381	370	-112 bis -114	3	5433	5489	5461	-121 bis -127
4	186	189	188	-88 bis -106	4	361	371	366	-110 bis -118	4	5501	5421	5461	-120 bis -131
5	190	187	189	-92 bis -104	5	362	388	375	-111 bis -119	5	5589	5591	5590	-122 bis -128
6	187	190	189	-95 bis -105	6	365	382	374	-109 bis -117	6	5603	5678	5641	-119 bis -130
7	182	186	184	-93 bis -102	7	371	381	376	-112 bis -116	7	5589	5587	5588	-121 bis -129
8	189	185	187	-91 bis -106	8	369	372	371	-110 bis -115	8	5538	5467	5503	-122 bis -129
9	183	191	187	-96 bis -103	9	345	371	358	-111 bis -117	9	5489	5601	5545	-122 bis -131
10	185	190	188	-90 bis -101	10	355	372	364	-109 bis -113	10	5466	5645	5556	-121 bis -131
		Summe MW	187				Summe MW	370				Summe MW	5523	

64Byte/134dB Linkbudget					64 Byte/144dB Linkbudget					64Byte/154 Linkbudget				
Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis	Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis	Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis
1	210	206	208	-92 bis -104	1	444	428	436	-112 bis -116	1	5403	5512	5458	-119 bis -130
2	211	219	215	-95 bis -105	2	438	427	433	-112 bis -114	2	5601	5434	5518	-122 bis -131
3	209	216	213	-88 bis -106	3	481	428	430	-111 bis -119	3	5467	5534	5501	-119 bis -129
4	212	214	213	-91 bis -106	4	439	435	437	-112 bis -116	4	5421	5512	5467	-122 bis -128
5	205	209	207	-95 bis -102	5	427	431	429	-109 bis -117	5	5598	5567	5583	-121 bis -129
6	201	208	205	-92 bis -104	6	426	427	427	-110 bis -115	6	5543	5581	5562	-119 bis -127
7	208	215	212	-89 bis -105	7	429	422	426	-109 bis -113	7	5587	5556	5572	-122 bis -128
8	201	212	207	-90 bis -105	8	430	430	430	-112 bis -116	8	5488	5564	5526	-121 bis -129
9	210	218	214	-95 bis -105	9	427	447	437	-110 bis -115	9	5589	5572	5581	-119 bis -130
10	203	219	211	-95 bis -105	10	426	423	425	-112 bis -116	10	5597	5598	5598	-122 bis -128
		Summe MW	210				Summe MW	431				Summe MW	5536	

512Byte/134dB Linkbudget					512 Byte/144dB Linkbudget					512Byte/154 Linkbudget				
Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis	Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis	Messung	BC68	BG95-M2	Mittelwert	RSRP von bis
1	213	231	222	-92 bis -104	1	451	443	447	-112 bis -116	1	5516	5603	5560	-121 bis -129
2	218	236	227	-91 bis -106	2	455	447	451	-110 bis -115	2	5489	5589	5539	-119 bis -127
3	221	229	225	-93 bis -102	3	439	440	440	-112 bis -116	3	5581	5643	5612	-122 bis -128
4	220	226	223	-95 bis -105	4	446	439	443	-110 bis -115	4	5567	5623	5595	-122 bis -131
5	224	219	222	-93 bis -102	5	449	445	447	-111 bis -119	5	5689	5534	5612	-119 bis -130
6	219	231	225	-95 bis -105	6	453	451	452	-112 bis -114	6	5678	5701	5690	-122 bis -131
7	223	256	240	-96 bis -103	7	451	448	450	-109 bis -113	7	5588	5498	5543	-119 bis -127
8	218	236	227	-89 bis -105	8	439	452	446	-109 bis -117	8	5587	5698	5643	-122 bis -128
9	225	228	227	-93 bis -102	9	447	454	451	-112 bis -114	9	5721	5602	5662	-119 bis -130
10	226	232	229	-95 bis -105	10	449	439	444	-110 bis -115	10	5645	5612	5629	-122 bis -131
		Summe MW	227				Summe MW	447				Summe MW	5608	

