

Funkkommunikation in der Wasserwirtschaft – Anforderungsprofile und Bewertung der Eignung von Low Power Wide Area Networks

Lisa Underberg, Jens Alex, Lutz Rauchhaupt
Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg
IKT und Automation

Werner-Heisenberg-Str. 1
39106 Magdeburg
lisa.underberg@ifak.eu
jens.alex@ifak.eu
lutz.rauchhaupt@ifak.eu

Abstract: Die Branche der Wasserwirtschaft ist traditionell mit für unsere Gesellschaft infrastrukturkritischen Aufgaben betraut. Entsprechend wird bei der Einführung neuer Technologien besondere Vorsicht walten gelassen. Gleichzeitig steigt der Optimierungsdruck auf Akteurinnen und Akteure der Wasserwirtschaft, beispielsweise durch steigende Bevölkerungsdichte bei gleichbleibendem Wassernetz. Vor diesem Hintergrund gewinnen Funkkommunikationssysteme an Relevanz, denn sie sind gut nachrüstbar und je nach Anforderung für einen Batteriebetrieb geeignet. In diesem Beitrag werden Anforderungsprofile an die Funkkommunikation von Anwendungen der Wasserwirtschaft vorgestellt. Die Profile wurden aus Umfragen im Rahmen von deutschlandweiten Workshops mit Akteurinnen und Akteuren der Wasserwirtschaft durchgeführt. Es wurden qualitative und quantitative Anforderungen erfasst. Es wurden zwei Profile extrahiert, die Anwendungen mit ähnlichen Anforderungen an die Funkkommunikation zusammenfassen: Anwendungen der Zustandsüberwachung und Regelungsanwendungen. Die Eignung von Low Power Wide Area Network (LPWAN)-Technologien wird sowohl für die Zustandsüberwachung als auch für Regelungsanwendungen diskutiert. Dabei werden Aspekte wie das Betreibermodell und das genutzte Frequenzspektrum berücksichtigt.

1 Einleitung

Die Branche der Wasserwirtschaft befasst sich mit Themen rund um Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung. Traditionell ist diese Branche daher in unserer Gesellschaft mit infrastrukturkritischen Aufgaben betraut und verhält sich entsprechend konservativ, auch wenn es um die Nutzung von Funksystemen für ihre Anwendungen geht. Gleichzeitig steigt der Druck zum Beispiel durch steigende Bevölkerungsdichten bei gleichbleibenden Wassernetzen auf Ver- und Entsorger sowie Verbände Abläufe in ihren Bauwerken und Wassernetzen zu optimieren. Vor diesem Hintergrund steigt das Interesse an Funksystemen aufgrund ihrer einfachen Nachrüstbarkeit aktuell an.

Das ifak richtete Anfang 2021 Workshops für Akteurinnen und Akteure der Branche aus ganz Deutschland aus, während derer zum einen über Funksysteme informiert und zum anderen eine Anforderungserfassung qualitativer sowie quantitativer Aspekte entsprechend [1] durchgeführt wurde. Auf Basis dieser Anforderungserfassung wurden zwei Anforderungsprofile für die Funkkommunikation abgeleitet.

Aus den Anforderungsprofilen wird deutlich, dass Anwendungen der Wasserwirtschaft im Vergleich zu anderen industriellen Anwendungen große zu überbrückende Entfernungen haben, während ihr Sendezeitabstand gleichzeitig vergleichsweise groß ist. Diese Anforderungen passen grob zu Leistungsprofilen von Low Power Wide Area Network (LPWAN)-Technologien. Im Detail ist die Betrachtung einzelner Technologien notwendig, um deren Eignung für die beiden Anforderungsprofile zu bewerten.

In diesem Beitrag werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede von LPWANs hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Eignung für wasserwirtschaftliche Anwendungen beleuchtet. Ein Aspekt ist die Nutzung von lizenziertem Spektrum (z.B. NB-IoT, LTE-M) oder unlizenziertem Spektrum (z.B. LoRaWAN, Mioty, Sigfox, Weighless). Bei ersterem ist der Anwender wirtschaftlich und technologisch von einem Netzbetreiber abhängig, während im unlizenzierten Spektrum zumeist die Wahl zwischen einem Netzbetreiber und dem Aufbau eines eigenen Netzes besteht. Dahingegen gilt im unlizenzierten Spektrum eine strenge Begrenzung der Sendeleistung und -dauer, insbesondere, wenn kein Listen-before-talk (LBT) verwendet wird. Da letzteres für LPWAN-Technologien einen unerwünscht erhöhten Energiebedarf bedeutet, wird in der Regel auf LBT verzichtet. In diesem Spannungsfeld wird dieser Beitrag die Eignung von LPWANs für infrastrukturkritische Aufgaben in der Wasserwirtschaft einordnen.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Kapitel 2 beschreibt die aus der Umfrage abgeleiteten Anforderungsprofile sowohl qualitativ als auch quantitativ. Eine allgemeine Übersicht über LPWAN-Technologien wird in Kapitel 3, worauf aufbauend in Kapitel 4 die Eignung einzelner Technologien für wasserwirtschaftliche Anwendungen diskutiert wird. Kapitel 5 fasst zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Anforderungsprofile der Wasserwirtschaft

Bereits seit 2007 werden Anforderungsprofile industrieller Anwendungen an Kommunikationssysteme diskutiert, was durch die Erstveröffentlichung von VDI/VDE Richtlinie 2185 Blatt 1 und [2] markiert wird. Seitdem gab es zahlreiche Versuche, Anforderungen industrieller Anwendungen strukturiert zu beschreiben und zu konsolidieren. Einen Überblick zu diesem Prozess gibt [3]. Zuletzt flossen diese Bemühungen in die Überarbeitung der VDI/VDE Richtlinie 2185 Blatt 1 [1], Spezifikationen und Reporte der 3GPP [4, 5, 6] und White Paper der 5G-ACIA [7, 8] ein. Anforderungen der Wasserwirtschaft als spezielle Untergruppe industrieller Anwendungen wurden bisher allerdings nicht erfasst, obwohl diese von den verfügbaren Anforderungsprofilen nicht abgedeckt werden.

