

Ortungssysteme mit wesentlich weniger oder ganz ohne Sensorkabel

Horst KÜHNICKE ¹

¹ Kühnicke Embedded Real Time (KERT), Dresden

Kontakt E-Mail: kert@u-boehm.de

Kurzfassung 2017 haben wir auf dem 21. Kolloquium Schallemission in Fulda AE-Sensoren mit integriertem Schallemissionssystem vorgestellt. Hauptziele dieser Entwicklung waren das Miniaturisieren der Systeme, die Einbindung in bekannte Netzarchitekturen (WLAN, Power over Ethernet) und die Bedienung durch eine breite Palette von Computern (Desktop, Notebook, Smartphone). Mehr als Nebeneffekt gedacht, spart die WLAN-Variante auch die Sensorkabel ein.

In Gesprächen mit Anwendern wurde oft der Wunsch geäußert, die Kabel von Ortungssystemen einzusparen. Solche Systeme benötigen bei der Prüfung von großen Objekten oft Sensorkabel mit einer Gesamtlänge von einigen Kilometern. Das Verlegen der Kabel nimmt einen erheblichen Zeitaufwand bei der Installation des Ortungssystems in Anspruch. Volumen und Gewicht der Kabel sind größer als die des Messsystems.

Die bisherigen Systeme beherrschen jedoch keine Ortung. Die Schwierigkeiten resultieren in erster Linie aus der notwendig hohen Genauigkeit der Zeitdifferenzmessung zwischen den Kanälen. Für eine große Zahl von Kanälen sind die Datenmengen ein weiteres Problem. Diese können bei der drahtlosen Variante von den Sensoren nicht parallel gesendet werden, sondern müssen versetzt nacheinander übertragen werden.

Die hier vorgestellten Weiterentwicklungen haben das Ziel, die Kabellängen für Ortungssysteme erheblich zu reduzieren oder ganz einzusparen. Die Ergebnisse werden am Beispiel einer Tankbodenmessung präsentiert. Bei einem Tankdurchmesser von 25 m wird mit der neuen Ethernet-Variante die Gesamtkabellänge bei einem 32-Kanalsystem von 2240 m auf 200 m reduziert. Die WLAN-Variante erreicht eine Reduktion von 2240 m auf 80 m. Allgemein werden bei der Ethernet-Variante nur noch Kabel mit einer Länge des maximal auftretenden Sensorabstands verwendet. Die WLAN-Variante benötigt lediglich Kabel zwischen sehr wenigen Mid Devices. In vielen Anwendungsfällen können auch diese Kabel durch ein drahtloses 5-GHz-Netz ersetzt werden. Die Ethernet-Variante ist leistungsfähiger und arbeitet insbesondere auch in der Umgebung von vielen großen Metallteilen stabil.

Die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Ortungssysteme entspricht bis auf die zwei folgenden Ausnahmen der von modernen Systemen mit zentraler Signalverarbeitung:

1. Das Vorzeichen des Ersteinsatzes (Momententensoranalyse) steht nicht zur Verfügung.
2. Frequenzinformationen (Modalanalyse) gehen verloren.

Ursache ist das eingesetzte Datenreduktionsverfahren logarithmische Einhüllende.

Möglichkeiten zur autarken Energieversorgung mit Solarmodulen werden vorgestellt.

1. Einführung

Die Quellorte der Schallemissionssignale sind ein wichtiges Kriterium für die Bewertung der Integrität des Prüfobjekts. Bei den bisher eingesetzten Ortungssystemen sind die Sensoren über analoge Kabel mit einer Zentraleinheit verbunden. Wegen der zentralen Signalverarbeitung sind für den überwiegenden Teil der Sensoren lange Sensorkabel notwendig. An großen Objekten ergeben sich Gesamtkabellängen von mehreren Kilometern.

Für stationäre Daueranwendungen spielt das einmalige Verlegen der Kabel eine untergeordnete Rolle. Viele Schallemissionsanwendungen werden jedoch von mobilen Messteams durchgeführt, welche die Sensorkabel bei jeder Messung neu verlegen und wieder abbauen müssen. Das ist ein ins Gewicht fallender Zeit- und Kostenfaktor. Außerdem beanspruchen die Kabel im Messfahrzeug viel Platz.