Die Tabellen oben zeigen die Messreihen mit zwei der drei ausgewählten NB-IoT Module von Quectel. In der Tabelle wurde der Energieverbrauch bei 134,144 und 154 dB Linkbudget mit 24,64 und 512 Byte visualisiert. Das angenommene Linkbudget ergibt sich unter der Annahme, dass -104, -114 und -124 dBm RSRP dem gewünschten Linkbudget entsprechen. Die Grenzwerte für den RSRP wurde den Unterlagen der 3GPP und der Excel-Datei zur Kalkulation des Energieverbrauchs von Quectel entnommen.

RSRP	Linkbudget
-104 dBm	134 dB
-114 dBm	144 dB
-124 dBm	154 dB
-134 dBm	164 dB

Der Standort für alle Messungen war immer der gleiche. Die benötigte Dämpfung wurde durch Dämpfungsglieder hinter der Antenne und vor der Messplatine erreicht. Die Messplatine mit dem NB-IoT-Modul wurde in einer Schirmbox mit 80 dB Schirmdämpfung in den Keller gebracht, weil die Signalpegel im Labor trotz der Schirmbox immer noch zu hoch waren. Das NB-IoT-Signal gelangte im Labor durch die Schirmbox auf die Platine, und die Platine wirkte als Antenne. Das NB-IoT-Protokoll verhält sich im Gegensatz zu Sigfox und LoRaWAN sehr dynamisch. Diese Dynamik führt dazu, dass auch während einer Verbindung bzw. einer Datenübertragung nachgeregelt wird. Hinzu kommt, dass der RSRP sich durch das Signal-Rausch-Verhältnis ständig ändert. Wenn das Rauschen ansteigt, verschlechtert sich der Empfangspegel. Das NB-IoT-Protokoll regelt sofort nach, damit die

Verbindung aufrecht erhalten wird. Wir haben daher die Messreihen auf ein RSRP des gewünschten RSRP nach den Messungen gefiltert. Jede der zehn Messungen besteht aus Mehrfachmessungen, und der minimale und maximale Signalpegel pro Messung sind in der Tabelle angezeigt. Die Excel-Datei zur Kalkulation kennt nur 144, 154 und 164 dB Linkbudget. Die 134 dB Energieverbrauch in der Kalkulation wurden geschätzt, aber auch diese wurden in den Messreihen bestätigt.

15. Schlussfolgerung

Die Vorhersage der kalkulierten Energiemenge für 12, 24, 64 und 512 Byte mit LoRaWAN und Sigfox wurde bestätigt. Die Kalkulation für NB-IoT mit einer sehr komplexen Excel-Datei wurde ebenfalls nachgewiesen.

Wenn man die LPWAN-Technologien NB-IoT, LoRaWAN und Sigfox mit GSM 900 und SMS mit 33 dBm Sendeleistung vergleicht, sind alle drei meist besser als eine SMS. Wenn aber ein GSM-Modul näher an der Basisstation platziert wird, vermindert sich die Sendeleistung des Moduls beim Senden. Das geht so weit, dass ein GSM-Modul mit SMS am Ende weniger Energie benötigt als ein Sigfox-Modul. Sigfox-Module benutzen ein komplett statisches Funkprotokoll und regeln den Energieverbrauch nicht nach. Sobald mehr als 12 Byte Payload versendet werden, ist SMS ebenfalls beim Energieverbrauch besser, weil dort 140 Bytes versendet werden können. Das Sigfox-Modul muss die 140 Byte in 12 Pakete teilen. Ein Paket mit dem Sigfox-EU-Protokoll belegt den Kanal 2,06 Sekunden, und durch die zweifache Wiederholung 6,18 Sekunden. Durch das Duty Cycle von 1 % ist man in Europa auf 36 Sekunden Sendezeit pro Stunde begrenzt. Die 140 Byte werden somit über 2 Stunden Zeit zum Senden in Anspruch nehmen.