Aus den Umfrageergebnissen wurden zwei Anforderungsprofile abgeleitet. Anforderungsprofil A umfasst Anwendungen, in denen das Funksystem zur Zustandsüberwachung eingesetzt werden soll. Hier geht es um das regelmäßige und zuverlässige Erfassen und Übertragen von Messwerten beispielsweise zur Gewässerüberwachung. Im Gegensatz zur reinen Zustandsüberwachung soll in Anwendungen, welche in Profil B erfasst werden, steuernd in einen Prozess eingegriffen werden. Ein Beispiel ist die Regelung eines Mischwasserkanalnetzes.

Die quantitativen Parameter der Anforderungsprofile sind in Tabelle 2 zusammengefasst und in Abb. 1 graphisch dargestellt. Je Anwendungsgruppe ist je ein Anforderungsprofil für den zu erwartenden Maximalwert sowie für den Median angegeben.

Anwendungen der Zustandsüberwachung haben seltener einen Übertragungsbedarf, doch deren Datenpakete sind größer als die der steuernd eingreifenden Anwendungen. Die Anzahl logischer Links und die

Tabelle 1: Quantitative Parameter der Anforderungsprofile der Wasserwirtschaft

	Anforderungsprofil A		Anforderungsprofil B	
	Median	Extremwert	Median	Extremwert
Übertragungszeit	1 h	1 min	1 min	< 1 min
Sendezeitabstand	1 h	15 min	30 s	1 s
Anzahl logischer Links	30	100	10	30
Nutzdatenlänge	500 kB	100 MB	1 kB	10 kB
Distanz	1 km	>30 km	1 km	10 km

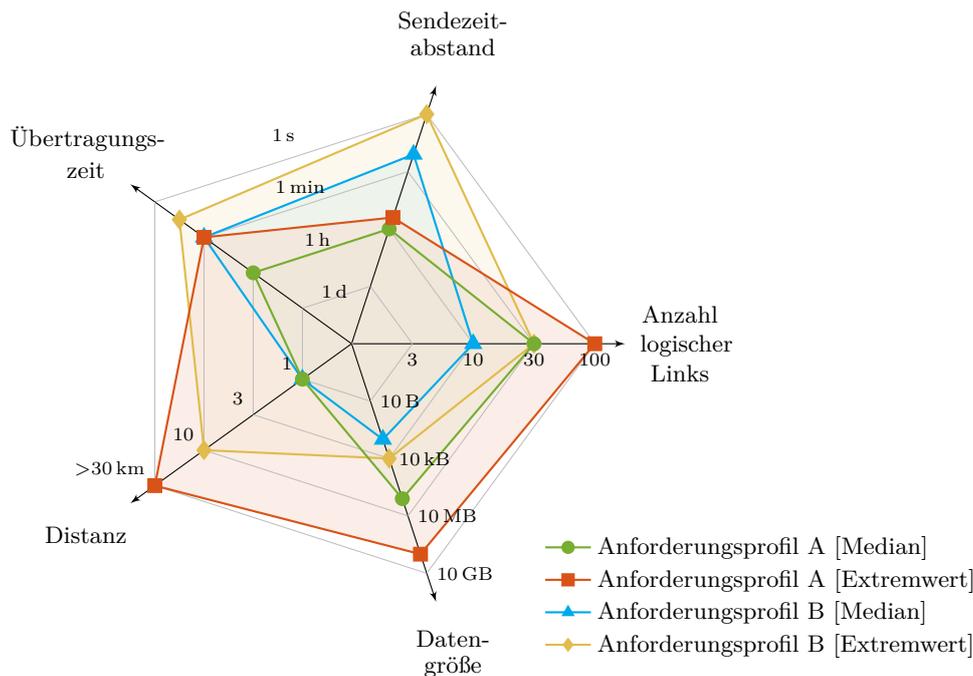


Abbildung 1: Anforderungsprofile A und B der Wasserwirtschaft extrahiert aus Umfrageergebnissen.

zu überbrückende Distanz sind bei der Zustandsüberwachung ebenso größer, während sie längere Übertragungszeiten tolerieren. Insgesamt fällt auf, dass für beide Anwendungsgruppen bereits angenommen wird, dass lokal Daten mehrerer Sensoren und Aktoren aggregiert werden, woraus die Nutzdatenlängen zwischen 1 kB und 100 MB resultieren. Die Daten sollen lediglich per Funk an einer zentral erreichbaren Stelle zusammengeführt werden.