Die 2017 vorgestellten Sensoren mit integrierten AE-Systemen [1,2] wurden weiterentwickelt. Dabei wurde auch eine relative Zeitsynchronisation im Submikrosekundenbereich hinzugefügt, die für eine Ortung nötig ist. Dadurch ergeben sich zwei Lösungsvarianten:

1. Die WiFi-Sensoren realisieren einen drahtlosen Datentransfer mit dem Mid Device. Eine Lithiumzelle in jedem Sensor erlaubt Messzeiten zwischen 8 und 24 Stunden.
2. Mit den PoE-Sensoren lassen sich Netztopologien aufbauen, die nur noch Kabellängen benötigen, die den Sensorabständen entsprechen. Das heißt, die Kabel führen nicht zu der zentralen Signalverarbeitungseinheit, sondern lediglich zu einem benachbarten Sensor. Da über dieses Kabel neben dem Datenaustausch auch die Stromversorgung erfolgt, ist die Messzeit nicht begrenzt.

2. Sensoren und Messprinzip

Abbildung 1 veranschaulicht das Messprinzip. Die einfachere linke Anordnung ermöglicht keine Ortung. Die Sensoren erzeugen direkt eine dynamische Web-Seite. Ein Webbrowser auf einem beliebigen Remotegerät (Smartphone, Notebook usw.) übernimmt Einstellungen und Ergebnisanzeige.

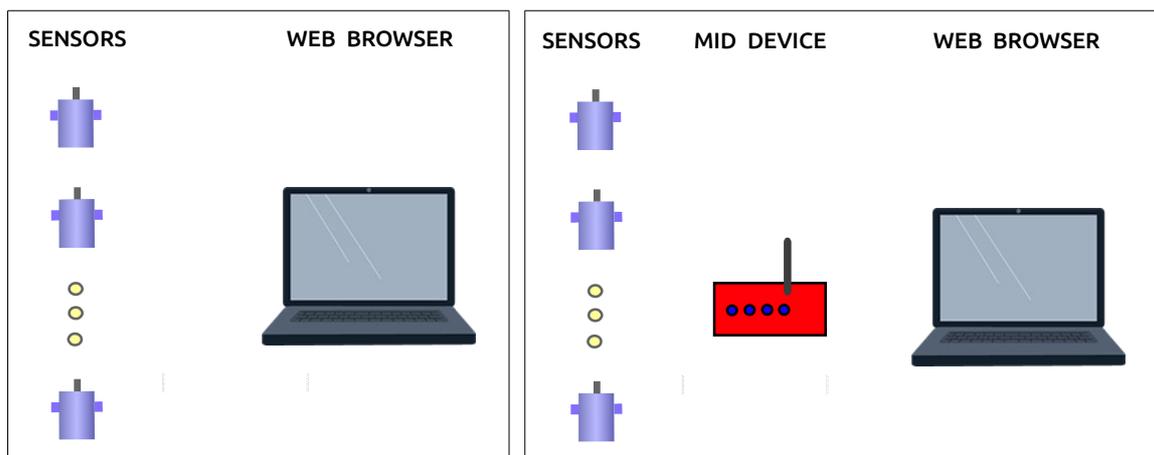


Abbildung 1 Messprinzip, links ohne Ortung, rechts mit Ortung

Für die Ortung wird zusätzlich zwischen den Sensoren und dem Browser ein sogenanntes Mid Device platziert, das jetzt die dynamischen Webseiten für den Browser generiert. Es entlastet sowohl die Sensorfirmware als auch den Browser und erlaubt einen optimierten proprietären Datentransfer zwischen Sensoren und Mid Device. Genau wie bei den Sensoren ohne Ortung erfolgt die Kommunikation zwischen den Sensoren und dem Mid Device entweder drahtlos im 2,4.MHz-Band (Typ WiFi) oder über Ethernetkabel (Typ

PoE). Abbildung 2 zeigt Sensoren für die Ortung. Die Wifi-Typen unterscheiden sich äußerlich nicht von den Sensoren ohne Ortung. Sie haben lediglich eine andere Firmware. Bei den PoE-Typen existiert ein zweiter Steckverbinder für die Bildung von Sensorketten. Die IX-Stecker sorgen für kleine Sensorabmessungen. Sie sind bereits wesentlich robuster als die Standard-RJ45-Stecker. Für besonders hohe mechanische Anforderungen und große Stromstärken wird der größere XLR-Stecker aus der mobilen Bühnentechnik eingesetzt.