Bei LoRaWAN sieht es besser aus, weil es dort zu 3 Meldungen mit einer Kanalbelegungszeit in Summe von 10,7 Sekunden führt. Für LoRaWAN wird es aber bereits bei wenigen Knoten pro Gateway unmöglich, die Telegramme zu quittieren.

Quittungsbetrieb ist für alle LPWAN-Technologien im 868-MHz-Band in Europa bei mittlerer Anzahl von Knoten unmöglich, weil durch die 10 % Duty Cycle die 360 Sekunden bei zum Beispiel 1000 Knoten nur 360 ms Sendezeit zum Quittieren zur Verfügung stellen. Eine Quittung mit LoRaWAN EU mit SF12 oder Sigfox benötigt aber mehr als 360 ms Kanalbelegungszeit.

Analyse der Messreihen zum Energieverbrauch

Bei 164 dB Linkbudget steigt der Energieverbrauch bei NB-IoT im Vergleich zu 154 dB laut Kalkulation per Excel auf das Zehnfache an. Messungen im realen NB-IoT-Netz sind bei 164 dB nahezu unmöglich, weil dort mit Abbrüchen der Verbindung gerechnet werden kann.

Um das Linkbudget um 3 dB zu erhöhen, muss man die Leistung verdoppeln. 3 dB +3 dB

+3 dB plus 1 dB = 10 dB. $2 \times 2 \times 2 \times 1,25 = 10$. Da die Sendeleistung nicht weiter erhöht wird, erfolgt die Erhöhung pro Byte über den Mehraufwand an Zeit. Energie = Leistung x Zeit = Spannung mal Strom x Zeit. Bei 164 dB Linkbudget funktionieren LoRaWAN und Sigfox nicht mehr im bidirektionalen Betrieb. NB-IoT wurde bis 154 dB erfolgreich getestet und 164 dB nicht angestrebt.

Das maximale Linkbudget von Sigfox ist im bidirektionalen Betrieb 158 dB und damit nahe an NB-IoT mit CL1 mit 154 dB. Sigfox benötigt nur ca. 980 mWs. LoRaWAN braucht unendlich Energie, weil keine Meldung mehr ausgewertet werden kann.

Bei 144 dBm Linkbudget benötigt NB-IoT ca. 362 mWs und somit deutlich weniger Energie als Sigfox. Das Sigfox-Modul bleibt statisch bei ca. 980 mWs Sekunden im Energieverbrauch. Bei ca. 410 mWs für 12 Byte mit LoRaWAN pro Aussendung ergibt das mit drei Aussendungen ca. 625 mWs. Wenn man die 80 % Paketverlust der Hochschule Offenburg annimmt, wären sogar fünf Telegramme notwendig. Sobald die Paketgröße von 51 Byte überschritten wird, erhöht sich der Energieverbrauch von LoRaWAN EU drastisch, weil zu 51 Byte netto noch 13 Byte Header hinzu kommen. 64 Byte Brutto belegen den Kanal sehr lang, und damit steigt die Wahrscheinlichkeit einer Kollision. Mit mehrfachen Telegrammen kann man theoretisch die 512 Byte erreichen. Das führt zur erneuten Erhöhung zur Wahrscheinlichkeit, dass die 512 Byte ohne Verlust übertragen werden können. Die 2 bis 3 kalkulierten Meldungen pro 51 Byte werden eventuell für 512 Byte nicht ausreichen. Unabhängig vom hohen Energieverbrauch mit LoRaWAN EU bei 144 dB Linkbudget ist das Protokoll ungeeignet zur Übertragung von 512 Byte. Selbst 64 Byte ist schwierig, weil sich die Wahrscheinlichkeit der Kollision durch die zwei Pakete addiert.

