

Von der Elektrode zur Cloud: Leckagemonitoring mit kapazitiver Sensorik und mioty®

Johannes Ehrlich¹, Bernhard Brunner¹, Thomas Nierla¹, Matteo Benkert¹, Gerhard Domann¹, Ferdinand Kemeth², Alexej Jarresch², Anja Meldau²

¹ Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Neunerplatz 2, 97082 Würzburg
+49 931 4100-416, bernhard.brunner@isc.fraunhofer.de

² Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Nordostpark 84, 90411 Nürnberg
+49 911 58061-3330, ferdinand.kemeth@iis.fraunhofer.de

Die Detektion von Flüssigkeitsleckagen ist sowohl im privaten als auch im industriellen Bereich wichtig, um Sach- und Personenschäden zu verhindern. Herkömmliche Leckageerkennungen nutzen meist ein resistives Messverfahren, das nur funktioniert, wenn die Flüssigkeit die Elektroden benetzt und eine ausreichende Leitfähigkeit aufweist. Wasser ist hierbei oft kein Problem, Lösemittel, Öle, Treibstoffe oder Chemikalien sind jedoch schwierig oder gar nicht zu erkennen. Die Autoren dieser Arbeit setzen auf ein kapazitives Messprinzip, das flexible und auch elastische Materialien für besonders herausfordernde Anwendungsfälle der Sensorik nutzt. Der Vorteil liegt darin, daß bereits der erste Tropfen, also ca. 100 µl, unabhängig von dessen Auftreffstelle auf der kapazitiven Detektionsfläche nachgewiesen werden kann. Die Sensorstruktur besteht aus einer gedruckten Interdigitalelektrode auf einer flexiblen oder elastischen Trägerfolie, die in unterschiedlichen Größen kostengünstig hergestellt werden kann. Der Sensoraufbau ist durch ein elastisches Dielektrikum gekapselt, damit bleibt das Elektrodenmaterial vor Umwelteinflüssen und aggressiven Medien geschützt. Durch die Nutzung von hochelastischem Silikon wird es möglich, Sensoren auch auf sehr stark gekrümmten Oberflächen z. B. Rohrverbindungen, anzubringen. Tests belegten den Nachweis von Wasser, Isopropanol, Aceton, Benzin, Säuren und Laugen ab einer Tropfengröße von 100 µl. Eine eigens entwickelte Elektronik mit Langzeitbatteriebetrieb (10 Jahre) wertet das kapazitive Signal energieeffizient aus und setzt auf ein fortschrittliches Datenübertragungssystem (mioty® LPWAN) mit sicherem Protokoll sowie Heartbeat- und Fernwartungsoptionen.

Keywords: Flüssigkeitssensorik, kapazitives Messsystem, energieeffizient, Datenübertragung mit hoher Reichweite

Einleitung

Allein in Deutschland ereignen sich laut dem Gesamtverband der Versicherer ca. 1,1 Mio. Leitungswasserschäden pro Jahr in Privathaushalten. Durchschnittlich müssen die Versicherungen ca. 4.500 € pro Schaden über die Wohngebäudeversicherung regulieren. Zusätzlich kommen jährlich etwa 150.000 Schadensfälle in der Hausratversicherung mit einer Regulierungssumme von 350 Mio. € hinzu [1]. Im industriellen Umfeld sind insbesondere Chemieanlagen, Raffinerien sowie Rohrleitungen, Tanks und Gefahrstofflager mit höchster Priorität zu überwachen, um Risiken für das Personal und Schäden für die Umwelt möglichst gering zu halten.

Eine Sensorik, die sich einfach auch an unzugänglichen oder gekrümmten Flächen nachrüsten lässt, kabellos über einen langen Zeitraum Daten an eine Leitstelle übermittelt und zuverlässig kleinste Mengen ausgetretener

Flüssigkeit detektiert, kann dabei helfen, Risiken und wirtschaftliche Schäden zu verringern.

Funktionsweise der Leckagesensorik ab dem ersten Tropfen

Die Funktionsweise der Leckagesensorik beruht auf einem kapazitiven Messprinzip, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Interdigitalstrukturen bilden dabei elektrisch gesehen einen Kondensator, dessen Feldverlauf durch die geometrischen Abmessungen und Materialparameter bestimmt ist (siehe Abb. 1, links unten). Wichtig hierbei ist die Permittivität der eingesetzten Materialien; in dem erläuterten Fall wird vorwiegend mit Polymeren wie Silikon ($\epsilon_r = 2,8$) oder Polyimid ($\epsilon_r = 3,4$) gearbeitet.

