

Vorteile dezentraler AE-Systeme

Horst KÜHNICKE¹, Li WANG²

¹ Kühnicke Embedded Real Time (KERT), Dresden

² Kühnicke Embedded Real Time (KERT), Shenzhen, China

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

Kurzfassung. Die bekannten AE-Systeme besitzen eine zentrale Einheit, in der die Informationen von allen Sensoren verarbeitet werden. Dezentrale AE-Systeme bilden ein Netz von Sensoren. Dieses Sensornetz arbeitet autark, d.h. es kann ohne Zentraleinheit AE-Messungen durchführen. Alle Informationen werden direkt zwischen den Sensoren ausgetauscht. Dieses Prinzip führt zu skalierbaren, stromsparenden und kostengünstigen Systemen.

Bei n Sensoren stehen dem System die n -fache Rechenleistung und das n -fache Speichervolumen eines Einzelsensors zur Verfügung. Gleichzeitig wird nur der n -fache Strom verbraucht. Ähnliches gilt auch für andere Systemparameter. Leistungsfähigkeit und Kosten passen sich an die Anzahl der Sensoren an.

KERT-AE-Sensoren der 5. Generation bilden ein dezentrales AE-System. Die Sensoren können ohne zusätzliche Hardware alle Messaufgaben bewältigen. Die Messergebnisse werden in den Flash-Speichern der Sensoren abgelegt. Zur Einstellung des Systems und zum Auslesen der Ergebnisse sind Mini-Computer geeignet. Voraussetzung ist lediglich ein moderner Browser und eine Schnittstelle für Single Pair Ethernet 10Base-T1L oder Bluetooth LE 5.1. Die Messung selbst ist unabhängig vom Mini-Computer.

Entwicklungsziele für die KERT-Systeme waren geringe Kosten für die Anschaffung und - noch wichtiger – ein möglichst geringer Arbeitsaufwand für die Durchführung der Messungen. Es gibt deshalb zwei Systemvarianten. Die ISM-Variante mit drahtlosem Datenaustausch und Stromversorgung mit Akkus in jedem Sensor ist für kurzzeitige mobile Prüfeinsätze vorgesehen. Optimiert wurde die Installationszeit des Messsystems. Es müssen keine Kabel verlegt werden und die Positionen der Sensoren auf der Prüfoberfläche werden automatisch vom System selbst vermessen. Die SPE-Variante mit Single-Pair-Ethernet-Kabeln und zentraler Stromversorgung ist für Langzeitmessungen gedacht, bei denen die Installationszeit für das System im Vergleich mit dem ständigen Wartungsaufwand eine untergeordnete Rolle spielt. Das regelmäßige Aufladen der Akkus entfällt und die Langzeit-zuverlässigkeit ist größer als die der ISM-Variante.

1. Einführung

Üblicherweise wird in AE-Systemen eine zentrale Signalverarbeitung verwendet. In den Sensoren findet lediglich eine Impedanzanpassung oder Vorverstärkung statt. Die AE-Signale werden über analoge Kabel an eine zentrale Verarbeitungseinheit übermittelt. Das hat den Vorteil, dass die für die Ortung erforderlichen Laufzeitdifferenzen einfach in der Zentraleinheit gemessen werden können. Diese zentrale Signalverarbeitung erfordert bei großen Prüfobjekten jedoch viele unhandlich lange Kabel.

Seit 2017 entwickeln wir intelligente Schallemissionssensoren [1,2,3]. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass von Generation zu Generation immer mehr Funktionalität von der zentralen Verarbeitungseinheit in die Sensoren selbst verlegt worden ist. Dieses Konzept beschränkt die notwendigen Kabellängen bei der **SPE**-Variante auf den Sensor-abstand. Für die **ISM**-Variante sind überhaupt keine Kabel notwendig. Dabei steht **SPE** für **Single Pair Ethernet** und **ISM** für **Industrial Scientific Medical**, eine Bezeichnung von frei nutzbaren Frequenzbändern zur drahtlosen Datenübertragung. Neben der Verkleinerung der Kabellängen war die Verringerung des Stromverbrauchs ein wichtiges Ziel, um batteriegespeiste Messsysteme mit möglichst langen Betriebszeiten aufbauen zu können.