Bei 134 dBm Linkbudget regelt NB-IoT die Sendeleistung des Moduls zurück. Theoretisch sollte sich der Energieverbrauch bei 10 dB besseren Linkbudget um Faktor zehn verbessern. Praktisch ist die Nachregelung bei NB-IoT anscheinend nicht gut genug. Wenn man den LoRaWAN-Kalkulator von Semtech zur Hand nimmt, dann erkennt man, dass LoRaWAN bei der Änderung von Spreizfaktor (Abkürzung SF) 12 auf SF 9 die benötigte Zeit für ein Telegramm von 1483 ms auf ca. 206 ms reduziert. Es ist kein Zehntel, aber die Reduktion des Energieverbrauchs ist bei LoRaWAN bei 134 dBm besser als mit NB-IoT. LoRaWAN kann bis SF7 nachregeln. Danach tritt keine Verbesserung des Energieverbrauchs durch Änderung des Spreizfaktors mehr ein. Durch die konstant statischen ca. 980 mWs ist Sigfox extrem viel schlechter als LoRaWAN und NB-IoT.

Erhöht man das Payload von 12 Byte auf 24 Byte, verliert Sigfox sofort gegen NB-IoT. Sigfox kann nur 12 Byte übertragen. Von den 12 Byte müsste man einen Header abzweigen, um die geteilten Telegramme zusammenzuführen. Da Sigfox nur 4 Meldungen mit 8 Byte im Download anbietet, ist eine Anforderung der Wiederholung von Meldungen nur begrenzt möglich. 120 Byte würden sich auf 11 Meldungen verteilen und mehr als 120 Minuten Zeit beanspruchen. Der bereits schlechte Energieverbrauch von Sigfox würde um ca. das Elffache ansteigen.

Ähnlich ist es mit LoRaWAN US mit 11 Byte Payload. Dort kann das Problem entschärft werden, indem man auf ca. 3 dB Empfindlichkeit verzichtet und man von SF 10 mit 11 Byte auf SF9 mit maximal 53 Byte beschränkt. Die 53 Byte in USA sind dann ähnlich den 51 Byte in Europa und führen geteilten Telegrammen und eventuellen Anforderungen zur Wiederholung. Bei 2794 ms für 51 Byte für das erste gesplitterte Telegramm und das Folgetelegramm plus 1810 ms wird der Funkkanal $2794 \text{ ms} + 2794 \text{ ms} + 1810 \text{ ms} = 7398 \text{ ms}$ belegt. Nimmt man die 2 notwendigen Wiederholungen hinzu, wird der Kanal ca. 22 Sek. mit 6 Telegrammen belegt. Mit 1 % Duty-Cycle darf nun $22 \text{ Sek.} \times 99 = 2178 \text{ Sek.}$ (36 Min) meine weitere Meldung mehr gesendet werden. Hinzu kommt, dass ein LoRaWAN-Gateway auf 360 Sekunden Download für alle Teilnehmer für die Anforderung von Meldungen begrenzt ist. Die notwendige Gegenmaßnahme ist die Reduktion auf SF 11 oder besser SF 10. SF10 bedeutet aber ca. 6 dB Verlust im Linkbudget bei LoRaWAN.

LPWAN für bewegte Objekte

Da das maximale Linkbudget bei Sigfox statisch ist und nicht nachgeregelt wird, kann Sigfox gut für bewegte Objekte benutzt werden. Der Nachteil ist der gleichmäßig hohe Energieverbrauch durch die fehlende Regelung.

LoRaWAN regelt im Prinzip nur bei der Anmeldung am Gateway das Linkbudget nach. Das Verfahren wird Adaptive Data Rate (ADR) genannt. Das führt bei bewegten Objekten zu einem hohen Paketverlust oder bei festem hohen Spreizfaktor zu unnötig hohem Energieverbrauch. Der Paketverlust ist 100 %, wenn zum Beispiel durch ADR ein Spreizfaktor von 10 ausgehandelt wurde und Faktor 11 oder gar 12 benötigt wird. Sobald der ausgehandelte Spreizfaktor mit ADR zu niedrig ist, sind 100 % Paketverlust unausweichlich.