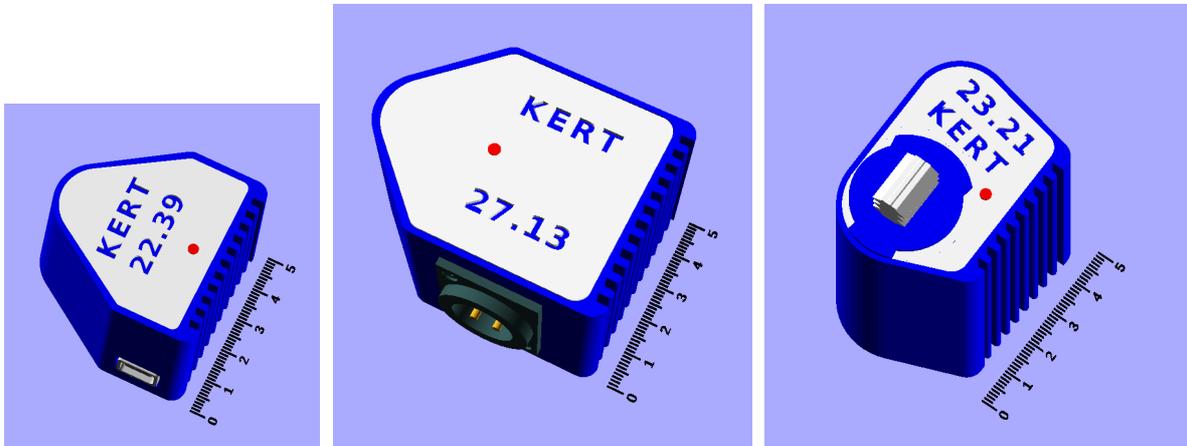


Abbildung 2 Sensoren mit Option Ortung, links PoE mit IX-Stecker, Mitte PoE mit XLR-Stecker, rechts WiFi

Für die Synchronisation der Sensoren wurde ein spezielles Verfahren entwickelt, das dafür sorgt, dass Zeitdifferenzen von benachbarten Sensoren im Submikrosekundenbereich gemessen werden können. Um eine hohe Hitrate zu erreichen, sind Datenreduktionen notwendig. Eingesetzt wird das Verfahren der logarithmischen Einhüllenden. Dies bedeutet, dass die Vorzeichen der Ersteinsätze und die Frequenzinformationen verloren gehen. Methoden wie Momententensor- oder Modalanalyse können deshalb nicht angewendet werden. Tabelle 1 enthält die wichtigsten Systemparameter. Die Anzahl der maximalen Hitrate bezieht sich auf das Gesamtsystem und hängt nicht von der Anzahl der eingesetzten Sensoren ab. In [4] findet man weitere Einzelheiten zu den Sensoren.

	Typ PoE	Typ WiFi
Takt der lokalen Uhren	0.08 μ s	0.25 μ s
Synchronisationsintervall	100 ms	100 ms
Maximaler Gangunterschied	0.23 μ s	0.85 μ s
Hits/s bei 40 Parametern/Hit	3 10^5	1 10^3 bis 2 10^4

Tabelle 1 Wichtige Leistungsmerkmale der Sensoren für Ortung

Abbildung 3 zeigt das zusätzlich notwendige Mid Device. Die dargestellte Variante besitzt zwei XLR-Stecker für die Sensorkette, einen Standard-Ethernet-Anschluss als Verbindung zum Netz und eine Stromversorgung von 54 V. Andere Varianten sind mit Antennen für das 2,4-MHz- und 5-MHz-Band ausgestattet oder besitzen Anschlüsse für ein Solarmodul zur autarken Energieversorgung. Die Stromaufnahme beträgt 11 W und die Abmessungen sind 164x160x52 mm³.