Die neue 5. Generation verschiebt erstmals alle für die Messung wichtigen Funktionen in die Sensoren. Messungen können jetzt auch autark mit den Sensoren ohne Computer durchgeführt werden. Ein Computer wird nur zum Einstellen des Messsystems und zum Auslesen der Messergebnisse benötigt. Das senkt bei Langzeitmessungen den Stromverbrauch, wo aus Zeitgründen die Messung sowieso nicht ständig vom Messpersonal überwacht werden kann. Die Einstell- und Ergebnis-anzeigeroutinen sind Web-Applikationen. Es reicht ein stromsparender Mini-Computer, da lediglich ein moderner Browser installiert werden muss.

Abb. 1 zeigt ISM-Sensoren der 1. und 5. Generation im gleichen Maßstab. Mit jeder Generation ist das Sensorvolumen verringert, der Funktionsumfang erhöht und gleichzeitig die Betriebszeit im Batteriebetrieb verlängert worden.

In den Abschnitten 2.1 bis 2.5 wird die Funktionsweise der Sensoren kurz beschrieben. Im Anschluss wird ausführlicher auf die neue Funktion *Sensorpositionsbestimmung* eingegangen.



Abb. 1: Vergleich ISM-Sensor der 1. (rechts) und 5. Generation (links)

2. Kurze Funktionsbeschreibung

2.1 Analoge Signalverarbeitung

Im Analogteil durchläuft das aufgenommene Signal folgende Stufen:

- Impedanzanpassung,
- drei zuschaltbare Bandpassfilter 3. Ordnung,
- mehrstufiger demodulierender logarithmischer Verstärker mit einer Dynamik von 95 dB.

Das Ausgangssignal entspricht der Einhüllenden des Sensorsignals. Abb. 2 zeigt beispielhaft dieses Ausgangssignal für ein ursprüngliches Signal, das sich in einer Platte gebildet hat und sich aus einem longitudinalen und einem transversalen Anteil zusammensetzt.

Die logarithmische Einhüllende wird von einem internen ADC des eingebauten Mikrocontrollers mit einer maximalen Rate von 1 MHz abgetastet. AE-Parameter, wie Ankunftszeit, Anstiegszeit, Signaldauer, Spitzenamplitude und Energie, werden vom Mikrocontroller aus der Hüllkurve extrahiert. Der Funktionsumfang entspricht bis auf die folgenden beiden Ausnahmen dem von modernen AE-Systemen mit zentraler Signalverarbeitung und schnellen Computern:

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

Der Energieverbrauch des Analogteils ist während der Messung nahezu konstant und kleiner als 58 mW. Alle Sensoren werden nach der Face-To-Face-Methode [4] kalibriert. Dabei wird sowohl die ursprüngliche Signalform als auch die erzeugte Einhüllende aufgezeichnet.