Hinsichtlich der qualitativen Anforderungen gleichen sich beide Profile. Ausfallsicherheit beispielsweise durch Redundanz, besonders im Falle von Notlagen wie Großwetterereignissen oder Hochwasser sowie Verschlüsselung und Authentifizierung nach dem Stand der Technik sind von Bedeutung. Sind Daten verschlüsselt, sind Speichern und Übertragen in nicht firmeneigener Infrastruktur unkritisch. Entsprechend der recht unveränderlichen Rahmenbedingungen wie einem begrenzten Stadtgebiet oder einer begrenzten Anzahl an Gewässern ist die Skalierbarkeit der Anwendungen gering bis moderat. Die Anforderungen an die Nutzerfreundlichkeit sind hoch, denn die Daten müssen auch für nicht-Expertinnen und -Experten einfach zugänglich und übersichtlich aufbereitet werden. Im Idealfall ist sogar die Installation und Inbetriebnahme ohne IT- oder Funk-Fachkenntnis möglich. Das Kommunikationssystem sollte zudem wartungsarm sein, also beispielsweise eine lange Batterielaufzeit aufweisen. Insbesondere aufgrund des mehrere Dekaden langen Lebenszyklus' von wasserwirtschaftlichen Anlagen ist eine langfristige Investitionssicherheit und kommerzielle Verfügbarkeit nötig.

3 Übersicht über LPWAN-Technologien

Low Power Wide Area Networks (LPWANs) gewinnen in der Branche der Wasserwirtschaft zunehmend Aufmerksamkeit, da ihre zentralen und namensgebenden Eigenschaften der Überbrückung großer Distanzen (Wide Area) bei gleichzeitig geringem Energiebedarf (Low Power) Kernanforderungen ihrer Anwendungen abdecken.

Neben diesen Eigenschaften weisen LPWAN-Technologien einen ähnlichen grundlegenden Aufbau auf, welcher verallgemeinert in Abb. 2 dargestellt ist. Endgeräte, welche in der Regel Sensoren und Aktoren beinhalten oder mit ihnen verbunden sind, kommunizieren mit zentralen Einheiten des Funksystems, welche beispielsweise technologiespezifisch als Basisstationen oder Gateway bezeichnet werden. Der Anteil des LPWAN-Funknetzes ermöglicht grundsätzlich bidirektionalen Datenaustausch, ist jedoch vornehmlich auf Übertragungen von Endgerät zu zentralem Netz, dem Uplink (UL) ausgelegt. Übertragungen in die

Gegenrichtung, im Downlink (DL), sind oft nachgeordneter Priorität. Beispielsweise können Downlink-Übertragungen häufig nur auf Uplink-Übertragungen folgen, da die Funkgeräte ansonsten zugunsten eines geringen Energiebedarfs nicht erreichbar sind („Sleep mode“). Über Funkstrecken, die andere Technologien nutzen, oder über kabelgebundene Netze werden die Daten an einem zentralen Ort, zum Beispiel einer Cloud oder einem Server, zusammengeführt. Auf die zusammengeführten Daten wird durch ein Auswertungswerkzeug zugegriffen. Dieses Werkzeug kann individuell gestaltet werden oder bereits durch die Technologie vorbereitet sein. LPWAN-Technologien unterscheiden sich darin, welcher Anteil des Netzes in Eigenverantwortung betrieben und welcher Anteil von einem Netzbetreiber übernommen werden kann. Einige Technologien erlauben, dass der Endanwender entscheidet, an welcher Stelle der Übergang zwischen eigenverantwortlich betriebener und von Dritten betriebener Infrastruktur liegt.

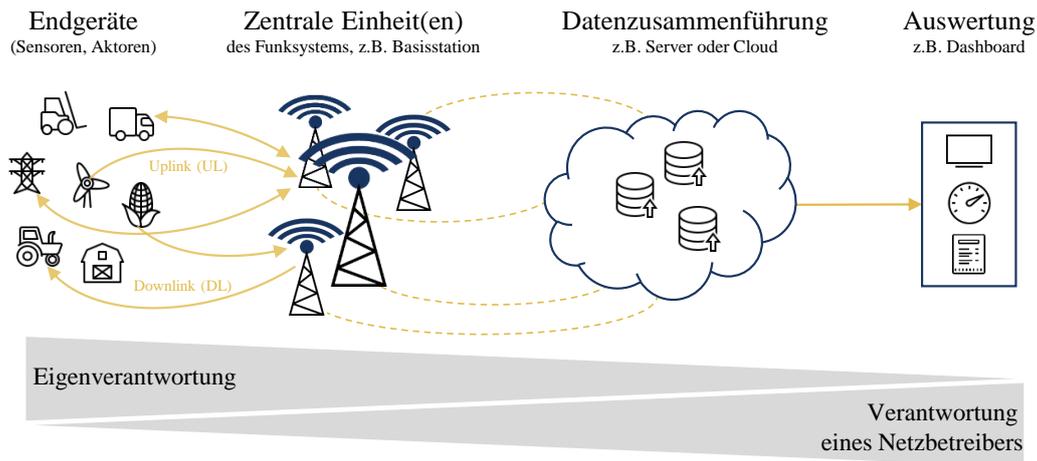


Abbildung 2: Komponenten einer LPWAN-Technologie in verallgemeinerter Darstellung.

Typischerweise nutzen LPWANs das Sub-1 GHz-Frequenzband, da dessen große Wellenlängen eine hohe Reichweite und eine gute Gebäudedurchdringung begünstigen. Je nach Technologie wird ein lizenziertes oder lizenzfreies Frequenzband verwendet. Für die Technologien, die einen lizenzfreien Frequenzbereich nutzen, gilt eine Regulierung nicht nur für die maximale äquivalente, isotrope Strahlungsleistung (engl. „equivalent isotropically radiated power“ (EIRP)), sondern auch für den Kanalzugriff. Falls keine Verfahren wie „Listen before Talk“ oder „Adaptive Frequency Agility“ verwendet werden, gilt eine Beschränkung der maximalen Kanalbelegungsdauer, welche über den „Duty Cycle“ angegeben wird. Tabelle 3 fasst die Regulierung entsprechend EN 300 220-2, Tabelle B.1 [9] zusammen.