Abbildung 3 Mid Device

3. Anwendungsbeispiel Lagertank

Die Tankbodenprüfung ist ein typisches Beispiel für den Einsatz von mobilen Schall-emissionssystemen. Ziel ist die Ortung von Schwachstellen im Tankboden, die sonst nur nach Leerung und Reinigung des Tanks detektiert werden können. Dabei werden im unteren Teil des Tankmantels Sensoren in zwei Reihen übereinander angebracht, um Ereignisse aus dem Bodenbereich herauszufiltern und zu orten. Setzt man herkömmliche Ortungssysteme mit zentraler Signalverarbeitungseinheit ein, müssen die Sensorkabel um den Lagertank herumreichen. Unter der Voraussetzung, dass für jeden Sensor gleichlange Kabel verwendet werden, beträgt bei 16 Sensoren die Gesamtkabellänge mindestens 1120 m und bei 32 Sensoren entsprechend 2240 m.

Abbildung 4 zeigt die Verkabelung des PoE-Sensornetzes [5]. Unabhängig von der Anzahl der Sensoren ergibt sich eine Gesamtkabellänge von nur 200 m, weil nur Kabel mit dem maximalen Sensorabstand verwendet werden müssen. Für 32 Sensoren ist das weniger als ein Zehntel der herkömmlichen Kabellänge. Außerdem lassen sich 5 m lange Kabel wesentlich einfacher handhaben als die 70 m langen für die zentrale Signalverarbeitung.