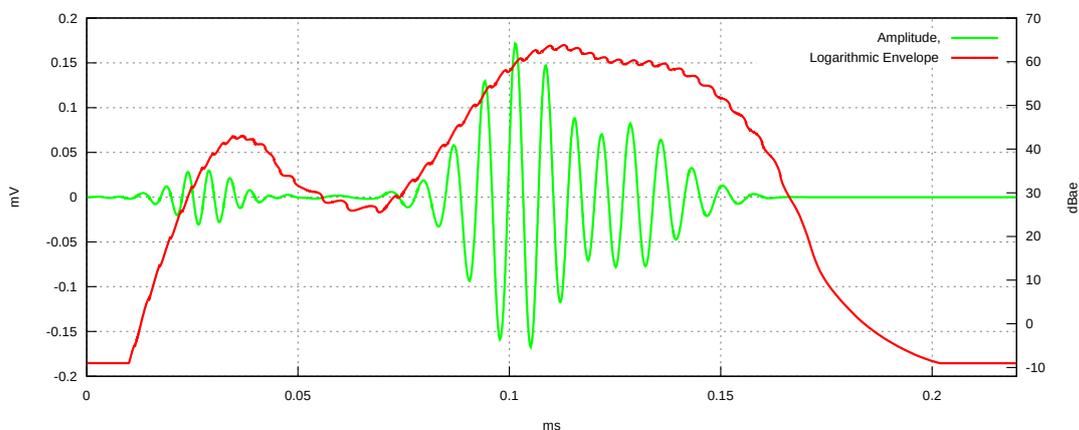


Abb 2: Beispiel für die erzeugte logarithmische Einhüllende

2.2 SPE-Sensoren



Abb. 3: SPE-Sensor 150 kHz

Einen typischen SPE-Sensor für eine Mittenfrequenz von 150 kHz zeigt Abb. 3. Datenübertragung und Stromversorgung erfolgen über Single Pair Ethernet (SPE) nach dem Standard 10BASE-T1L. Es sind Kabellängen bis zu 1400 m möglich. Abb. 4 zeigt die Vernetzung der Sensoren als Kette. Für n Sensoren sind $n + 2$ Kabel erforderlich. Die Länge jedes Kabels entspricht dem Aufnehmerabstand. Für diese Längen sind nur Kabel mit geringem Durchmesser notwendig, die sich leicht verlegen lassen. Die gezeigte Topologie reduziert für große Prüfobjekte und hohe Sensor-zahlen die Gesamtkabellänge verglichen mit konventionellen zentralen AE-Systemen auf bis zu 10 %.

Der Nachteil der Kettentopologie besteht darin, dass wenn mehr als ein Sensor ausfällt, alle Sensoren zwischen zwei ausgefallenen Sensoren nicht erreichbar sind. Werden, wie in Abb. 5, weitere Datenpfade (rot) eingefügt, wird dieser Nachteil vermieden.

Die SPE-Variante ist unabhängig von Störungen im viel genutzten 2.4 GHz ISM-Band und wird für Langzeitmessungen empfohlen, bei denen die Installationszeiten für das AE-System eine untergeordnete Rolle spielen. Auf Steckverbinder wird verzichtet. Die

Kabel werden ähnlich wie in einer Verteilerdose fest installiert. Der Energieverbrauch des Digitalteils hängt stark von der Ereignisrate ab. Er liegt zwischen 52 und 244 mW.

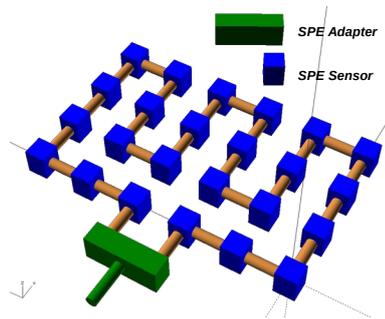


Abb. 4: Kettentopologie

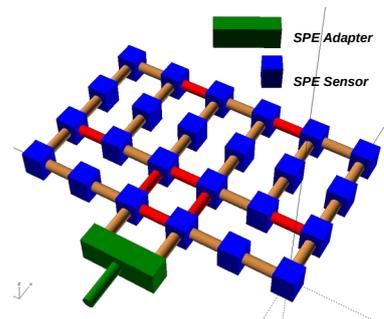


Abb. 5: Weitere Pfade (rot)

2.3 ISM-Sensoren



Abb. 7: ISM-Sensor 150 kHz

Die drahtlose Datenübertragung findet im 2,4-GHz-ISM-Band statt. Zwischen den Sensoren wird ein proprietäres Protokoll benutzt. Die Datenübertragung zum Steuer-PC beruht auf Bluetooth LE. Der Energieverbrauch des Digitalteils hängt wieder stark von der Ereignisrate ab. Er liegt zwischen 12 und 40 mW.