Tabelle 2: Sendeleistungs- und Sendezeitbegrenzungen für Nutzung lizenzfreien Spektrums [9]

Band	Frequenzbereich	Sendeleistung (EIRP)	Duty Cycle
K	863 MHz bis 865 MHz	25 mW	$\leq 0,1 \%$
L	865 MHz bis 868 MHz	25 mW	$\leq 1 \%$
M	868,0 MHz bis 865,6 MHz	25 mW	$\leq 1 \%$
N	868,7 MHz bis 869,2 MHz	25 mW	$\leq 0,1 \%$
P	869,4 MHz bis 869,65 MHz	500 mW	$\leq 10 \%$
P	869,7 MHz bis 870 MHz	5 mW	Keine
Q	869,7 MHz bis 870 MHz	25 mW	$\leq 1 \%$

Für LPWANs kann in der Regel angenommen werden, dass der Duty Cycle angewendet wird, da komplexere Kanalzugriffsverfahren den Energiebedarf erhöhen und damit die Batterielaufzeit verringern.

Entsprechend darf die Sendedauer maximal 10 % betragen. Eine Ausnahme ist Band P, das allerdings durch die kleine Sendeleistung von maximal 5 mW und die damit signifikant kleinere Reichweite für die meisten Anwendungen von LPWANs uninteressant ist.

Eigenschaften verschiedener, aktuell kommerziell verfügbaren LPWAN-Technologien sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Während NB-IoT und LTE-M ausschließlich von Netzbetreibern in lizenzierten Frequenzbändern genutzt werden, verwenden LoRaWAN [10], mioty [11], Sigfox [12] und Weightless [13] das lizenzfreie ISM-Band bei 868 MHz. Für Technologien im lizenzfreien Spektrum sind unterschiedliche Betreibermodelle möglich.

Eine technologieinhärente Verschlüsselung bieten alle Technologien außer Sigfox. Bei LoRaWAN und mioty wird AES 128 verwendet. Sigfox verschlüsselt zwar nicht innerhalb der Verarbeitung die Daten, doch es ist möglich, applikationsseitig eine Verschlüsselung zu implementieren. Eine Authentifizierung bieten alle Technologien. In mioty wird ein Cypher-based Message Authentication Code (CMAC) verwendet.

Hinsichtlich der maximal erreichten Datenrate unterscheidet sich LTE-M als Mid-Rate LPWAN-Technologie von den anderen Technologien, welche den Low-Rate-LPWAN-Technologien zugeordnet werden. Die Nutzdatenlänge hängt bei NB-IoT und LTE-M vom Netzbetreiber und dem jeweils geschlossenen Vertrag ab, während sie bei LoRaWAN, mioty und Weightless auf etwa 250 B begrenzt ist. Sigfox beschränkt die Nutzdatenlänge mit maximal 12 B im Uplink besonders stark. Pro Stunde dürfen bei Sigfox außerdem maximal 72 B übertragen werden.

Wegen ihrer Robustheit werden vornehmlich eine Frequenzmodulation oder eine Phasenmodulation kleiner Ordnung verwendet (Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK), Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK), Quadratur Phase Shift Keying (QPSK), Offset-QPSK (O-QPSK)). Bei mioty wird eine GMSK mit dem in ETSI TS 103 357 [14] beschriebenen Telegram Splitting Ultra Narrow Band (TS-UNB) kombiniert. Einzig LoRaWAN greift auf ein Spreizverfahren (Chirp Spread Spectrum (CSS)) zurück. Wie stark ein Signal gespreizt wird, wird durch den Spreizfaktor (SF) angegeben, welcher bei LoRaWAN zwischen 7 und 12 liegt. Bei allen Technologien ist die Kanalbandbreite entsprechend des Sub-1-GHz-Bandes eher klein.

Die je Technologie erreichbaren Reichweiten werden unterschiedlich angegeben [15, 16], und in der Regel wird zwischen urbaner und ruraler Umgebung unterschieden. Die Reichweite kann entweder über die verwendete Sendeleistung angepasst werden, welche einen Einfluss auf die erreichte Batterielaufzeit hat. Ebenso kann bei LoRaWAN der SF angepasst werden. Ein hoher SF bedeutet eine längere Sendezeit und damit einen höheren Energiebedarf als ein kleiner SF.

Tabelle 3: Eigenschaften von LPWAN-Technologien [16, 17, 18, 19, 20, 15, 10, 11, 12, 13]

	NB-IoT	LTE-M	LoRaWAN	mioty	Sigfox	Weightless
Frequenzband	lizenziert (LTE-Bänder)		Lizenzfrei (Sub-1 GHz-ISM-Band)			
Organisation	3GPP	3GPP	LoRa Alliance	mioty Alliance	Sigfox	Weightless Alliance
Verantwortlichkeit für Infrastrukturgeräte	Netzbetreiber	Netzbetreiber	Netzbetreiber oder in Eigenverantwortung	In Eigenverantwortung	Netzbetreiber oder in Eigenverantwortung	In Eigenverantwortung
Verschlüsselung	LTE-inhärent	LTE-inhärent	AES 128	AES 128	Ohne	Vorhanden
Authentifizierung	LTE-inhärent	LTE-inhärent	Vorhanden	CMAC	Vorhanden	Vorhanden
Datenrate	127 kbit/s DL, 159 kbit/s UL	4 Mbit/s DL, 7 Mbit/s UL	0,3 kbit/s bis 50 kbit/s	0,407 kbit/s	6 Nachrichten je 12 B pro Stunde	0,625 kbit/s bis 100 kbit/s
Länge der Nutzdaten	Abhängig vom Netzbetreiber	Abhängig vom Netzbetreiber	max. 64, 128 oder 235 B abh. vom Spreizfaktor	10 B bis 250 B	0 B bis 12 B UL, 8 B DL	max. 255 B
Modulation	GMSK, QPSK	GMSK	CSS	TS-UNB mit (G)MSK	GFSK (DL), DBPSK (UL)	GMSK, OQPSK
Kanalbandbreite	180 kHz	5 MHz	125 kHz, 250 kHz oder 500 kHz	100 kHz bis 1500 kHz	100 Hz	unidirektional ggf. 100 Hz, sonst 12,5 kHz
Reichweite	Urban: 1 km, rural: 10 km	<15 km	Urban: 5 km, rural: 20 km	Urban: 5 km, rural: 15 km	Urban: 10 km, rural: 40 km	Urban: 3 km, rural: 5 km