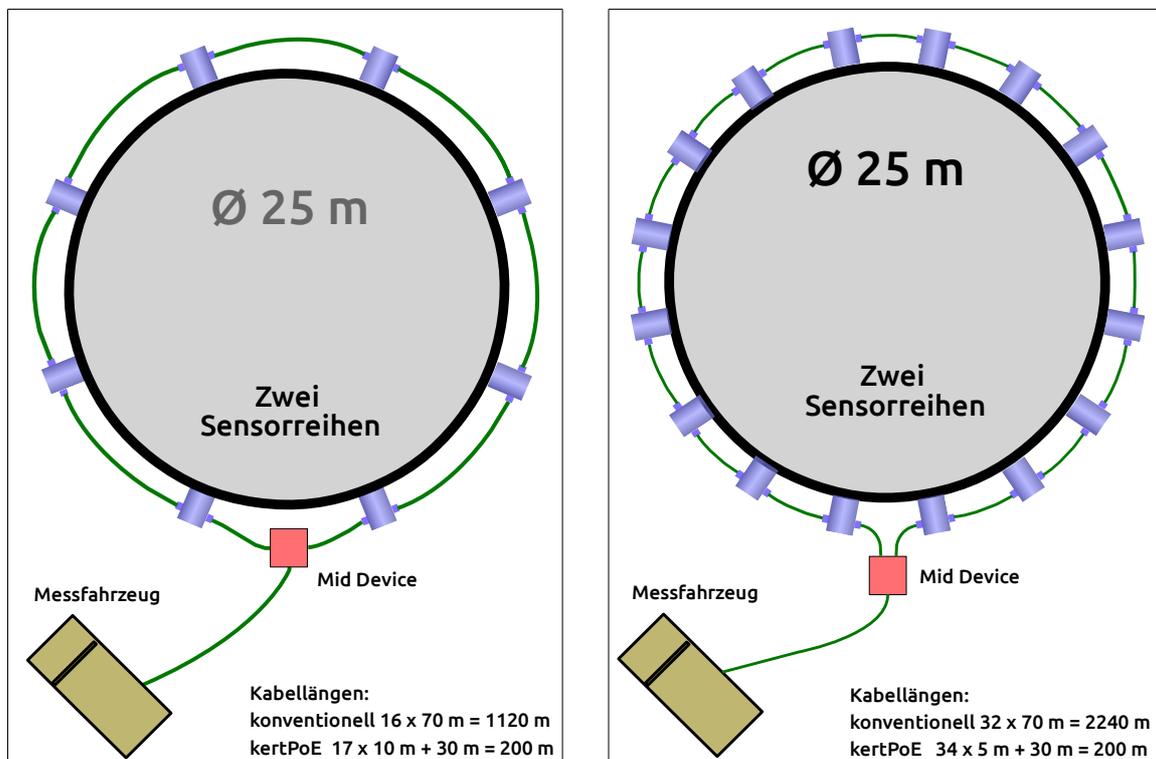


Abbildung 4 PoE-Sensornetz, links 16 Sensoren, rechts 32 Sensoren

Die in Abbildung 4 gezeigte ringartige Netztopologie ist nicht zwingend notwendig. Sie besitzt aber die Vorteile, dass bei Ausfall eines Sensors alle anderen funktionstüchtig bleiben, die maximale Zahl der nutzbaren Sensoren ein Maximum und die Kabellängen ein Minimum erreichen. Für die lineare Ortung z.B. an einer Rohrleitung werden eindimensionale Ketten eingesetzt.

Werden Sensoren vom Typ WiFi [6] verwendet, kann die Länge der Kabel weiter reduziert werden. In vielen Fällen werden überhaupt keine Kabel benötigt. Abbildung 5 zeigt die Anwendung der WiFi-Sensoren für den Lagertank mit 25 m Durchmesser. Weil aufgrund der Geometrie des Lagertanks nicht alle Sensoren Sichtkontakt zu einem Mid Device haben, müssen drei Mid Devices jeweils um 120° versetzt angeordnet werden.

Die Kommunikation zwischen den Mid Devices und dem Browser im Messfahrzeug kann über Ethernetkabel oder drahtlos im 5-GHz-Band erfolgen. Eine Kommunikation im 2,4-MHz-Band ist nicht zu empfehlen, weil in diesem Band bereits die Sensoren arbeiten.

In der Umgebung von großen metallischen Objekten liegen die Abstände von 40 m zwischen den Mid Devices im 5-MHz-Band bereits an der Grenze des sicheren Betriebs. Es empfiehlt sich, in diesem speziellen Anwendungsfall für die Kommunikation zwischen den Mid Devices Ethernetkabel einzusetzen.