Eingebaute Li-Ionen- oder LiFePO₄-Akkumulatoren übernehmen die Stromversorgung. Aufgrund der Zellchemie sind LiFePO₄-Zellen eigensicher, d. h., ein thermisches Durchgehen und eine Membranschmelze wie bei anderen Lithium-Ionen-Akkumulatoren gelten als ausgeschlossen. Sie erlauben eine größere Zahl von Ladezyklen und können in einem Temperaturbereich von -10°C bis 60°C eingesetzt werden. Für Li-Ionen-Zellen sind die Ladetemperaturen auf 0°C bis 50°C eingeschränkt. Dafür besitzen sie bei gleichem Volumen etwa die doppelte Kapazität. Geladen werden die Zellen über eine Micro-USB-Buchse, an die zur Verlängerung der Betriebszeiten eine handelsübliche Powerbank angeschlossen werden kann.

Hauptvorteile der ISM-Sensoren:

- Das AE-System benötigt keine Kabel,
- Galvanische Trennung der Sensoren.

Empfohlen wird die ISM-Variante für Messteams mit wechselndem Einsatzort. Da keine Kabel verlegt werden müssen, ist das AE-System schnell installiert.

2.4 Zeitsynchronisation

Für die Quellortung müssen in den Sensoren synchronisierte Uhren mit einer Genauigkeit von mindestens 1 μ s laufen. Die dafür bekannten standardisierten Verfahren sind sehr aufwendig, weil sie auf absolute Zeiten ausgerichtet sind sowie herstellerunabhängig und über mehrere Zwischenstationen hinweg funktionieren sollen [4]. Da für die AE-Ortung nur Zeitdifferenzen zwischen benachbarten Sensoren gemessen werden müssen, vereinfacht sich das Problem wesentlich. So enthalten z.B. alle für die drahtlose Datenübertragung genutzten integrierten Schaltkreise bereits geeignete Uhren. Allerdings hat der Anwender

oft keinen Zugriff auf diese Uhren. In Verhandlungen mit den IC-Herstellern lassen sich jedoch Lösungen finden.

2.5 Software

Die Software setzt sich zusammen aus einer Firmware auf dem Mikrocontroller des Sensors und einer Webapplikation auf dem Steuerrechner. Die Firmware der Mikrocontroller ist verantwortlich für die Digitalisierung der Einhüllenden, die AE-Parameterbildung, die Ortung, die Ermittlung der Sensorpositionen, die Speicherung der Messergebnisse und die Steuerung der Datenübertragung. Damit kann das Sensornetzwerk autark AE-Messungen vornehmen. Der Steuerrechner ist nur noch eine intelligente Bedienkonsole für die Einstellung des Sensornetzwerks und das Darstellen der Messergebnisse. Dieses Konzept vereinfacht die Fernsteuerung des Messsystems und spart Energie bei Langzeitmessungen.

Die Firmware des Mikrocontrollers ist proprietär. Die Webapplikation des Steuerrechners läuft im Browser eines beliebigen Computers mit einem beliebigen Betriebssystem. Sie ist Open Source. Befähigte Nutzer können die Webapplikation an ihre eigenen Bedürfnissen anpassen.

3. Vermessung der Sensorpositionen

Um die Installation des Messsystems weiter zu vereinfachen, ist für die ISM-Sensoren ein sogenannter *Measurer* entwickelt worden, an dessen Unterseite sich ein AE-Impulsgeber und an der Oberseite ein HF-Antennenarray befinden. Abb. 7. zeigt die derzeitige experimentelle Ausführung. Der Measurer wird mit der Hand auf die Bauteiloberfläche zwischen die AE-Sensoren gedrückt. Empfangen die AE-Sensoren Signale vom Impulsgeber, werden die Laufzeitdifferenzen gemessen und gleichzeitig werden Beacons mit angehängten Continuous Tone Extensions (CTE) ausgesendet. Das HF-Antennenarray des Measurers ermittelt den Einfallswinkel der erweiterten Beacons. Wird dieser Vorgang in jedem Dreieck, das die AE-Sensoren aufspannen, wiederholt und einer der Sensoren als Koordinatenursprung definiert, können die Positionen von allen umliegenden Sensoren und den verwendeten Measurestandorten berechnet werden. Das akustische Signal des Measurers dient außerdem der Ankopplungsmessung. Der Vorteil des Einsatzes des Measurers besteht darin, dass keine aufwendige Vermessung der Sensorpositionen notwendig ist. Außerdem können die Ankopplungseigenschaften im gleichen Arbeitsschritt beurteilt werden. Alle Daten werden sofort im Messsystem gespeichert.