4 Eignung von LPWANs für die Wasserwirtschaft

4.1 Erfüllung quantitativer Anforderungen

Inwiefern die quantitativen Anforderungen der in Kapitel 2 abgeleiteten Profile für die beiden Anwendungsgruppen der Wasserwirtschaft erfüllt werden können, kann je Technologie unterschiedlich gut bewertet werden.

Für NB-IoT und LTE-M hängt die Eignung erheblich von der Netzabdeckung durch Netzbetreiber und deren verfügbaren Vertragsmodellen ab. Entsprechend ist für diese beiden Technologien eine individuelle Überprüfung je konkreter Anwendung notwendig.

Die von Sigfox angebotene Datengröße und der angebotene Sendezeitabstand liegen Größenordnungen von den Anforderungen der Anwendungen entfernt. Sigfox erscheint daher für die betrachteten wasserwirtschaftlichen Anwendungen ungeeignet.

Bei mioty, Weightless und LoRaWAN ist eine genauere Überprüfung nötig. Diese drei Technologien arbeiten im lizenzfreien Band und unterliegen dadurch der Regulierung durch den Duty Cycle. Zur Untersuchung der Implikationen durch den Duty Cycle wird beispielhaft im Folgenden LoRaWAN herausgegriffen, da hier durch offene Spezifikation genaue Informationen zum Übertragungsverhalten verfügbar sind. Es werden Übertragungen im Uplink mit einer Kanalbandbreite von 125 kHz betrachtet.

4.1.1 Implikationen der Sendezeitbegrenzung im lizenzfreien Band

Dadurch, dass in der Regel keine Strategien eines komplexeren Kanalzugriffs verwendet werden, sondern die Endgeräte ihren Ruhemodus nur für eine Übertragung möglichst kurz unterbrechen, kann der Kanalzugriff von LoRaWAN analog zu „Pure Aloha“ [21] modelliert werden. Es wird angenommen, dass die Übertragungen voneinander unabhängig und unsynchronisiert sind sowie zufällig innerhalb einer Stunde auftreten. Somit kann die Generierung einer Übertragung mit einer Poissonverteilung modelliert werden. Entsprechend Tabelle 3 darf ein Endgerät bis zu 3,6 s, 36 s oder 360 s pro Stunde einen Übertragungskanal belegen. Für eine Betrachtung der Obergrenze des Durchsatzes wird angenommen, dass jedes Endgerät die erlaubte Sendezeit vollständig ausnutzt. In diesem Verständnis wird eine Zeitstunde in 1000, 100 oder 10 Übertragungszeiteinheiten eingeteilt. Während der laufenden Übertragung ist es möglich, dass ein weiteres Gerät ebenfalls eine Übertragung generiert und es so zu einer Kollision kommt. In diesem Fall wird angenommen, dass beide Datenpakete verloren gehen.

Basierend auf diesen Annahmen und den im Mittel pro Übertragungszeiteinheit generierten Datenpaketen G kann der Durchsatz S , welcher als Verhältnis erfolgreicher Übertragungen zu insgesamt zur Verfügung stehenden Übertragungszeiteinheiten definiert ist, entsprechend Gleichung (1) berechnet werden.

$$S = G \cdot e^{-2G} \quad (1)$$

Abbildung 3 zeigt den Durchsatz S über der Anzahl von physikalischen Links, die jeweils einen logischen Link abbilden und den Übertragungskanal maximal lange entsprechend des Duty Cycles belegen.

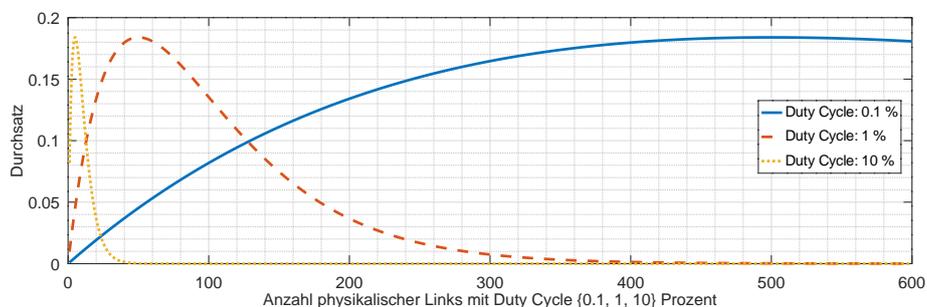


Abbildung 3: Durchsatz über Anzahl von physikalischen Links für drei Duty Cycles.