Wird durch eine Leckage, also einem Tropfen eines Mediums, die Zusammensetzung der Permittivität des Sensoraufbaus und damit der Feldverlauf des Kondensators verändert, wird dies durch eine Veränderung der Kapazität

messbar (siehe Abb. 1, rechts unten). Besonders gut messbar sind dabei Flüssigkeiten, die im Vergleich zu den verwendeten Grundmaterialien eine höhere Permittivität aufweisen. Beispielhaft ist hierfür Wasser mit einer Permittivität von ca. 80.

Dieser Vorteil kann aber gleichzeitig ein Nachteil sein: Fällt der Unterschied zu gering aus, ist eine sichere Detektion gegebenenfalls nicht mehr möglich, oder es werden größere Flüssigkeitsmengen benötigt, um einen messbaren Unterschied hervorzurufen. Ein großer Vorteil des kapazitiven Messprinzips ist, dass es keine offenen Elektrodenbereiche gibt. Dies verringert den generellen Einfluss von Umweltfaktoren, die z. B. zu einer Korrosion der Elektroden führen und den eingesetzten Sensor frühzeitig zerstören können.

Ein weiterer Vorteil ist, dass das zu detektierende Medium keine erhöhte Leitfähigkeit aufweisen muss. Dies erweitert den Einsatzbereich auch auf potentiell isolierende Flüssigkeiten wie Lösemittel und weitere technische Medien.

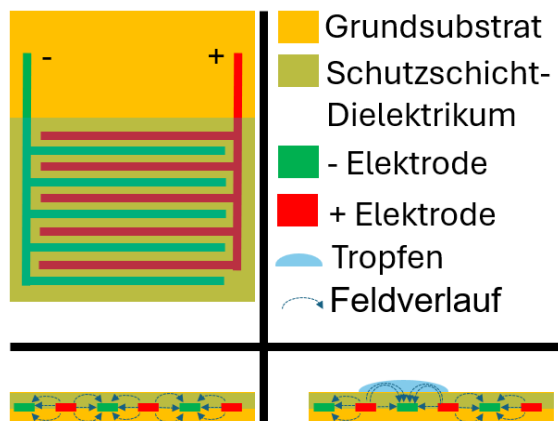


Abb. 1 Funktionsweise der kapazitiv arbeitenden Leckagesensorik

Materialien und Methoden

Die Herstellung der Leckagesensoren erfolgt zunächst als Einzelsensor auf einem elastischen Silikonsubstrat. Dazu werden die einzelnen Schichten, wie in Abb. 2 dargestellt, schrittweise nacheinander aufgebaut. Das kommerziell erhältliche 2-Komponenten-Silikon RT601 von Wacker wird nach dem vom Hersteller vorgegebenen Mischverhältnis in einem Speedmixer im flüssigen Zustand für ca. 3 Minuten gemischt und anschließend in einer Dicke von ca. 200 µm auf eine Glasplatte mit einem Rakel aufgetragen. Der so entstandene Folienfilm wird anschließend thermisch mittels IR-Strahlung für 10 Minuten vernetzt.

Direkt im Anschluss wird mit einem Rakel eine Elektrodenschicht, bestehend aus Carbon

Black mit Silikonbinder, in einer Schichtdicke von ca. 30 µm vollflächig aufgetragen und ebenfalls anschließend thermisch vernetzt. Somit sind sowohl die Träger-, Isolier- und auch Elektrodenschichten sehr elastisch. Nach diesem Schritt erfolgt die Strukturierung der Interdigitalstruktur mittels Laserabtrag mit einem Gravurlaser. Dabei werden Interdigitalstrukturen in Negativform bis auf das elastische Silikonsubstrat abgetragen.