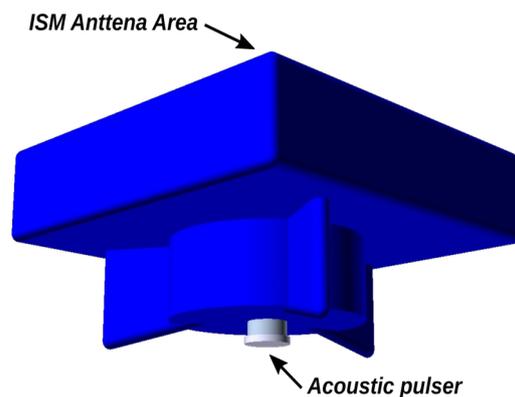


Abb. 7: Measurer im experimentellen Gehäuse

Die Praxiserprobung der vorgestellten Positions- und Ankopplungsbestimmung ist noch nicht abgeschlossen. Die bisherigen Untersuchungen wurden mit dem Antennenarray TIDA 01632 (zwei Dipole) von Texas Instruments und dem Array BRD 4185A (4 x 4 Patch Antennen) von Silicon Labs durchgeführt. Abb. 8 zeigt die beiden Arrays und vom Hersteller gemessene Kalibrierkurven. Das wesentlich kleinere Array von Texas Instruments misst nur in einer Ebene. Das Array von Silicon Labs erlaubt die Messung von dreidimensionalen Raumwinkeln.

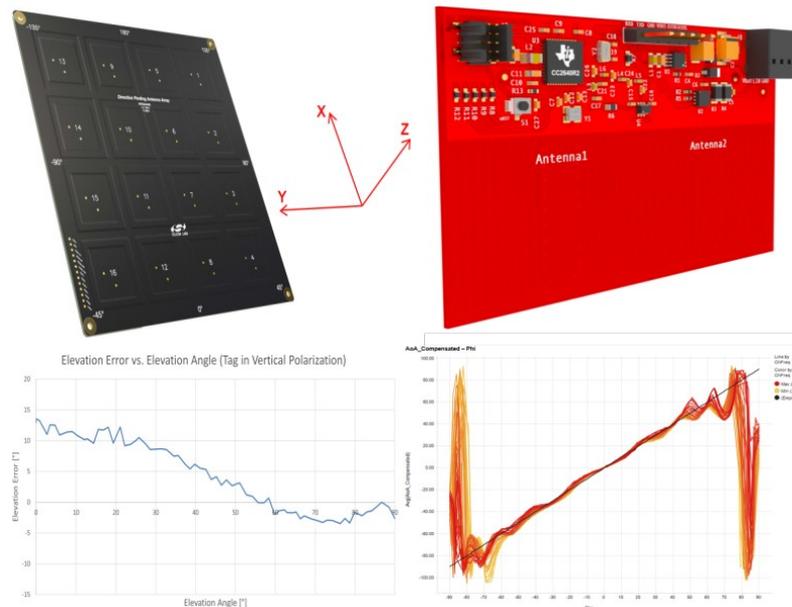


Abb. 8: HF-Antennenarrays zur Bestimmung des Einfallswinkels
TIDA 01632 (rechts) und BRD 4185A (links)

Ergebnisse unseres Praxistests mit dem Array von Silicon Labs an einem Behälter ($\varnothing 2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) zeigt Abb. 9. Dabei waren die optimalen Sensorpositionen (grüne Punkte) in einer Zeichnung vorgegeben. Nach dieser Zeichnung wurden die Sensoren - ohne zu messen - freihändig platziert. Die roten Punkte stehen für die berechneten tatsächlichen Sensorpositionen. Das Gleichungssystem zur Berechnung der Positionen ist nicht linear. Die Vorgabe von wahrscheinlichen Sensorpositionen ist notwendig, damit sich das Näherungsverfahren auf den richtigen Lösungsweig setzt.