Der maximale Durchsatz von etwa 18% wird für 5, 50 oder 500 physikalische Links erreicht. Für weniger physikalische Links ist der angebotene Verkehr zu klein, um den maximalen Durchsatz zu erreichen. Bei

mehr physikalische Links entstehend zunehmend Kollisionen, wodurch der Durchsatz sinkt. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls in Abb. 4 deutlich, welche die Kollisionswahrscheinlichkeit zweier Übertragungen zeigt, deren Länge den Duty Cycle jeweils ausnutzt.

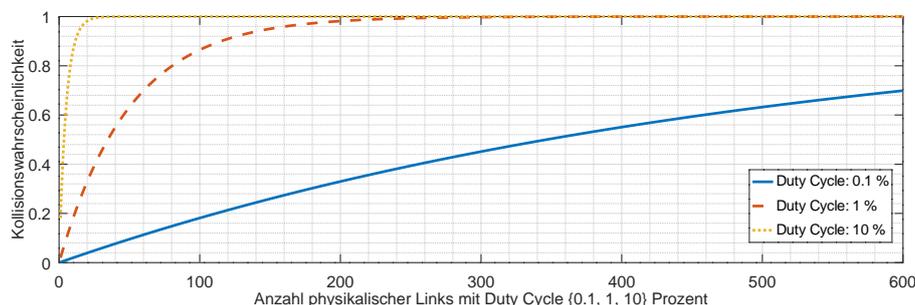


Abbildung 4: Kollisionswahrscheinlichkeit über Anzahl von physikalischen Links für drei Duty Cycles.

Für einen Durchsatz von $S = 0.18$ beträgt die Kollisionswahrscheinlichkeit 63,2%. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Applikation aufgrund eines Paketverlustes nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 36,8% aktuelle Daten zur Verfügung stehen. Mit einer Wahrscheinlichkeit von $0.368^3 = 25.2$ sind die Daten älter als drei Stunden.

4.1.2 Nutzdatenlänge und Sendezeitabstand von LoRaWAN mit 1% Duty Cycle

Um unter Berücksichtigung des Duty Cycles zu ermitteln, welche Kombination von Nutzdatenlänge und Sendezeitabstand mit LoRaWAN möglich sind, wird die Übertragungsdauer T_{oA} benötigt. Sie wird im Folgenden in Gleichung (2) entsprechend [22] berechnet. Als Präambellänge werden 8 Symbole angenommen. Ein Header und Kanalcodierung mit großer Coderate werden verwendet.

$$T_{oA} = T_s \cdot \left(20.25 + \max \left(\left[\frac{8 \cdot l_{usr} - 4 \cdot SF + 44}{4(SF - 2 \cdot k)} \right] \cdot 5, 0 \right) \right) \quad (2)$$

mit

$$k = \begin{cases} 0 & SF \in \{7, 8, 9, 10\} \\ 1 & SF \in \{11, 12\} \end{cases} \quad (3)$$

und

$$T_s = \frac{2^{SF}}{125 \text{ kHz}} \quad (4)$$

Die mit einem Duty Cycle von 1% maximal mögliche Nutzdatenlänge pro Stunde ist für die unterschiedlichen SFs von LoRaWAN in Tabelle 5 dargestellt. Beispielsweise ist für $SF = 7$ die maximale Nutzdatenlänge auf $l_{usr} = 222$ B festgelegt, deren Übertragung $T_{oA} = 369$ ms andauert. Bei dieser Übertragungsdauer können unter Einhaltung des Duty Cycles von 1% pro Stunde 97 Pakete verschickt werden. Die insgesamt innerhalb einer Stunde übertragbaren Datengröße liegt somit bei $222 \text{ B} \cdot 97 = 21\,534 \text{ B}$.

Tabelle 4: Nutzdatenlänge bei LoRaWAN je physikalischem Link pro Stunde für unterschiedliche SFs

SF	Max. Nutzdatenlänge	Sendedauer	Duty Cycle 1%
7	222 B	0,369 s	97 Pakete, 21 534 B
8	222 B	0,646 s	55 Pakete, 12 210 B
9	95 B	0,574 s	62 Pakete, 5890 B
10	31 B	0,534 s	67 Pakete, 2077 B
11	31 B	1,151 s	31 Pakete, 961 B
12	31 B	2,138 s	16 Pakete, 496 B

Tabelle 5: Geforderte mittlere Datenrate sowie mittlere von LoRaWAN bereitgestellte Datenrate

Anforderungsprofil	R_m	LoRaWAN SF	R_m $n_{PL} = 1$	R_m für $n_{PL} = 50$
Profil A Median	33,33 kbit/s	7	47,85 bit/s	2,39 kbit/s
Profil A Extremwert	88 889 kbit/s	8	27,13 bit/s	1,36 kbit/s
Profil B Median	2,67 kbit/s	9	13,09 bit/s	0,65 kbit/s
Profil B Extremwert	2400 kbit/s	10	4,62 bit/s	0,23 kbit/s
		11	2,14 bit/s	0,11 kbit/s
		12	1,1 bit/s	0,06 kbit/s

Mit größerem SF erhöht sich die Sendedauer, wodurch die maximale Nutzdatenlänge kleiner wird. Gleichzeitig wird die Übertragung mit größerem SF robuster. In der Wahl des SF spiegeln sich so die Umgebungsbedingungen sowie die zu überbrückende Distanz zwischen Sender und Empfänger.