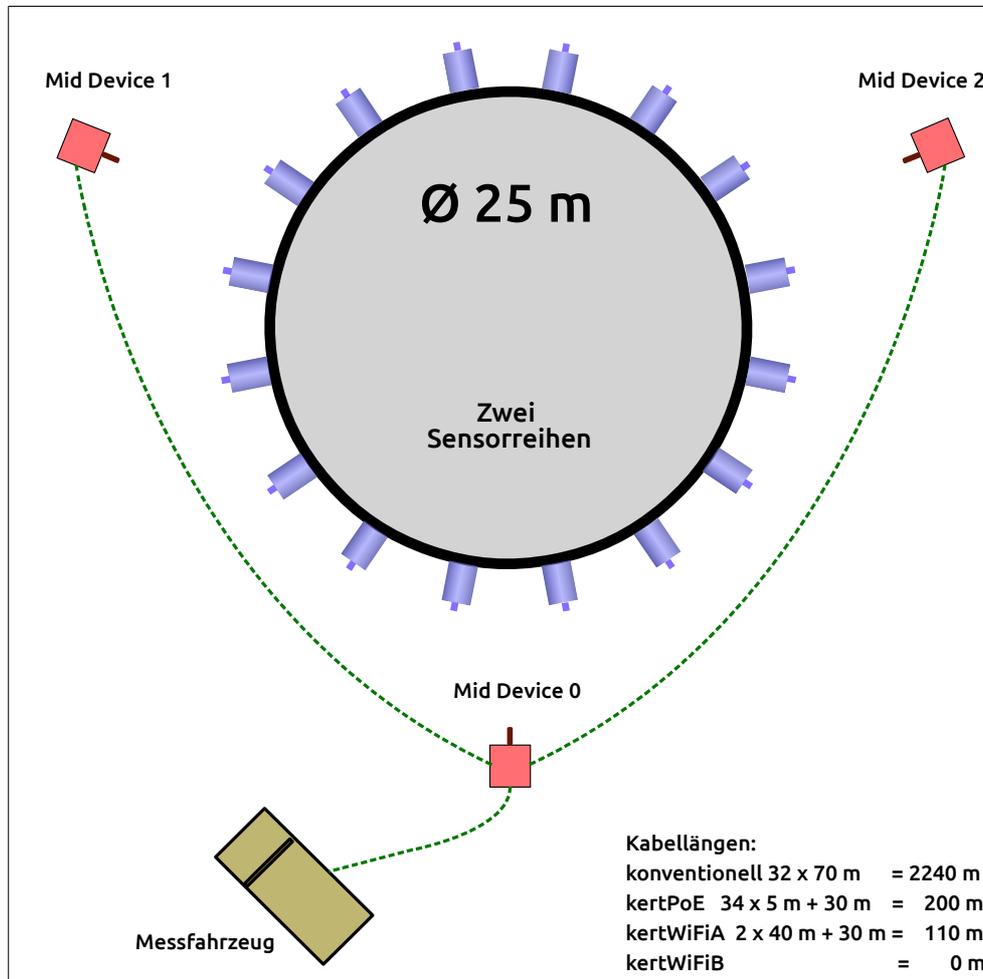


Abbildung 5 WiFi-Sensornetz für 32 Sensoren

4. Variantenauswahl und autarke Stromversorgung

In einer Zeit, wo viel über Internet der Dinge oder 5G gesprochen wird, erscheint eine drahtlose Lösung gegenüber der PoE-Variante zeitgemäßer. Eine solche Betrachtungsweise ist jedoch nicht zielführend. Als einfaches, leicht verständliches Beispiel aus dem Alltag wird die Vernetzung von Wohnräumen betrachtet. Planen Sie ein neues Einfamilienhaus, wird der Architekt empfehlen, ausreichend viele Datenleitungen zu verlegen. Ziehen Sie in eine Altbauwohnung mit wertvollen Stuckdecken und Fresken, ist WLAN die richtige Lösung.

Nicht anders ist es bei der Wahl der richtigen Variante PoE oder WiFi. Notwendig ist eine genaue Analyse der Messsituation. Einfach ist die Wahl bei bewegten Messobjekten. Hier sind die Vorteile einer drahtlosen Variante offensichtlich. Betrachtet man die oben beschriebene Tankbodenprüfung, muss abgewogen werden, ob das Stecken von 5 m langen Kabeln oder das Wechseln und Laden der Lithiumzellen aufwendiger erscheint. In

die Überlegungen sollte auch stets einfließen, dass die PoE-Variante höhere Ereignisraten erlaubt und keine Störungen durch andere Systeme auftreten können. In unmittelbarer Nähe von freien WLAN-Hot-Spots oder in einer Umgebung mit sehr vielen großen Metallteilen kann es sein, dass die WiFi-Variante schlecht funktioniert.

Zum Schluss dieses Abschnitts sollen noch die Möglichkeiten einer autarken Stromversorgung betrachtet werden. Bei der WiFi-Variante ermöglichen die Lithiumzellen einen Betrieb von mindestens 8 Stunden. Bei niedrigen Ereignisraten sind Betriebszeiten bis 24 Stunden möglich. Längere Messzeiten erfordern den Wechsel der Lithiumzellen.

Die PoE-Variante kann ebenfalls autark mit Strom versorgt werden. Im Gegensatz zur WiFi-Variante erfolgt dies durch einen zentralen Lithium-Akkumulator. Für den 8-bis-24-Stunden-Betrieb mit 32 Sensoren, wie er für die WiFi-Variante Standard ist, reicht der in Abbildung 6 gezeigte Akkumulator mit den Abmessungen $195 \times 130 \times 155 \text{ mm}^3$ und der Masse von 5 kg. Das Wechseln des einen größeren Akkumulators ist gegenüber dem Austausch aller Sensorzellen bei den WiFi-Typen sogar weniger zeitaufwendig. Außerdem kann die Betriebszeit leicht durch größere Akkumulatoren verlängert werden.