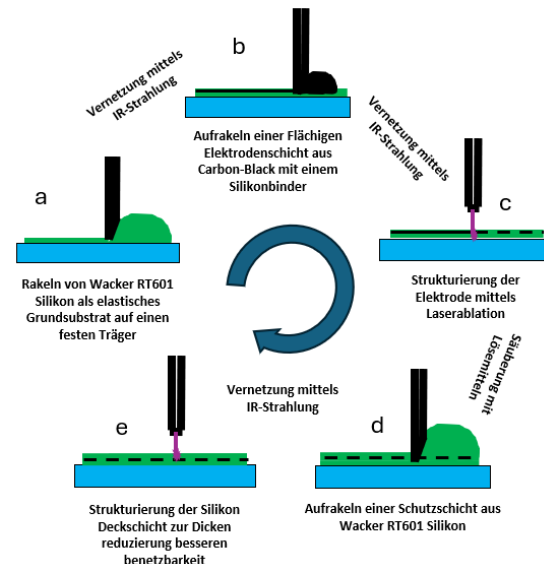


Abb. 2 Schematische Herstellung der Interdigitalstrukturen durch Laserabtrag.

Durch Vorversuche wurde ermittelt, dass eine Leiterbahnbreite von 0,5 mm und ein Leiterbahnabstand von 0,5 mm stabil und ohne Kurzschlüsse hergestellt werden können. Diese Parameter werden damit für alle folgenden Proben und Versuche festgelegt. Die aktive Fläche der angefertigten Interdigitalstruktur eines Einzelsensors beträgt $65 \times 50 \text{ mm}^2$. Nach dem Laserabtrag wird die Interdigitalstruktur mit einem Dielektrikum als oberste Schutzschicht mit einer Dicke von ca. 60–100 µm aufgetragen. Die hergestellte Interdigitalstruktur auf elastischem Silikon ist in Abb. 3a dargestellt. Neben den Interdigitalstrukturen aus elastischem Silikon wurden in nahezu demselben Herstellungsprozess wie in Abb. 3 Interdigitalstrukturen auf flexiblem Polyimidsubstrat hergestellt (Abb. 3b). Dabei ersetzt das flexible Polyimid das elastische Silikon als Grundsubstrat. Bei diesem Sensortyp wird keine zusätzliche Schicht für die Elektroden benötigt; durch den Lasergravurprozess wird die Oberfläche des Polyimids verbrannt, und es entsteht eine leitfähige Elektrodenschicht, die direkt genutzt werden kann. Dies reduziert den Aufwand für einen späteren Hoch-

skalierungsprozess, da der Schritt der Elektro-
drierung und Vernetzung entfällt.
Die flexiblen Polyimidsubstrate werden nach
dem Reinigen mit Lösemittel ebenfalls mit einer
Deckschicht als isolierendem Dielektrikum und
Schutzschicht aus Silikon mit einer Dicke von
60–100 µm überzogen. Im weiteren Verlauf
wurden nur noch Interdigitalstrukturen aus
flexiblem Silikonsubstrat betrachtet.

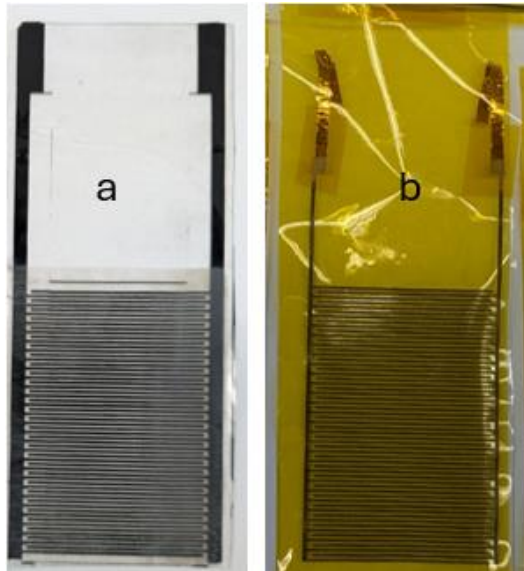


Abb. 3 Hergestellte Interdigitalstrukturen auf
a.) elastischem Silikonsubstrat
b.) flexiblem Polyimid Substrat

Als Weiterentwicklung des Einzelsensors wurde
die Geometrie der Einzelsensoren in ein
Sensorarray bestehend aus 16 Einzelsensoren
mittels CAD-Layout überführt und an-
schließend durch Siebdruck hergestellt. Dazu
wurde eine PET-Folie von DuPont als
Basissubstrat verwendet und das Elektroden-
muster mit einem Siebdrucker aufgedruckt. Als
leitfähige Tinte zur Herstellung der Elektroden
kam diesmal EDAG 479SS von LOCTITE zum
Einsatz (Abb. 4). Die Tinte unterscheidet sich im
Wesentlichen durch die Verwendung von Silber
anstatt Carbon Black als leitfähige Partikel. Das
Elektrodenmuster wurde ab-schließend mit
einer Silikonschicht aus RT601 mit einer Dicke
von 60–100 µm als Schutz und Dielektrikum
durch Rakeln überschichtet.