4.1.3 Abgleich des LoRaWAN-Leistungsprofils mit den Anforderungsprofilen

In Abschnitt 4.1.1 wird als Sendezeitabstand eine Stunde betrachtet. Mit Blick auf die Anforderungsprofile aus Tabelle 2 und Abb. 1 gilt dieser Sendezeitabstand für nur Profil A [Median]. Um nun die Anforderungsprofile und das Leistungsprofil von LoRaWAN miteinander zu vergleichen, wird im Folgenden die im Mittel benötigte bzw. bereitgestellte Datenrate R_m herangezogen. Wie in Gleichung (5) gezeigt wird sie unter Berücksichtigung der Anzahl der physikalischen Links n_{PL} , der je Link zu übertragenden Nutzdatenlänge l_{usr} und dem Sendezeitabstand Δt berechnet.

$$R_m = \frac{8 \cdot l_{usr} \cdot n_{PL}}{\Delta t} \quad (5)$$

Die im Mittel geforderte Datenrate ist in Tabelle 6 je Anforderungsprofil genannt. Dem sind die mit LoRaWAN im Mittel erreichbaren Datenraten bei einem Duty Cycle von 1% für einen und für 50 physikalische Links (PL) gezeigt. Dabei wird die in Tabelle 5 berechnete Nutzdatenlänge pro Stunde zugrunde gelegt. Die im Mittel geforderte Datenrate liegt zwischen 2,67 kbit/s and 88 889 kbit/s. Dagegen können mit LoRaWAN nur je Gerät 47,85 bit/s erreicht werden. Werden insgesamt 50 physikalische Links genutzt, kann die Datenrate bis zu 2,39 kbit/s betragen. Diese Datenrate reicht auf den ersten Blick fast für das Anforderungsprofil B [Median] aus, doch bleibt zu prüfen, inwiefern Applikationen dieses Profils mit einer Paketverlustrate von mindestens 63% umgehen.

Insgesamt zeigt der Vergleich von Anforderungs- und Leistungsprofilen, dass LPWANs, die im unlicenzierten Band arbeiten, für die Erfüllung der quantitativen Anforderungen der ermittelten Profile der wasserwirtschaftlichen Anwendungen nicht ausreichen.

4.2 Erfüllung qualitativer Anforderungen

Erweist sich das Leistungsprofil einer Technologie als für ein Anforderungsprofil geeignet, kann die Erfüllung der qualitativen Anforderungen den entscheidenden Einfluss auf die Entscheidung für oder gegen eine Kommunikationslösung nehmen. Zu qualitativen Anforderungen wurden die Aspekte Ausfallsicherheit, beispielsweise durch Redundanz, Verschlüsselung und Authentifizierung, Skalierbarkeit der Funkkommunikationslösung, Nutzerfreundlichkeit, kommerzielle Verfügbarkeit und Investitionssicherheit genannt.

Die Ausfallssicherheit ist ein Parameter, der zum Teil durch das Leistungsprofil abgedeckt werden kann. Ein anderer Anteil betrifft die Wahl des Betreibermodells. Ob es für eine spezifische Anwendung sinnvoll ist, ein eigenes Netz zu betreiben oder auf einen Netzbetreiber zurückzugreifen, kann Einfluss auf die Verfügbarkeit des Netzes haben. Es ist denkbar, dass im Sinne von redundanten, eventuell sogar technologisch voneinander unabhängigen Kommunikationslösungen verschiedene Betreibermodelle parallel genutzt werden. Die Flexibilität kommt den Anforderungen der wasserwirtschaftlichen Anwendungen entgegen.

Verschlüsselung und Authentifizierung sind, außer für Sigfox, technologieseitig gegeben. Der Nutzung öffentlicher Infrastruktur steht damit aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Anwendungen nichts entgegen. Hinsichtlich der Skalierbarkeit zeigt bereits der Abgleich der quantitativen Parameter der Leistungs- und Anforderungsprofile, dass LPWANs nicht ausreichen. Entsprechend sind selbst die moderaten Anforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit eine Herausforderung.

Komplexe Aufgaben entsprechend Anforderungsprofil B brauchen vermutlich aufwändigere Darstellungs- und Auswertungsoptionen als Aufgaben der Zustandsüberwachung entsprechend Anforderungsprofil A, wodurch die Komplexität der Nutzeroberfläche größer sein könnte. Ob die resultierende Nutzerfreundlichkeit für den avisierten Anwendungsfall ausreicht, ist je spezifischem Anwendungsfall zu betrachten. Die kommerzielle Verfügbarkeit scheint für verschiedene Technologien und verschiedene Komplettlösungen gut, doch ob die angebotenen Geräte tatsächlich ausreichen, ist individuell zu prüfen.

Da das Interesse an LPWANs im Moment einen Schub erfährt, ist bisher nicht abzusehen, ob eine Technologie sich durchsetzt, oder welche Technologien am Markt koexistieren werden. Die Investitionssicherheit muss entsprechend ebenfalls individuell bewertet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis einer Umfrage, an der bundesweit Akteurinnen und Akteure der Wasserwirtschaft teilnahmen, wurden Anforderungsprofile für zwei Gruppen von Anwendungen der Wasserwirtschaft entwickelt. Anwendungen, welche Aufgaben der Zustandsüberwachung ausführen, werden durch das Anforderungsprofil A repräsentiert, werden Anforderungsprofil B Anwendungen umfasst, die auch steuernd in einen Prozess eingreifen. Aufgrund der großen zu überbrückenden Distanz und den teilweise unzugänglich und abgelegenen platzierten Sensoren und Aktoren erscheinen Funkkommunikationstechnologien der Low Power Wide Area Networks (LPWANs) interessant.