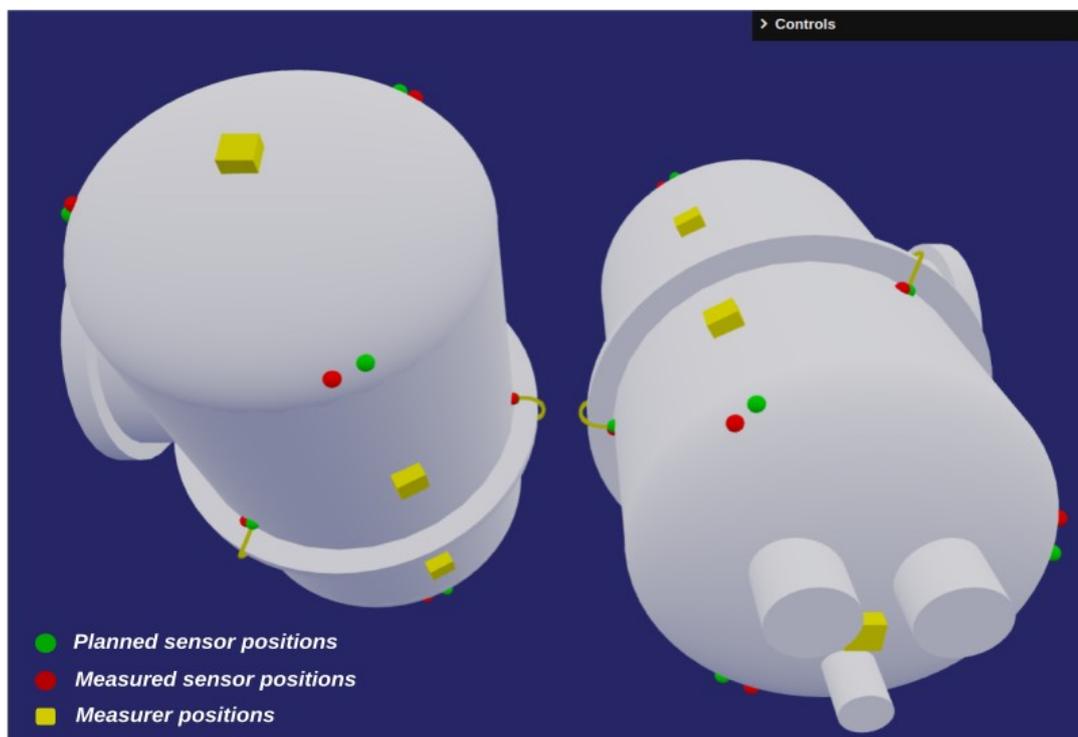


Abb. 9: Messung der Sensorpositionen an einem Testbehälter

Die Ergebnisse sind vielversprechend. Trotzdem entwickeln wir ein eigenes Antennenarray mit sechs Dipolen und versuchen, es für die Anforderung an die Bestimmung des Einfallswinkels auf gekrümmten Oberflächen zu optimieren. Wahrscheinlich wird es ein Array für leitende Oberflächen und eines für nichtleitende Oberflächen geben.

4. Referenzen

- [1] H. Kühnicke (2017) "*AE-Sensor mit integriertem Schallemissionssystem*", Vortrag 19, 21. Kolloquium Schallemission Fulda, Vortrag 19
- [2] H. Kühnicke (2019) "*Neue Generation von Sensoren mit integriertem AE-System*", 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen Karlsruhe, Poster 1
- [3] H. Kühnicke (2019) "*Ortungssysteme mit wesentlich weniger oder ganz ohne Sensorkabel*", 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen Karlsruhe, Vortrag 13
- [4] H. Vallen „*A new ISO Standard for AE Sensor Sensivity Determination Uses the Face-To-Face Stimulation Method*“, EWGAE 2022, Ljubljana
- [5] A. J. Brunner, H. Kühnicke, M Oemus, L Schubert, H. Trattinig (2019) "*Drahtlose Übertragung von Schallemissionssignalen bei Strukturüberwachung: Anforderungen*", 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen Karlsruhe, Vortrag 14
- [6] M. Roche „*Time Synchronization in Wireless Networks*“, www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/time_sync/index.html