Das so entstandene Leckagesensor-Array
weist damit nicht nur eine deutlich vergrößerte
Detektionsfläche (ca. DIN A4) auf, sondern es
ist nun auch möglich, die Leckage orts aufgelöst
zu detektieren. Als Anbindung an die
Auswerteelektronik kommt ein Steckver-
binder mit Crimpkontakten der Firma Amphenol (Typ
FCI Clincher 65801-009LF) zum Einsatz.

Gerade die Ortsauflösung kann bei komplexen
Überwachungsaufgaben wie z. B. Verteilern
oder engen Rohrleitungs-systemen von Vorteil
sein. Prinzipiell ist die Ortsauflösung auch
skalierbar.

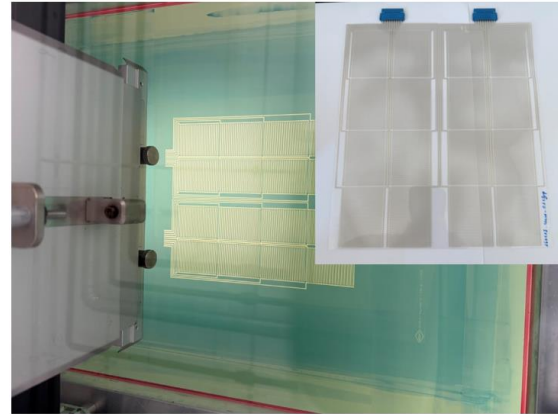


Abb. 4 Siebdruck des Leckagesensor Array

Test der Leckagesensorik

Ziel der Leckagesensorik ist der Nachweis
verschiedener Flüssigkeiten ab einer
Tropfengröße von 100 µl. Um diese Menge
gezielt aufzubringen, wurde eine Eppendorf-
Pipette mit Einwegspitzen verwendet, dadurch
ist eine Flüssigkeitsabgabe von definiert 100 µl
gewährleistet. Exemplarisch ist in Abb. 5 ein
100 µl großer Wassertropfen auf einem
Leckagesensor aus elastischem Silikon
dargestellt.

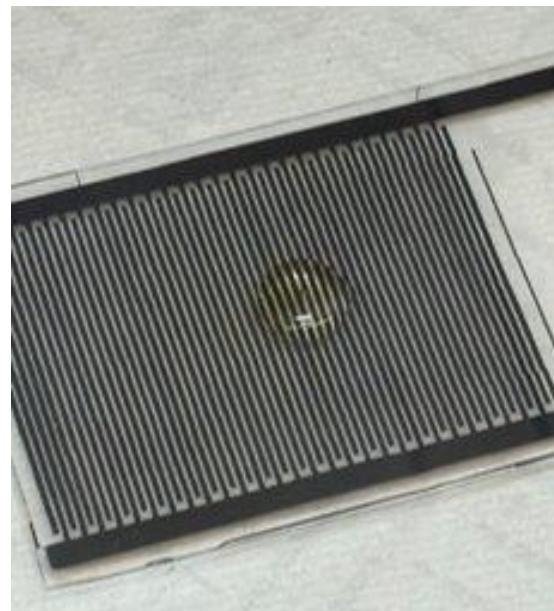


Abb. 5 Elastischer Silikon Leckagesensor mit
100µl Wassertropfen.

Als Messelektronik kam die weiter unten
beschriebene Testelektronik zum Einsatz. Die

Daten wurden über eine serielle Schnittstelle kontinuierlich während des Auftropfens ausgelesen, abgespeichert und anschließend in Origin 2024 ausgewertet. Auf eine Umrechnung des kapazitiven Messsignals wurde verzichtet, da im Wesentlichen die Signaländerung während einer Leckage von Interesse ist, daher sind die Messdaten als Rohdaten-Ausgangssignal dargestellt.