Über sieben aktuell kommerziell verfügbare LPWAN-Technologien wurde ein kurzer Überblick gegeben. Potentiell scheinen alle Technologien, außer Sigfox, geeignet zu sein. Doch eine genauere Analyse unter Berücksichtigung der Sendezeitbegrenzung durch den regulatorisch vorgegebenen Duty Cycle zeigt, dass die im Mittel verfügbare Datenrate nicht für die betrachteten Anwendungen ausreicht. Es wurde deutlich, dass sich ein (Funk-)medienzugriff ohne Maßnahmen wie „Listen before talk“ positiv auf den Energieverbrauch auswirkt, allerdings mit Nachteilen eines unkoordinierten Protokolls umgehen muss. Der Betrieb eines Funksystems an den Grenzen des Duty Cycles führt zu erheblichen Paketverlusten von sogar über 60% beim Maximum des Durchsatzes von 18%. Selbst, wenn diese Kollisionswahrscheinlichkeit in Kauf genommen werden kann, reicht die bereitgestellte Datenrate nicht aus. Die Rolle qualitativer Anforderungen beispielsweise an das Betreibermodell, die Nutzerfreundlichkeit oder die Investitionssicherheit wurde diskutiert. Allerdings muss individuell festgestellt werden, inwiefern eine konkrete Kommunikationslösung den jeweiligen Anforderungen genügt.

Um für Anwendungen der Wasserwirtschaft eine geeignete Funktechnologien zu identifizieren, kann an verschiedenen Punkten weitergearbeitet werden. Auf Basis des Überblicks zu konkreten LPWAN-Technologien können im nächsten Schritt Akteurinnen und Akteure der Wasserwirtschaft ihr Anforderungsprofil überdenken. Hieraus ergibt sich gegebenenfalls eine Anpassung der Anforderungen, zum Beispiel eine Reduktion der Nutzdatenlänge durch applikationsseitige Vorverarbeitung der Sensordaten (Edge Computing).

Hinsichtlich der Funkkommunikationstechnologien könnten NB-IoT und LTE-M für einen spezifischen Anwendungsfall analysiert werden. Außerdem könnte das Protokoll von Technologien, die das lizenzfreie Band nutzen, angepasst werden, um den Durchsatz zu verbessern. Hier könnte eine Synchronisation der Funkgeräte die Kollisionswahrscheinlichkeit verringern, ohne dass Verfahren wie „Listen before talk“ implementiert werden müssten (analog zu „Slotted Aloha“).

6 Hinweis

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben „Industrial Radio Lab Germany“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 16KIS1013 gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI/VDE, “Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik - Anforderungen und Grundlagen,” *VDI/VDE Richtlinie 2185 Blatt 1*, 2020.
- [2] G. Scheible, D. Dzung, J. Endresen, and J. E. Frey, “Unplugged but connected [design and implementation of a truly wireless real-time sensor/actuator interface],” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 25–34, 2007.
- [3] L. Underberg and S. Willmann, “Categorization of industrial communication requirements as key to developing application profiles,” *IFAC World Congress*, 2020.
- [4] 3GPP, “TR 22.804, V16.2.0, Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on Communication for Automation in Vertical Domains (Release 16) [Revision 2018-12],” 2017.
- [5] 3GPP, “Technical Specification 22.104: Group Services and System Aspects; Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; Stage 1 (Release 16), V16.1.0,” March 2019.
- [6] 3GPP, “Technical Specification 22.104: Group Services and System Aspects; Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 16), V16.7.0,” March 2019.
- [7] 5G-ACIA, “Key 5G Use Cases and Requirements,” *White Paper*, May 2020.
- [8] 5G-ACIA, “A 5G Traffic Model for Industrial Use Cases,” *White Paper*, November 2019.
- [9] ETSI EN 300 220, “Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment; V3.2.1,” 2018.
- [10] LoRa Alliance. <https://lora-alliance.org/>. Accessed: 24 Sep 2021.
- [11] mioty Alliance. <https://mioty-alliance.com/>. Accessed: 24 Sep 2021.
- [12] Sigfox S.A. <https://www.sigfox.com/en>. Accessed: 24 Sep 2021.
- [13] Weightless Alliance. <https://www.weightless-alliance.org/>. Accessed: 24 Sep 2021.
- [14] ETSI TS 103 357, “Short Range Devices; Low Throughput Networks (LTN); Protocols for radio interface A; V1.1.1,” 2018.
- [15] L. Chettri, “A comprehensive survey on internet of things (iot) toward 5g wireless systems,” in *IEEE Internet of Things Journal, Bd. 7*, 2018.
- [16] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment,” in *ICT Express, vol. 5, no. 1, pp. 1-7*, March 2019.
- [17] Weightless SIG, “Weightless-P System Specification V1.0,” 2015.
- [18] LoRa Alliance, “LoRaWAN (TM) V1.0.3 Specification,” 2018.
- [19] S. Popli, R. K. Jha, and S. Jain, “A survey on energy efficient narrowband internet of things (nbiot): Architecture, application and challenges,” in *IEEE Access, pp. 16739 - 16776*, November 2018.
- [20] ubiik, “Weightless LPWAN Low Power Wide Area Networking Product Catalogue.” https://www.european-utility-week.com/___media/libraries/brochures/782C0264-DE2B-F4D2-012E47E2EEF3DB72-document.pdf, 2018. Accessed: 24 Sep 2021.
- [21] N. Abramson, “THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications,” *Fall Joint Computer Conference*, vol. 37, pp. 281–285, 01 1977.
- [22] SEMTECH, “SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Design Guide.” <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRa%20Design%20Guide.pdf>, 2013. Accessed: 24 Sep 2021.