NB-IoT kann für bewegte Objekte genutzt werden. Durch das fehlende Handover wird ein NB-IoT-Modul die Verbindung zur Basisstation so lange wie möglich halten, obwohl eventuell eine weitere Basisstation in der Nähe ist, welche den Energieverbrauch reduzieren könnte. Ein NB-IoT-Modul wechselt erst zu einer neuen Station, nachdem die Verbindung abgerissen ist. Ein solcher Wechsel bedeutet, dass es Funkmodule kurzzeitig nach der Basisstation sucht. Da die Sendefrequenz gleich ist, dauert dies nicht sehr lange. Wenn die sogenannte Tracking-Area-Zone dieselbe geblieben ist, dann ist keine komplette Anmeldung notwendig. Es erfolgt ein sogenannter Reattach. Das benötigt mehr Zeit und Energie als ein Attach.

Den Energieverbrauch in jedem LPWAN-Netzwerk darf man nicht nur bei einem Extrema betrachten. Man muss das wechselnde Linkbudget und somit den dynamischen Verbrauch mit berücksichtigen. Für NB-IoT und LoRaWAN gilt, dass der Netzbetreiber den Energieverbrauch mit der Dichte der Basisstation optimieren kann. Je dichter die Basisstationen platziert werden, desto kleiner wird der zu erwartende mittlere Verbrauch aller Teilnehmer im Netz. NB-IoT ist bei einem Netz mit 144 oder 154 dB Linkbudget bei der Versorgung in Gebäuden über hohe Masten außerhalb vom Gebäude LoRaWAN EU überlegen. Für lokale LPWAN in einer Immobilie ist LoRaWAN dem NB-IoT überlegen, da es in Stufen von ca.

3 dB über den Spreizfaktor 7 - 12 feiner nachregeln kann. Dies wird zum Teil in deutschen LoRaWAN-Netzen umgesetzt. Das fehlende Handover bei NB-IoT führt durch die Verschleppung der Basisstation zu einem unnötig hohen Energieverbrauch. Der kurzzeitige Abriss einer Verbindung bei NB-IoT und der erneute Aufbau benötigt nur wenige Sekunden. Im Gegensatz dazu ist Sigfox durch das Duty-Cycle auf einen Takt von 10 Minuten begrenzt. LoRaWAN EU SF12 kann mit 36 Sekunden maximaler Sendezeit durch Duty-Cycle und ca. 4,5 Sekunden (inklusive 2 Wiederholungen) Kanalbelegung nur ca. alle 8 Minuten senden. LoRaWAN ist eine gute Alternative, wenn man ein eigenes privates LPWAN errichten muss. Wenn man das reale äußerste Linkbudget beachtet oder sogar auf Spreizfaktor 11 und 12 verzichtet und damit die ca. 141 dB Linkbudget auf 135 dB bei SF10 reduziert, dann ist ein LPWAN mit LoRaWAN mit primären Upload ähnlich Sigfox umsetzbar.

Ein absolute Aussage, welches der drei LPWAN-Protokolle im Energieverbrauch besser ist, kann man nicht treffen. Betrachtet man den Bereich für das Linkbudget (LB) von 144 bis 154 dB, dann ist NB-IoT von 12 Byte bis 512 Byte besser als das Protokoll von LoRaWAN und Sigfox. 154 dB LB sind mit LoRaWAN EU nur im Labor möglich. Unterhalb von 134 dB LB wird LoRaWAN besser als NB-IoT, wenn man die Anzahl der Teilnehmer klein hält und die Anzahl der Meldungen pro Stunde begrenzt. Ein Paketverlust kann durch Kollision mit Teilnehmern im eigenen LPWAN-Netz und durch andere Teilnehmer in anderen Funknetzen (z. B. anderes LoRaWAN, Sigfox, W-Mbus) hervorgerufen werden. Auf den zu erwarteten Verlust weisen die erwähnten Studien der Hochschule Offenburg, der Universität in Singapur und der Universität in Aalborg in Dänemark hin. Der Paketverlust wird bei LoRaWAN EU beim Betrieb von Sensoren und Gateway im gleichen Gebäude deutlich niedriger sein, weil andere Teilnehmer außerhalb um 15 bis 20 dB an der Außenwand gedämpft werden. LPWAN bedeutet aber Long Range Wide Area Network, und ein Funknetz im Gebäude ist invers zu „Long Range“.