Die kapazitiv arbeitende Struktur des Leckagesensors wird elektronisch betrachtet in einen RC-Schwingkreis geschaltet, sodass ihre Kapazität über die Frequenz des Schwingkreises indirekt ausgewertet werden kann. Dabei zählt der Mikrocontroller die Anzahl der Be- und Entladezyklen innerhalb einer bestimmten Zeit. Zur besseren Vergleichbarkeit wird das Ausgangssignal jedes Sensors auf 0 genormt. In den Abbildungen ist jeweils der Rohdatenwert minus der Ausgangswert dargestellt, d. h. erhöht sich die Kapazität der Sensorstruktur durch das Auftropfen der Flüssigkeit, so verringert sich die gemessene Anzahl an Ladezyklen und der dargestellte Wert wird negativ.

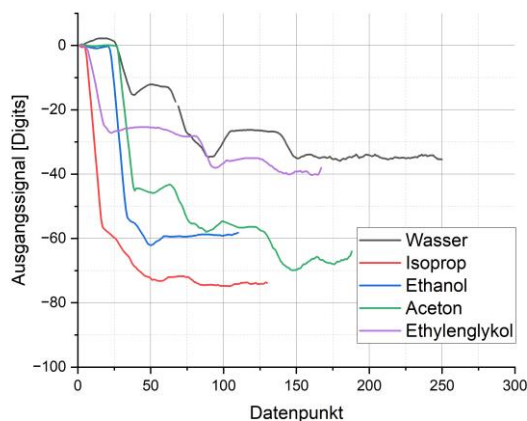


Abb. 6 Messsignal auf dem Leckagesensor von 100µl Wasser und gängige Lösemittel

In Abb. 6 ist die Messung für Wasser und gängige Lösemittel dargestellt. Das Messsignal wurde auf 0 normiert und direkt während der ersten Sekunden des Auftropfens aufgezeichnet. Da sowohl Wasser als auch Lösemittel eine Permittivität > 10 besitzen, ändert sich – wie zu erwarten – das kapazitive Messsignal. Allerdings spielt hier auch die Benetzungsfähigkeit eine Rolle: Wasser bildet einen Tropfen wie in Abb. 4, während die Lösemittel stärker zerfließen und dadurch eine größere Fläche der Interdigitalstruktur überdecken. Dies erklärt, warum die Signal-

änderungen der Lösemittel größer ausfallen als die des reinen Wassers.

Eine Änderung des Messsignals um mindestens 10 Digits während des Auftropfens kann hier festgestellt werden und als Kriterium für eine sichere Detektion herangezogen werden.

Tab. 1 Permittivität der getesteten Medien – Alle Werte beziehen sich auf Standardangaben aus der Literatur [2][3].

Medium	Permittivität
Wasser	Ca. 80
Isopropanol	Ca. 22
Ethanol	Ca. 20
Aceton	Ca. 26
Ethylenglykol	Ca. 39
Essigsäure	Ca. 8
Ammoniak	Ca. 28
Natronlauge	Ca. 80
Benzin	Ca. 2-3
Diesel	Ca. 2-3
Motoröl / Altöl	Ca. 2.3

In Abb. 7 ist das Messsignal für Essigsäure, Natronlauge und Ammoniak dargestellt. Hier hängt die Permittivität ebenfalls stark von der Konzentration ab, wobei die Permittivität der Natronlauge im Bereich des Wassers liegt, Essigsäure bei ca. 8 bzw. Ammoniak in verdünnter Konzentration bei ca. 28. Auch hier spielt die Benetzung eine Rolle; die Signaländerung von > 10 Digits lässt auch hier eine sichere Detektion zu.

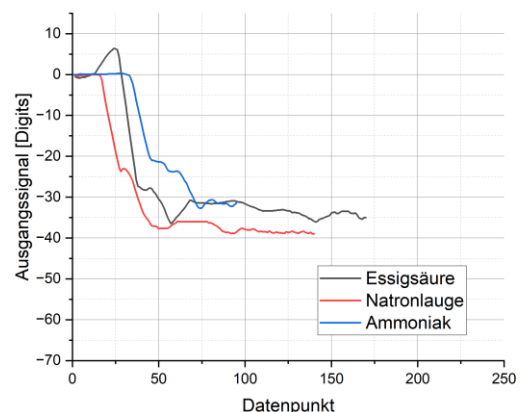


Abb. 7 Messsignal des Leckagesensors für 100µl Säuren und Laugen

Als weitere Substanzklasse wurden in Abb. 8 Kraftstoffe wie Benzin und Diesel sowie konventionelles Motoröl bzw. Altöl getestet. Der deutlichste Unterschied bei den Ergebnissen der Kraftstoffe und Öle ist, dass die