Abbildung 6 PoE-Akkumulator für eine Betriebszeit von 8 bis 24 Stunden



Abbildung 7 PoE-Akkumulatorblock für Dauerbetrieb mit Solarmodul

Wenn man sich darauf beschränkt, dass das Messsystem nur bei Tageslicht aktiv ist, kann ein Solarmodul unmittelbar an ein geeignetes Mid Device angeschlossen werden. Auch bei bewölktem Himmel reicht ein 3 m^2 großes Modul für den Betrieb von 32 Sensoren aus. Das Modul kann z.B. auf dem Dach des Messfahrzeugs platziert werden.

Soll das PoE-System auch in den Nachtstunden betrieben werden, sind zusätzlich Speicherakkumulatoren notwendig. Der in Abbildung 7 gezeigte Speicherblock ist zusammen mit einem Solarmodul von 5 m² für einen 24-stündigen Betrieb von März bis Oktober in Mitteleuropa ausgelegt. Die Abmessung des Speicherblocks beträgt 600x490x450 mm³, die Masse 134 kg.

Für die WiFi-Variante besteht die Möglichkeit der direkten Versorgung jedes Sensors mit einem Solarmodul, wenn das Messsystem nur bei Tageslicht aktiv ist. Für diffuses Licht bei bewölktem Himmel werden 0,15 m² große Module eingesetzt.

5. Zusammenfassung

Beide Varianten WiFi und PoE sorgen für eine erhebliche Reduzierung der notwendigen Kabel. Sie entsprechen mit den folgenden beiden Einschränkungen in ihren technischen Parametern modernen Schallemissionssystemen mit zentraler Signalverarbeitung.

- Das Vorzeichen des Ersteinsatzes (Momententensoranalyse) steht nicht zur Verfügung.
- Frequenzinformationen (Modalanalyse) werden nicht bereitgestellt.

Ursache ist das für beide Varianten eingesetzte Datenreduktionsverfahren logarithmische Einhüllende. Tabelle 2 fasst die Unterschiede zwischen den Varianten WiFi und PoE zusammen.

	WiFi	PoE
Gesamt-Hitrate	1,5 10 ³ bis 2 10 ⁴ Hits/s	3 10 ⁵ Hits/s
Maximale Kabellänge	0 m	Sensorabstand
Maximale Sensorzahl	nur von Gesamt-Hitrate begrenzt	24, 48 oder 96
Autarke Energievers. 8-24 h	ja	mit Erweiterung möglich
Tageslicheinsatz	ja	mit Erweiterung möglich
Autarker Dauereinsatz	nein	mit Erweiterung möglich
Störsicherheit	für große Hitraten nur ausreichend	ausgezeichnet
Energieverbrauch / Sensor	< 1,64 W	< 0.88 W

Tabelle 2 Merkmale der Varianten WiFi und PoE

8. Referenzen

- [1] H. Kühnicke (2017) "AE-Sensor mit integriertem Schallemissionssystem", Vortrag 19, 21. Kolloquium Schallemission Fulda, Vortrag 19
- [2] H. Kühnicke (2018) "ZfP 4.0 – Komplettes Schallemissionssystem im Sensorgehäuse", DGZfP-Jahrestagung Leipzig, Poster 31
- [3] A. J. Brunner, H. Kühnicke, M Oemus, L Schubert, H. Trattig (2019) "Drahtlose Übertragung von Schallemissionssignalen bei Strukturüberwachung: Anforderungen", 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen Karlsruhe, Vortrag 14
- [4] H. Kühnicke (2019) "Neue Generation von Sensoren mit integriertem AE-System", 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen Karlsruhe, Vortrag 13
- [5] https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html
- [6] https://standards.ieee.org/standard/802_11n-2009.html
- [7] M. Roche „Time Synchronization in Wireless Networks“, www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/time_sync/index.html