Signaländerungen beim Auftropfen der Medien deutlich geringer sind und mit < 10 Digits nicht sicher detektiert werden können. Dies ist auf die geringeren Permittivitäten der Medien zurückzuführen, die im Bereich zwischen 2 und 3 liegen. Hier würden gegebenenfalls Anpassungen der Interdigitalstruktur, etwa feinere Abstände oder dünnere Dielektrika, helfen. Ebenfalls möglich wäre der Einsatz anderer Materialien als Silikon oder Polyimid für das Grundsubstrat, da deren Permittivität ähnlich der des getesteten Mediums ist und somit nur eine geringe Verschiebung des elektrischen Feldes für die kapazitive Messung ermöglicht. Neben diesen Änderungen am Sensor selbst lässt sich aber sagen, daß bei einer höheren Überdeckungsfläche auch die Änderung der Kapazität deutlicher ausfällt.

Auffällig ist der Signalverlauf von Benzin: Dieser steigt nach kurzzeitigem Abfall wieder in den positiven Bereich an. Benzin durchdringt aufgrund seiner chemischen Struktur die Silikonschutzschicht und wirkt direkt auf die Interdigitalelektroden ein. Dabei wird die kapazitive Messung vermutlich dahingehend gestört, dass kein ausreichend großer Isolationswiderstand mehr vorhanden ist und vermutlich Kurzschlüsse zwischen den Elektroden zu diesem Verhalten führen.

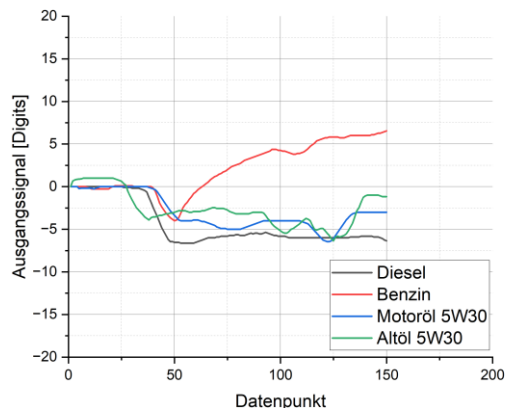


Abb. 8 Messsignal des Leckagesensors für 100µl Kraftstoffe und Öle

Auswerteelektronik

Der Sensor selbst wird durch eine energieeffiziente Elektronik komplettiert (Abb.9), welche das kapazitive Messsignal auswertet. Als moderne energieeffiziente System-on-Chip-Plattform (Mikrocontroller inkl. Sub-GHz-Transceiver) kommt EFR32FG23 von Silicon Labs zum Einsatz. Die Detektion arbeitet ereignis-gesteuert: Der erste auftreffende Tropfen weckt dabei die Elektronik auf und aktiviert die Auswertung und Datenübertragung. Das Betriebskonzept sieht dabei konkret auch

die Implementierung eines Heart-beats, die Übertragung des Batteriestatus und die Möglichkeit einer Ferndiagnose vor.

Das Projektteam setzte sich zum Ziel, den Betrieb der Elektronik mit Batterien über ca. 10 Jahre zu gewährleisten. Damit ist man unabhängig von einer vorhandenen Energieinfrastruktur und auch die Installation an schwer zugängliche Orte ist problemlos möglich („install and forget“). Das am Fraunhofer IIS entwickelte Funkprotokoll mioty® sorgt für eine energieeffiziente und zuverlässige Datenübertragung und integriert sich problemlos in vorhandene Überwachungsinfrastrukturen.



Abb. 9 Sensorelektronik mit Stromversorgung

mioty® ist ein LPWAN-Funkstandard, der mit Telegram-Splitting (TSMA) arbeitet: Jedes Telegramm wird in viele kurze Subpakete zerlegt und zeitlich/frequenzmäßig verteilt. Dadurch steigt die Robustheit gegenüber Störungen und Kollisionen, bei zugleich sehr geringer On-Airtime. mioty® nutzt lizenzfreie Sub-GHz-Bänder (z. B. EU 868 MHz SRD) und erfüllt die jeweiligen SRD-Vorgaben inklusive Duty-Cycle-Beschränkungen; die kurze Sendezeit unterstützt eine hohe Netzdichte und Skalierbarkeit.

Für batteriebetriebene Geräte ist mioty® besonders energieeffizient: Der Betrieb ist uplink-zentriert, die Sendephasen sind extrem kurz und lange Schlafzeiten dominieren, was typischerweise Batterielaufzeiten von 10+ Jahren bei wenigen Meldungen pro Tag ermöglicht. In der hier beschriebenen Lösung konnte ein Energiebedarf pro Messvorgang und Übertragung von etwa 16 µWh erreicht werden bei einem Standby-Stromverbrauch von ca. 34 µA (1 Sensor) bzw. ca. 46 µA (Sensor-Array mit 16 Sensoren).

Die Reichweite beträgt je nach Umgebung mehrere Kilometer bei tiefer Gebäudedurchdringung. Die Netztopologie ist sternförmig mit zentralen Basisstationen die eine Vielzahl von batteriebetriebenen Sensorknoten bedienen können. Die Anbindung ans Backend erfolgt IP-seitig (z. B. MQTT/REST), wodurch sich mioty® nahtlos in Leit-, Cloud- und Monitoring-Systeme integrieren lässt. Downlinks sind verfügbar, werden aber bewusst sparsam

genutzt (Konfiguration). Sicherheitsfunktionen wie Verschlüsselung und Integritätsschutz (z. B. AES-128) sowie Geräteauthentisierung werden unterstützt.

Für den Leckagesensor empfiehlt sich ein ereignisbasierter Uplink (Alarm sofort senden, optional kurzzeitige Wiederholung zur Erhöhung der Zustellsicherheit), ergänzt um seltene Heartbeats (z. B. täglich) mit Batteriestatus und Selbsttest-Ergebnissen. Konfigurierbare Schwellwerte und Haltezeiten helfen, Fehlalarme durch Kondensat oder Spritzwasser zu vermeiden. Diese Betriebsweise vereint schnelle Alarmierung, hohe Zuverlässigkeit und sehr niedrigen Energieverbrauch.



Abb. 10 Sensorarray mit angebundener Elektronik während Tests

Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine auf einem kapazitiv arbeitenden Messprinzip basierende Leckagesensorik in unterschiedlichen Ausbaustufen erfolgreich getestet. Beginnend mit Einzelsensoren aus vollständig elastischem Silikonelastomer für eine flexible Anpassung an die Anwendung, über hybride Aufbauten mittels Polyimid-Grundsustrat, per Lasergravur hergestellten Elektroden und elastischer Übersichtung, bis hin zu flexiblen Sensorarrays in der Größe eines DIN-A4-Blattes (Abb. 10), die mittels Siebdruck hergestellt wurden.

Dabei zeigte sich gerade für das Siebdruckverfahren und die Elektroderung mittels Lasergravur eine potentiell kostengünstige Skalierung in größere Stückzahlen, da diese Prozesse industriell etabliert sind.

Die Leckagesensorik wurde erfolgreich mit Wasser, Lösemitteln, Säuren und Laugen getestet, und der Nachweis einer Detektion ab dem ersten Tropfen (100 µl) erbracht. Die Detektion von Medien mit einer dem Sensor ähnlichen Permittivität ist zwar möglich, aber eine sichere Detektion ist erst ab größeren Mengen oder mit geänderten Sensorparametern möglich. Die dem Sensor zugehörige Elektronik wurde erfolgreich mittels einer kapazitiven Engine umgesetzt und die Übertragung der Tropfenevents mittels des mioty®-Standards erfolgreich realisiert.

In folgenden Arbeiten sollen die Einsatzbereiche auch unter erschwerten Bedingungen über längere Zeiträume validiert werden. Durch die flexible Ausgestaltung der Sensorik sollen Anwendungen in der Prozessmesstechnik, beim Überwachen schwer zugänglicher Baustrukturen im privaten oder gewerblichen Bereich und gegebenenfalls Anwendungen im Agrarbereich evaluiert werden.

Quellen

- [1] <https://www.gdv.de/gdv/statistik/statistiken-zur-deutschen-versicherungswirtschaft-uebersicht/schaden-und-unfallversicherung#sachversicherung>
- [2] Rumble, J. R. (Ed.). (2023). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (104th ed.). CRC Press. Abschnitt: Dielectric Constants of Pure Liquids.
- [3] Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (Eds.). (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill.