

Leibniz-Institut für
Festkörper- und Werkstoffforschung
Dresden e.V.

**Untersuchung und Bewertung des Einsatzes
energieautarker, mikroakustischer Sensoren
zur Eisdetektion an Rotorblättern
von Windenergieanlagen**

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben,
gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem Aktenzeichen AZ 38120/01-24/0

von

Dipl.-Ing. Philipp Schulmeyer & Dr. Hagen Schmidt

Dresden, 31.01.2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Verzeichnis von Abbildungen	2
Verzeichnis von Tabellen.....	3
Abkürzungen	3
Formelzeichen	3
Einleitung.....	5
Hauptteil.....	9
1. Arbeitsschritte, Methoden, Ergebnisse.....	9
1.1 Sensorentwicklung	9
1.1.1 Simulation.....	9
1.1.2 Konzeption.....	14
1.1.3 Herstellung	16
1.1.4 Untersuchungen zur Eisdetektion	17
1.1.5 Ergebnisse & Bewertung	26
1.2 Materialbeständigkeit	27
1.2.1 Laboruntersuchungen zum Korrosionsverhalten.....	27
1.2.2 Feldversuch	29
1.2.3 Ergebnisse & Bewertung	31
1.3 Aufbau- und Verbindungstechnik.....	32
1.3.1 Sensorgehäuse & Installation.....	32
1.3.2 Antennen- und Lesegerätinstallation an WEA	35
1.3.3 Bewertung	37
1.4 Funkabfrage.....	38
1.4.1 Untersuchungen am Boden.....	39
1.4.2 Untersuchungen an WEA	41
1.4.3 Bewertung	44
2 Diskussion der Ergebnisse	45
3 Bewertung der Ergebnisse	46
4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse	47
5 Fazit	47
Literaturverzeichnis.....	49
Anhänge.....	49

Zusammenfassung

Ziel und Innovation des Projekts „Untersuchung und Bewertung des Einsatzes energieautarker, mikroakustischer Sensoren zur Eisdetektion an Rotorblättern von Windenergieanlagen“ ist die experimentelle Untersuchung von funkabfragbaren, passiven Sensoren auf Basis der Akustischen Oberflächenwellen-Technologie (SAW-Technologie) zur Detektion von Eisbeladung auf Rotorblättern von Windenergieanlagen (WEA) und eine Bewertung der Technologie in diesem Anwendungsgebiet.

Zur Erreichung der Projektziele wurden sechs Arbeitspakete bearbeitet. Diese beinhalten die SAW-Sensorentwicklung mit dem Ziel der Herstellung mindestens eines Chipmusters und der Charakterisierung der hergestellten Bauelemente, die Untersuchung zur Materialbeständigkeit mit dem Ziel der Herstellung von passivierten Testbauelementen und der Untersuchung der Widerstandsfähigkeit dieser unter Labor- und industriellen Bedingungen, die Entwicklung von Konzepten zu einer für die Bauelemente geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), sowie einer Montagefassung für die entwickelten Sensoren inklusive deren Felduntersuchung an einer WEA, die Untersuchung und Qualifizierung eines Funkabfragesystems unter Labor- und industriellen WEA-Bedingungen, die Herstellung sowie Vor-Ort-Untersuchung und Validierung eines Demonstrator-Systems zur Eisdetektion am WEA-Rotorblatt und abschließend die Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Aus den durchgeführten Untersuchungen haben sich im Rahmen der Sensorentwicklung vier prinzipielle Möglichkeiten des Bauelementaufbaus ergeben, die untersucht wurden. Von diesen hat sich eines als vielversprechendes SAW-Chipdesign bewiesen. Die zusätzliche Möglichkeit zu einer präzisen Eisschichtdickenmessung bis zu etwa 15 mm ist ein weiteres Ergebnis. Des Weiteren empfiehlt sich ein Chipdesign für grundlegendere zukünftige Untersuchungen. Untersuchungen zur Materialverträglichkeit haben gezeigt, welche Störgrößen beim Einsatz am realen Rotorblatt auftreten können und Laboruntersuchungen haben zu einem Passivierungssystem für Bauelemente geführt, welches unter chemisch extrem anspruchsvollen Bedingungen die Anforderungen ausreichend erfüllt.

Das für das funkabfragbare SAW-Sensorsystem entwickelte AVT-Konzept wurde sowohl unter Verwendung von kommerziell verfügbaren als auch von selbstentwickelten und -hergestellten Sensor-Bauelementen im Bereich der WEA-Gondel als auch am Turm auf Höhe der Rotorblattspitze erfolgreich getestet.

Bestehende Herausforderungen, die weiterhin untersucht wurden, sind ein geeignetes Packaging für das SAW-Sensor-Bauelement zur Eisdetektion und für die Eisschichtdickenmessung, um einen SAW-Sensor-Demonstrator zur Installation am Rotorblatt herstellen zu können. Die Funkabfrage von selbsthergestellten Sensor-Bauelementen konnte sowohl im Rotorblattwurzelbereich als auch im Bereich der Rotorblattspitze erfolgreich realisiert werden. Die zuverlässige Funkabfrage im Betrieb der Windenergieanlage steht noch aus, da die Verwendung von Standard-Lesegeräten nicht die hierfür notwendigen technischen Voraussetzungen erfüllen. Insbesondere um eine Funkabfrage im Betrieb der WEA bei hohen Drehzahlen zu ermöglichen, ist die Entwicklung eines speziell für diesen Anwendungsfall angepassten Lesegerätes mit hoher Abfragegeschwindigkeit erforderlich.

Das Projekt „Untersuchung und Bewertung des Einsatzes energieautarker, mikroakustischer Sensoren zur Eisdetektion an Rotorblättern von Windenergieanlagen“ ist ein durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Forschungsprojekt (AZ 38120/01-24/0), das durch das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V. gemeinsam mit cp.max Rotortechnik GmbH & Co. KG bearbeitet wurde.

Verzeichnis von Abbildungen

Abbildung 1 - Schematischer Aufbau eines WEA-Sens Systems	6
Abbildung 2 - Funktionsschema eines SAW-Sensors mit Reflective Delay Line-Aufbau	7
Abbildung 3 – SAW-Parametersimulation für 128°-YX Lithiumniobat.....	11
Abbildung 4 – SAW-Parametersimulation für 64°-YX Lithiumniobat.....	12
Abbildung 5 – SAW-Parametersimulation für piezoelektrische Substrate mit SiO ₂ -Wellenleiterschicht.....	13
Abbildung 6 – Beladungsabhängigkeit des Dämpfungsverhaltens von 41LN mit SiO ₂ -Wellenleiterschicht.....	14
Abbildung 7 - Schematische Darstellung von SAW-Sensortopologien	15
Abbildung 8 – Laborstand zur Temperaturcharakterisierung	17
Abbildung 9 – Sensorschema Interdigitalwandlerstruktur	18
Abbildung 10 - Admittanzverhalten für IDT auf 128°-rotiertem Y-Schnitt Lithiumniobat	19
Abbildung 11 - Admittanzverhalten für IDT auf 64°-rotiertem Y-Schnitt Lithiumniobat	19
Abbildung 12 – Sensorschema Zwei-Tor-Verzögerungsleitung.....	20
Abbildung 13 – Realisierte Dual-Mode Verzögerungsleitung	20
Abbildung 14 – Eisdetektion mittels Dual-Mode-Verzögerungsleitung.	21
Abbildung 15 – Arbeitsschema des SAW-Sensors zur Eisschichtdickenmessung	22
Abbildung 16 - SAW-Sensor zur Eisschichtdickenmessung	22
Abbildung 17 – Charakteristischer Signalverlauf bei Eisschichtdickenmessung.	23
Abbildung 18 – Reaktion des Sensors auf unterschiedliche Beladungen.....	24
Abbildung 19 – Eisdetektion mittels impedanzbeladener reflektiver Verzögerungsleitung: Aufbau	25
Abbildung 20 – Eisdetektion mittels impedanzbeladener reflektiver Verzögerungsleitung: Signalverläufe	25
Abbildung 21 – Laboruntersuchung zur Korrosionsbeständigkeit gegenüber KOH.....	28
Abbildung 22 – Mikroskopaufnahmen nach Laborversuch zur Materialbeständigkeit mit HCl.	29
Abbildung 23 – WEA-Felduntersuchung zur Sensorbeständigkeit.....	30
Abbildung 24 – Schädigungsbilder nach WEA-Feldversuch.....	31
Abbildung 25 - Anbringung von SAW-Bauelement inklusive Antenne am Rotorblatt.	34
Abbildung 26 - Installation der Antennen an der WEA.....	36
Abbildung 27 – Lesegeräte und schematische Darstellung.....	37
Abbildung 28 - Aufbau zur Untersuchung der Funkabfrage mittels des 433 MHz-Systems.	40
Abbildung 29 – Betriebsdiagramm der WEA-Messungen.....	42
Abbildung 30 - Aufbau zur Untersuchung der Funkabfrage mittels des 2,45 GHz-Systems.	42
Abbildung 31 - Aufbau zur Untersuchung der Funkabfrage mittels 433 MHz-System im Bereich der Rotorblattspitze.....	44

Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1 - Vergleich von piezoelektrischen Substraten bezüglich ihrer Möglichkeit zur Eisdetektion	9
Tabelle 2 - Bewertung der Sensortopologien zur SAW-Eisdetektion	15
Tabelle 3 - Bewertung der Gestaltungsformen anhand der Untersuchungsergebnisse	26

Abkürzungen

ALD	Atomlagenabscheidung, engl.: Atomic Layer Deposition
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
FEM	Finite-Element-Methode
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GSAW	Generalisierte SAW
HF	Hochfrequenz
IDT	Interdigitalwandler, engl.: Interdigital Transducer
IPEX	Standard für Miniatur-HF-Steckverbinder
ISM	Frequenzband Industry-Scientific-Medical
LN	Lithiumniobat
LRW	Rayleighwelle mit Leckanteil
LSAW	SAW mit Leckanteil
LT	Lithiumtantalat
LTE	Breitbandtechnologie (3.9G), engl.: Long Term Evolution
NFC	Nahfeldkommunikation, engl.: Near Field Communication
PCB	Leiterplatte, engl.: Printed Circuit Board
PLA	Polylactid
PWA	Partialwellenanalyse
RX	Empfänger, engl.: Receiver
SAW	Akustische Oberflächenwelle, engl.: Surface Acoustic Wave
SH	Scher-horizontal
SIM	Teilnehmeridentitätsmodul, engl.: Subscriber Identity Module
SiO ₂	Siliziumdioxid
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis, engl.: Signal-to-Noise-Ratio
TPU	Thermoelastisches Polyurethan
TX	Sender, engl.: Transmitter
VNA	Vektornetzwerkanalysator
WEA	Windenergieanlage
WLAN	Kabelloses Netzwerk, engl.: Wireless Local Area Network

Formelzeichen

v	Phasengeschwindigkeit	m/s
K ²	Kopplungsfaktor	%
u	Auslenkung	m

X, Y, Z	Kristallografische Koordinaten	m
x, y, z	Akustische Koordinaten	m
Ψ (psi), θ	Wellenausbreitungswinkel	°
λ	Wellenlänge	m
h	Höhe, Dicke	m
S	S-Parameter	dB
a	einlaufende Welle	$\sqrt{W}$
b	auslaufende Welle	$\sqrt{W}$
Y, Y_0	Admittanz	$1/\Omega$
ϵ	Permittivität	-

Einleitung

Windenergieanlagen (WEA) erzeugen mit ca. 52 % den größten Anteil an ökologisch produziertem Strom in Deutschland [1]. Um ihre Effizienz und Zuverlässigkeit zu maximieren, sind elektrische und mechanische Triebstränge moderner WEA bereits umfassend mit Sensoren zur Zustandsüberwachung ausgestattet. Allerdings fehlen solche Sensoren bisher weitgehend an den Rotorblättern, obwohl diese als erstes Glied in der Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie eine Schlüsselrolle spielen. Die Gründe hierfür sind technische Herausforderungen, wie z.B. die Anforderung, dass Sensoren die Blattform und Aerodynamik nicht beeinträchtigen dürfen, mehrere Jahre wartungsfrei arbeiten müssen und extrem widerstandsfähig gegenüber Umweltbelastungen sein sollen.

Besondere Beachtung erfordert zudem das Blitzschlagrisiko, das durch elektrische Leitungen zur Daten- und Energieübertragung entsteht und rein elektrische Sensorkonzepte mit Leitungen entlang der Rotorblätter ausschließt. Im Rahmen des vorliegenden Projekts ist erstmals eine innovative, drahtlos abfragbare mikroakustische Sensortechnologie für die Rotorblattüberwachung zum Einsatz gekommen. Ziel war es, Einschränkungen bisheriger Ansätze zu überwinden, die Energieausbeute und Lebensdauer von WEA zu erhöhen sowie deren wirtschaftlichen Ertrag nachhaltig zu steigern.

Ein Schwerpunkt des Projekts zielte darauf ab, die Effizienz von WEA insbesondere in Regionen mit starken Vereisungen („Cold Climates“) zu verbessern. In solchen Gebieten führen Eisansatz und die damit einhergehenden aerodynamischen Veränderungen zu Leistungsverlusten von 10 [2] bis 18 % [3] und erhöhen durch Unwuchten den Bauteilverschleiß. Die hier untersuchte neuartige Sensorik ermöglicht eine präzisere Detektion von Eisbildung direkt an den Rotorblättern. Dadurch können WEA effizienter betrieben und unnötige Stillstandszeiten durch zu frühes Abschalten oder verspätetes Wiederauffahren vermieden werden. Das verbessert nicht nur die Energieausbeute, sondern trägt durch reduzierte Belastungen auch zur Entlastung der Umwelt bei.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Möglichkeit, die Sensortechnologie ressourcenschonend an bestehenden Anlagen nachzurüsten. Angesichts von rund 90.000 drehenden Rotorblättern allein in Deutschland könnte dies einen erheblichen Umwelteffekt haben. Eine längere Nutzungsdauer bestehender Anlagen reduziert die Notwendigkeit von Neubauten, schont Materialressourcen und verringert die Menge an zu entsorgenden Altmaterialien wie Rotorblätter aus problematischen Faserverbundwerkstoffen.

Die mikroakustische Technologie ermöglicht zudem Energieautarkie, wodurch auf Batterien, Akkus oder Solarzellen am Sensor verzichtet werden kann. Dies minimiert die Umweltbelastung bei Herstellung und Entsorgung und reduziert den Materialaufwand insgesamt. Im Vergleich zu bestehenden Überwachungssystemen zeichnet sich die Lösung durch eine höhere Zuverlässigkeit und Ressourceneffizienz aus.

Das Projekt umfasst die Entwicklung und Prüfung geeigneter Sensoren und Montagestrukturen für Rotorblätter sowie deren Funkabfragbarkeit und Witterungsbeständigkeit unter realen Betriebsbedingungen. Im Pilotanwendungsfall wird die Detektion von Eisbildung fokussiert, da diese nicht nur zu erheblichen Leistungseinbußen, sondern auch zu erheblichen Sicherheitsrisiken wie Eiswurf führt. Momentan fehlen zuverlässige Sensoren für diese Aufgabe, sodass Anlagen häufig zu früh oder zu spät abgeschaltet werden.

Langfristig könnte die mikroakustische Sensortechnologie auch auf weitere Einsatzbereiche wie Luftfahrzeuge, Gleisanlagen oder Oberleitungen übertragen werden. Auf Basis des Projektes wird daher nicht nur ein Technologietransfer angestrebt, sondern auch eine nachhaltige Grundlage für die breitere Nutzung geschaffen.

Mit der im vorliegenden Projekt adressierten innovativen Technologie - mikroakustische Sensorik auf Basis akustischer Oberflächenwellen – können die Nachteile und Einschränkungen bisheriger Lösungen, die sich in Form von einer sehr aufwendigen und damit kostspieligen Nachrüstung sowie einer teils unzureichenden Möglichkeit der Nachrüstung ausdrücken, überwunden werden. Sie ermöglichen damit Sensorsysteme, die auf kleinen, hochfunktionalen Einzelkomponenten basiert, weder eingebaute Energiequellen noch elektrische Verkabelung zur Energieversorgung benötigt und damit eine kontinuierliche Zustandsüberwachung per Funkabfrage realisieren, ohne den anspruchsvollen Blitzschutz der WEA zu gefährden.

Die den mikroakustischen Chips zugrunde liegende SAW-Technologie (Surface Acoustic Wave) hat sich seit Jahren in der drahtlosen Kommunikation bewährt. SAW-basierte Hochfrequenzfilter sind unverzichtbare Bauelemente für WLAN-, NFC- und Bluetooth-Anwendungen, Funkfernbedienungen sowie Mobiltelefone und Basisstationen. Die Herstellung dieser Chips basiert auf bewährten Verfahren der mikroelektronischen Chiptechnologie, was eine kostengünstige Massenproduktion ermöglicht. Zudem erlaubt das spezifische Design von SAW-Bauelementen eine definierte Abhängigkeit ihrer Charakteristik von physikalischen Größen einzustellen, was sie ideal für leistungsstarke Sensortechnologien macht.

Die Nutzung von SAW-Bauelementen als Sensoren zur Zustandsüberwachung wird seit Jahren vorangetrieben. Bereits heute finden sie Anwendung in industriellen Systemen zur Messung von Temperatur, Druck, Dehnung, Beschleunigung und Massenbeladung [4]. Allerdings fehlen bislang umfassende Untersuchungen, wie diese Sensoren unter den anspruchsvollen klimatischen Bedingungen von Windenergieanlagen (WEA) eingesetzt werden können.

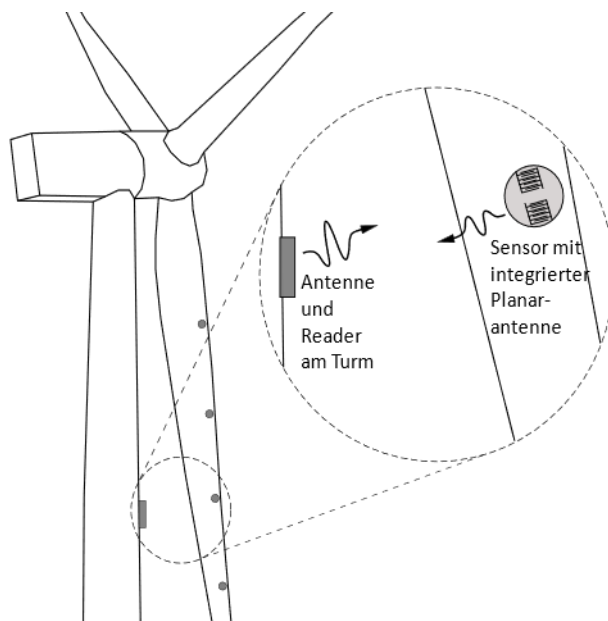


Abbildung 1 - Schematischer Aufbau eines WEA-Sens Systems bestehend aus der Readereinheit am Mast und Sensoreinheiten an den Rotorblättern

Ein entscheidender Vorteil mikroakustischer Sensoren liegt in ihrer passiven Funktionsweise: Sie benötigen keine externe Energieversorgung durch Kabel, Batterien oder Solarzellen. Die Energie des Abfrage-Funksignals genügt, um eine mikroakustische Oberflächenwelle im Sensor zu erzeugen. Diese Welle erfasst Messgrößen, die anschließend drahtlos zur Abfrageeinheit übertragen werden. Ein Sensorsystem kann dabei aus einer Reader-Einheit mit Antennen am WEA-Mast und mehreren Sensoren, die mit kleinen Planarantennen an den Rotorblättern montiert sind, bestehen.

Für die in diesem Vorhaben untersuchte Pilotanwendung der Eisdetektion werden die Sensoren derart montiert, dass entsprechend passivierte Teilbereiche der Sensoroberfläche in direktem Kontakt zur Umgebungsatmosphäre stehen und somit auch von einer lokalen Eispbildung auf dem Rotorblatt mit betroffen werden. Die Detektion der Vereisung erfolgt dann entweder entsprechend dem in Abb. 4 dargestellten Funktionsschema eines Sensorsystems mit Reflective delay line-Aufbau oder in prinzipiell

ähnlicher Weise mit SAW-Resonatoren, bei denen die Änderung ihres Schwingverhaltens in Abhängigkeit von ihrer Oberflächenbeladung gemessen und ausgewertet wird.

Für eine zuverlässige Eisdetektion mittels SAW-Sensoren müssen zwei Fälle unterschieden werden. Erstens die Detektion bei stehendem Rotor und zweitens im Betrieb. Eis bildet sich im Betrieb zuerst an der Anströmkante im Bereich der Rotorblattspitze, da dort durch die hohe Anströmgeschwindigkeit, entsprechende Druckverhältnisse und größte Wahrscheinlichkeit von Wolkendurchgängen (unterkühlte Wassertröpfchen) die besten Voraussetzungen zur Eisbildung vorliegen. Auch bei stehendem Rotor bildet sich Eis meist zuerst an höher gelegenen Stellen, die häufig mit der Rotorblattspitze zusammenfallen. Deswegen ist mindestens ein Sensor an der Rotorblattspitze notwendig. Für ein vollständigeres Bild des Vereisungszustandes am Rotorblatt können weitere SAW-Sensoren im Bereich der Anströmkante über das Rotorblatt verteilt werden. So wären zwei zusätzliche Sensoren im Bereich der größten Profiltiefe wie auch im Blattwurzelbereich denkbar.

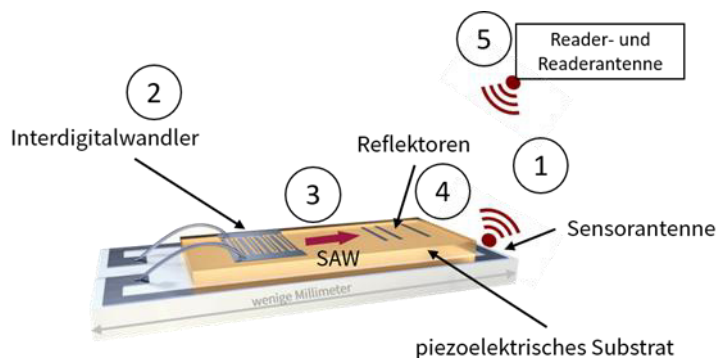


Abbildung 2 - Funktionsschema eines SAW-Sensors mit Reflective Delay Line-Aufbau

Heutige industriell genutzte SAW-Sensor-Systeme, die beispielsweise zur Temperaturmessung oder Identifikation von schnell bewegten Objekten in Fertigungsstrecken ihre Anwendung finden, weisen eine übliche Signalreichweite von 15 m (und mehr) auf. Die Nutzung solcher Multi-Sensor-Systeme an Rotorblättern mit Abmessungen von über 100 m ist prinzipiell mit einem

einzigem Reader und am Turm verteilten Antennen-Array möglich. Die Unterscheidung der einzelnen Sensoren erfolgt über die Verwendung spezifischer Arbeitsfrequenzen. Die Nutzung mehrerer Reader kann die Abfragesicherheit erhöhen, ist aber nicht notwendig.

Die Funkabfrage der SAW-Sensoren umfasst dabei die folgenden fünf Schritte:

1. Der Reader sendet mittels seiner am Mast befindlichen Reader-Antenne elektromagnetische Wellen in Form eines Abfrage-Funkimpulses an SAW-Sensor mit planarer Antenne auf dem Rotorblatt.
2. Interdigitalwandler auf piezoelektrischem Substrat wandeln die elektromagnetische Welle des empfangenen Funksignals in akustische Oberflächenwelle (SAW). Deren Wellenform, die sog. Polarisation (sie beschreibt die Hauptschwingungsrichtung der SAW an der Substratoberfläche), wird durch die Wahl eines geeigneten Substratmaterials vorgegeben und ist entscheidend für die Art und Stärke der sensorischen Funktion. Typische SAW sind z.B. entweder „out-of-plane“ oder „in-plane“ (auch als „SH“ bezeichnet) polarisiert.
3. Wichtig ist dabei der Umstand, dass unterschiedliche Oberflächenbelegungen des Sensors wie flüssiges Wasser (z.B. durch Regen, Tau etc.) oder Eis die akustische Welle jeweils auf sehr unterschiedliche charakteristische Weise beeinflussen. So werden die im Projekt hauptsächlich vorgesehenen SH-SAW nach Abb. 5b durch Luft- und Wasserbelegung aufgrund ihrer (trotz der seitlichen Scherung) plan bleibenden Oberfläche kaum bedämpft, wohingegen sie bei Eisbelegung eine starke Dämpfung aufweisen. Diese Abhängigkeit ermöglicht eine sichere Erkennung von Vereisungen der Sensoroberfläche und damit auch der Rotorblätter durch die Unterscheidung gegenüber anderen Betriebszuständen, wie sie trockenes Wetter bzw. Regen mit flüssiger Beaufschlagung der Sensoren bilden.

4. Durch die Reflektoren wird die anteilig gestreute SAW zum Interdigitalwandler zurückgeleitet und von diesem wieder in eine elektromagnetische Welle gewandelt, die über die planare Antenne der Sensoreinheit als Funksignal abgestrahlt wird.
5. Im Reader wird das empfangene Funksignal der Sensoren (i.d.R. mindestens ein Sensor pro Rotorblatt) mit dem gesendeten Primärsignal verglichen und aus dem Unterschied der beiden Signale (i.d.R. Dämpfung und/oder Laufzeitverschiebung) Rückschlüsse auf die Art der Oberflächenbelegung gezogen.

Das Gesamtsystem aus Reader und Sensoren kann so nach Schritt 5 aus den gemessenen Signalverläufen eindeutig auf eine Eisbildung am Rotorblatt schließen.

Die sechs Arbeitspakete und deren Ziele für dieses Projekt lauten wie folgt:

1. Sensorentwicklung: Herstellung mindestens eines Chipmusters und Charakterisierung der Bauelemente
2. Materialbeständigkeit: Herstellung von passivierten Testbauelementen und Untersuchung der Widerstandsfähigkeit unter Labor- und industriellen Bedingungen
3. Aufbau- und Verbindungstechnik: Entwicklung von Konzepten für AVT und Montagefassung der Sensoren sowie Felduntersuchungen an WEA zur Evaluierung
4. Funkabfrage: Untersuchung und Qualifizierung eines Funkabfragesystems unter Labor- und industriellen WEA-Bedingungen
5. Funktionstest an WEA: Herstellung sowie Vor-Ort-Untersuchung und Validierung eines Demonstrator-Systems zur Eisdetektion am WEA-Rotorblatt
6. Projektauswertung und Ausblick: Zusammenfassung aller Erkenntnisse, darauf aufbauen Konzeption zur Weiterarbeit und Untersuchung weitergehender Anwendungsszenarien

Hauptteil

1. Arbeitsschritte, Methoden, Ergebnisse

1.1 Sensorentwicklung

1.1.1 Simulation

Die Konzeptionierung und Entwicklung eines SAW-Sensors, der für die Eisdetektion auf der Oberfläche von Windenergieanlagen kabellos und passiv verwendet werden kann, basiert auf Mikroakustik-Simulationen. Bei diesen stand im Vordergrund, geeignete Materialsysteme zu finden, bei denen die erforderlichen Detektionsmechanismen ausreichend ausgeprägt sind.

Materialsysteme für SAW-Sensoren bestehen aus einem piezoelektrischen Substrat, einer Metallisierung und bei Bedarf einer Passivierungsschicht oder Wellenleiterschicht. Eine Passivierungsschicht soll insbesondere die Metallisierung, welche bspw. in Form von Wandlerstrukturen zur Anregung von akustischen Oberflächenwellen (SAW) dient, vor Umgebungseinflüssen schützen. Eine Wellenleiterschicht kann als Passivierungsschicht zusätzlich die Funktion erfüllen, das auf dem piezoelektrischen Substrat weitere akustische Moden angeregt werden können, die eine Detektion von Eisansatz auf deren Oberfläche ermöglichen. Piezoelektrische Substrate können in Bezug auf das Einkristallmaterial, den Kristallschnitt und die SAW-Ausbreitungsrichtung kategorisiert werden. Entsprechend dieser Eigenschaften ergeben sich Charakteristika wie auftretende Moden, die den Detektionsmechanismus bestimmen, die Anregbarkeit dieser Moden, welche über den Kopplungsfaktor K^2 ausgedrückt wird, sowie die Phasengeschwindigkeit v der SAW. Ein hoher Kopplungsfaktor K^2 sichert, dass die Verkopplung zwischen elektrischer Energie und akustischer Energie der SAW ausreichend für die vorgesehene sensorische Anwendung ist.

Betrachtet wurden die piezoelektrischen Einkristalle Quarz, Lithiumniobat (LiNbO_3 , kurz: LN) und Lithiumtantalat (LiTaO_3 , kurz: LT). Mit folgender Tabelle können deren charakteristische Eigenschaften verglichen werden:

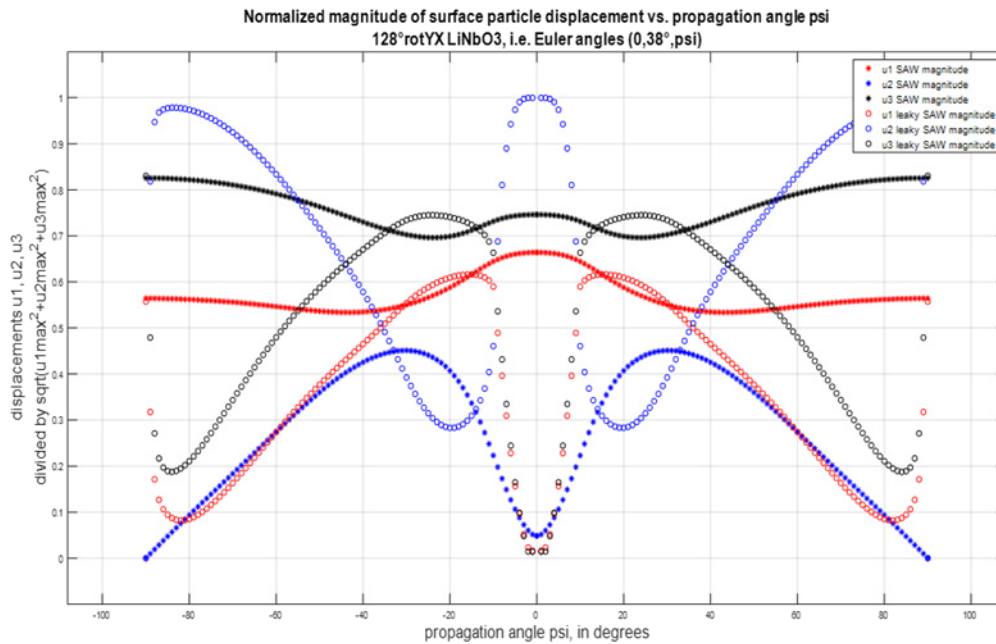
Tabelle 1 - Vergleich von piezoelektrischen Substraten bezüglich ihrer Möglichkeit zur Eisdetektion

Material	Schnitt	Ausbreitungs- richtung	v in m/s	K^2 in %	Bewertung
Quarz	ST	X	3159	0,12	Temperaturkompensierter Kristallschnitt mit vergleichsweise schwachem K^2
LiNbO_3	128°-Y	X	3979	5,4	Anregung von Rayleighwelle, gut geeignet zur Detektion von Flüssigkeitsbeladung
LiNbO_3	64°-Y	X	4742	11,0	Anregung von SH-Welle, gut geeignet zur Eisdetektion, hoher K^2
LiNbO_3	41°Y	X	4792	17,0	Anregung von SH-Welle, gut geeignet zur Eisdetektion, sehr hoher K^2
LiTaO_3	36°Y	X	4212	4,8	Anregung von SH-Welle gut, geeignet zur Eisdetektion

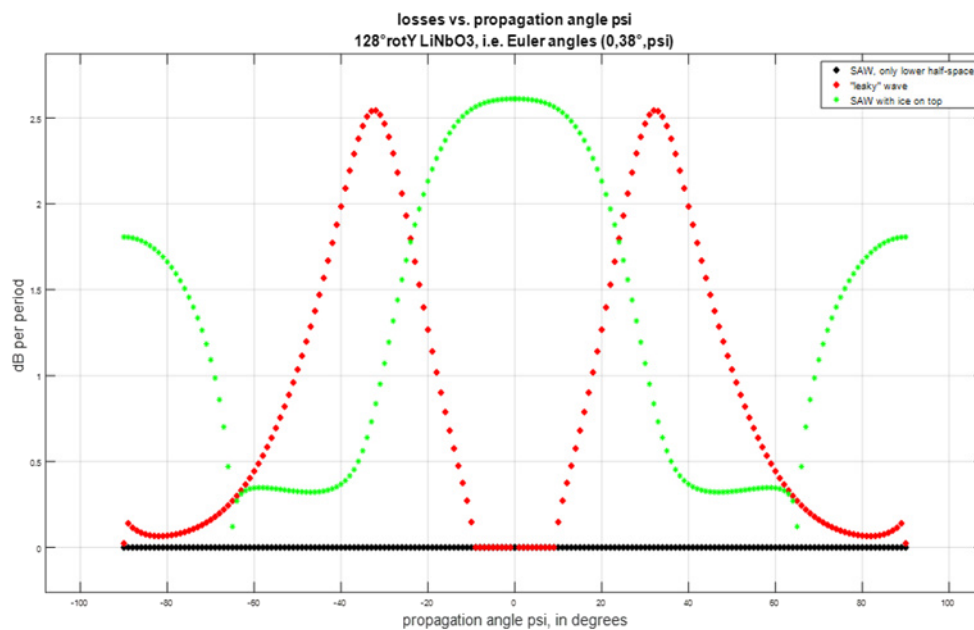
Die nachfolgenden Simulationsrechnungen wurden mit der Finite-Element-Methode-Software (FEM) COMSOL Multiphysics 6.2 durchgeführt und mittels Partialwellenanalyse (PWA), die als Unterauftrag von der Firma InnoXacs durchgeführt wurde, bestätigt.

Die Anforderungen an das piezoelektrische Substrat sind, dass vorzugsweise die Anregung von scher-horizontal polarisierten (SH) Moden mit möglichst hohem Kopplungsfaktor K^2 möglich ist und darüber hinaus ggf. bei abweichender Wellenausbreitungsrichtung auch eine Rayleighwelle angeregt werden kann. Hintergrund ist, dass mit Hilfe von SH-Moden der Detektionsmechanismus für Eis gegeben ist. Dies liegt daran, dass SH-Moden zunächst mechanisch nicht mit Flüssigkeiten auf der Oberfläche koppeln. Nimmt allerdings die Viskosität der Flüssigkeit – wie beim Vereisungsprozess – zu findet Kopplung zwischen der akustischen Welle und dem Eis statt. Die Welle wird gedämpft. Rayleigh-Moden bzw. die Rayleighwelle sind in der Sagittalebene des piezoelektrischen Substrates polarisiert (**Abbildung 3a**) und werden generell von Flüssigkeiten gedämpft. Bei Eisbeladung werden diese sehr stark gedämpft (**Abbildung 3b**). Das heißt, mit der Rayleighwelle kann Flüssigkeit wie z.B. Regen auf der Rotorblattoberfläche detektiert werden und mit der SH-SAW kann Eis detektiert werden.

Abbildung 3a zeigt die Teilchenauslenkung der Rayleigh-Mode (SAW magnitude) und einer Leckmode (leaky SAW magnitude) auf 128°-rotiertem Y-Schnitt Lithiumniobat (128LN). Bei Leckmoden handelt es sich um Oberflächenmoden, die parasitäre Volumenwellen anregen und daher verlustbehaftet sind. Die Teilchenauslenkung ist durch die orthogonalen Komponenten u_1 , u_2 und u_3 angegeben, die entlang der Wellenausbreitungsrichtung, der horizontalen Scherrichtung und der Richtung in der Oberflächennormalen entsprechen. Rayleighwellen haben ihre maximale Auslenkung als u_3 -Komponente und scher-horizontal polarisierte Wellen als u_2 -Komponente. Die in **Abbildung 3a** gezeigten Teilchenauslenkungen sind auf den maximalen Betrag des Teilchenauslenkungsvektors normiert. Die x -Achse zeigt den Winkel ψ der Wellenausbreitungsrichtung zur Kristallachse X . Die Rayleigh-Mode zeigt über den gesamten Winkelbereich von ψ eine maximale Teilchenauslenkung in der Sagittalebene. Die Leckmode hat ihr Auslenkungsmaximum für Winkel von Null und etwa $\pm 85^\circ$ bei u_2 und ist dort scher-horizontal polarisiert. Die Rayleigh-Mode weist bei $\psi=0$ einen Kopplungsfaktor K^2 von 5,4 % auf (siehe Tabelle 1). Für alle anderen Winkelbereiche gehen die Kopplungsfaktoren gegen Null, weshalb die genannten Wellen elektrisch nicht anregbar sind (nicht dargestellt) und damit nicht für den technischen Anwendungsfall zur Verfügung stehen.



a)



b)

Abbildung 3 – SAW-Parametersimulation für 128°-YX Lithiumniobat

(Quelle: InnoXacs). a) Teilchenauslenkung und b) Dämpfung bei einer Rayleigh-Mode und einer Leckwellen-Mode mit starker richtungsabhängiger Polarisation. Die grüne Kurve verdeutlicht den Fall der Eisbeladung.

Abbildung 3b zeigt, dass die Rayleighwelle ohne Beladung eine Dämpfung von Null (schwarze Kurve) und mit Eisbeladung (grüne Kurve) von etwa 2,6 dB/ λ aufweist. Die scher-horizontal polarisierte Leckwelle ist um den Winkel von 0° herum verlustfrei.

Es konnte gezeigt werden, dass auf 64°-rotiertem Y-Schnitt Lithiumniobat (64LN), welches einen hohen Kopplungsfaktor K^2 aufweist, sowohl eine SH-polarisierte Welle wie auch eine Rayleighwelle angeregt werden kann (**Abbildung 4**). Dies ermöglicht die Entwicklung eines Sensorelements, welches in der Lage ist, sowohl Flüssigkeiten als auch Eisansatz auf

der gleichen Oberfläche zu detektieren. Die Abbildung 4a zeigt die Phasengeschwindigkeiten (Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten) für eine Rayleigh-artige Welle mit Leckanteil (grau & gelb), die scher-horizontal polarisierte Oberflächenwelle mit Leckanteil (hellblau & grün) und eine generalisierte SAW (dunkelblau & orange) in den Ausbreitungsrichtungen von Null bis 90° bei elektrisch freier und kurzgeschlossener Oberflächenrandbedingung. Aus diesen Geschwindigkeiten kann der in **Abbildung 4b** gezeigte Kopplungsfaktor K^2 berechnet werden. **Abbildung 4c** zeigt die Dämpfung (Verluste) dieser Moden.

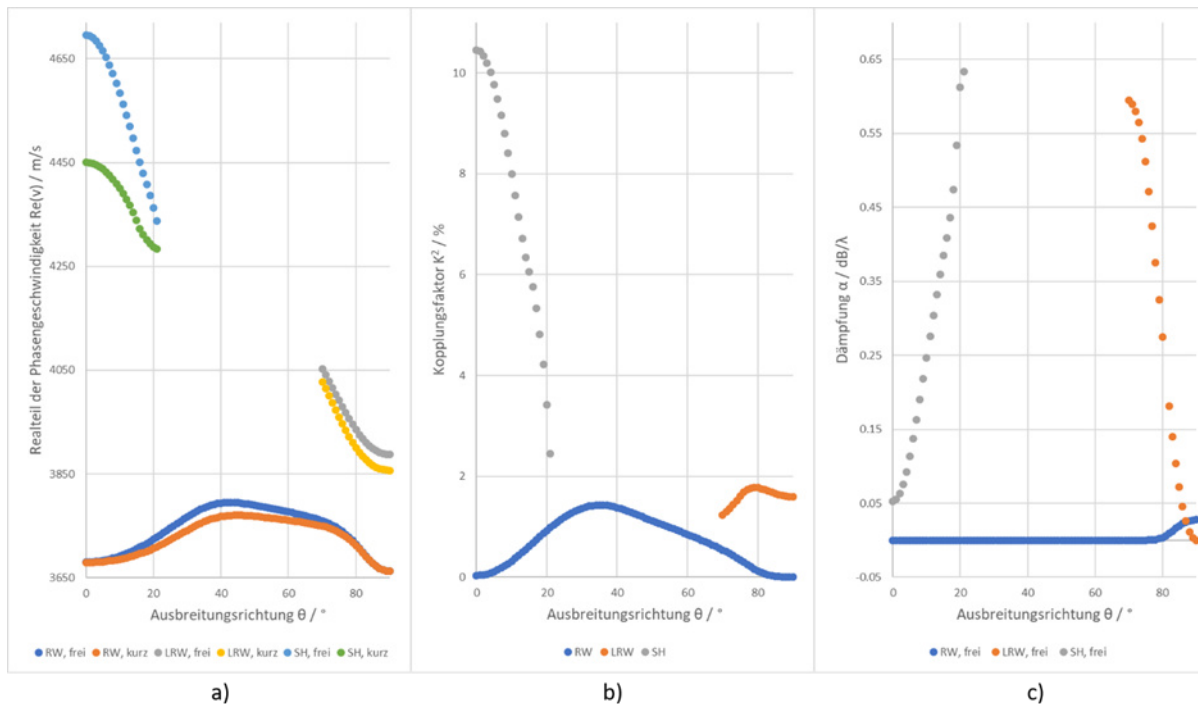


Abbildung 4 – SAW-Parametersimulation für 64°-YX Lithiumniobat

a) Phasengeschwindigkeiten für freie und kurzgeschlossene Substratoberfläche, b) Kopplungsfaktoren und c) Ausbreitungsdämpfung für freie Substratoberfläche der Rayleighwellen (RW, LRW) und SH-SAW. Daten nach [5].

Der Kopplungsfaktor der scher-horizontal polarisierten Oberflächenwelle mit Leckanteil beträgt bei 0° Ausbreitungsrichtung 11 %. Die entsprechende Dämpfung (**Abbildung 4c**) liegt bei etwa 0,05 dB/λ und ist sehr gering. Für abweichende Ausbreitungsrichtungen nimmt die Dämpfung stark zu. Bei der Rayleigh-artigen Welle tritt für $\theta=90^\circ$ ein Sonderfall ein, denn dort geht bei einem ausreichenden Kopplungsfaktor von etwa 1,6 % die Dämpfung gegen Null. Das bedeutet, dass bei diesem Winkel eine praktisch verlustfreie Oberflächenwelle vorliegt. Die generalisierte SAW ist dort elektrisch nicht anregbar. Aus **Abbildung 4** folgt, dass auf einem 64LN-Wafer unter orthogonaler Anordnung der Wandlerstrukturen bzw. der Wellenausbreitungspfade gleichzeitig sowohl eine scher-horizontal polarisierte SAW als auch eine Rayleigh-artige Welle angeregt werden kann.

Im Rahmen weiterer Simulationen wurden piezoelektrische Substrate untersucht auf denen scher-horizontal polarisierte Leckwellen angeregt werden können. Das Aufbringen einer SiO_2 -Wellenleiterschicht kann zu einer Modenkonversion führen, sodass sogenannte Lovewellen angeregt werden können. Bei Lovewellen handelt es sich ebenso um scher-horizontal polarisierte Oberflächenwellen, bei denen jedoch keine parasitären Volumenwellen entstehen. Lovewellen sind daher verlustfrei und weisen eine hohe Energiekonzentration in der Wellenleiterschicht auf. Die untersuchten piezoelektrischen Substrate sind 41°-rotierter und 64°-rotierter Y-Schnitt Lithiumniobat (41LN, 64LN), sowie 36°-rotierter Y-Schnitt Lithiumtantalat (36LT). **Abbildung 5a** zeigt das Dämpfungsverhalten dieser Substrate für SiO_2 -Wellenleiterschichten bis zu einer Dicke h

von 0,3 Wellenlängen (λ) bei elektrisch freier und kurzgeschlossener Oberfläche. 41LN weist bis zu einer Schichtdicke von $0,05 \text{ h}/\lambda$ eine geringe Dämpfung von $0,01 \text{ dB}/\lambda$ im freien und im kurzgeschlossenen Fall auf. Der Bereich der geringsten Dämpfung auf 64LN ergibt sich bei Schichtdicken von etwa $0,05$ bis $0,1 \text{ h}/\lambda$. 36LT weist über den gesamten dargestellten Schichtdickenbereich eine geringe Dämpfung auf. Für 41LN liegt der Kopplungsfaktor über den gesamten Schichtdickenbereich über den Werten für 64LN und 36LT (**Abbildung 5b**). Im unbeladenen Fall weist 41LN die besten akustischen Eigenschaften auf.

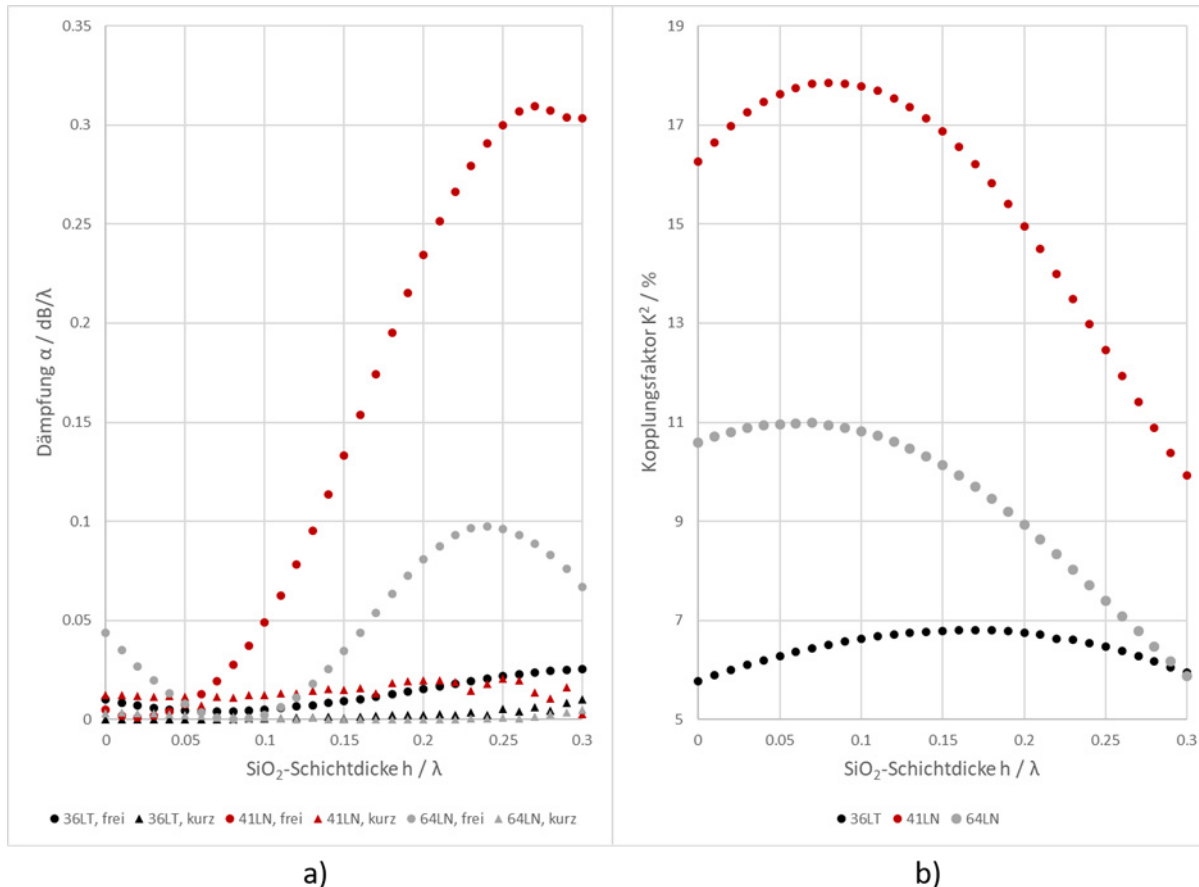


Abbildung 5 – SAW-Parametersimulation für piezoelektrische Substrate mit SiO_2 -Wellenleiterschicht.
a) Dämpfungsverhalten und b) Kopplungsfaktoren

Anschließend wurde das Dämpfungsverhalten von 41LN mit SiO_2 -Wellenleiterschicht bei Beladung von Luft, Wasser und Eis jeweils mit elektrisch freier und kurzgeschlossener Oberfläche untersucht. Bis zu einer Wellenleiterschichtdicke von $0,1 \text{ h}/\lambda$ kann für die Beladung mit Luft von einer geringen Dämpfung ausgegangen werden. Diese liegt unterhalb von $0,04 \text{ dB}/\lambda$. Bei elektrisch kurzgeschlossener Oberfläche liegt diese sogar unterhalb von $0,02 \text{ dB}/\lambda$. Des Weiteren ist in **Abbildung 6** deutlich zu sehen, dass im elektrisch kurzgeschlossenen Fall bei Beladung mit flüssigem Wasser eine moderate und bei Beladung mit Eis eine starke Dämpfung zu erwarten ist. 41LN mit SiO_2 -Wellenleiterschicht eignet sich mit diesen akustischen Eigenschaften zur Detektion von Wasser und Eis. Eine elektrisch kurzgeschlossene Oberfläche kann realisiert werden, indem in der Wandlerbene, die sich zwischen piezoelektrischem Substrat und Wellenleiterschicht befindet eine durchgehende metallische Dünnschicht aufgebracht wird.

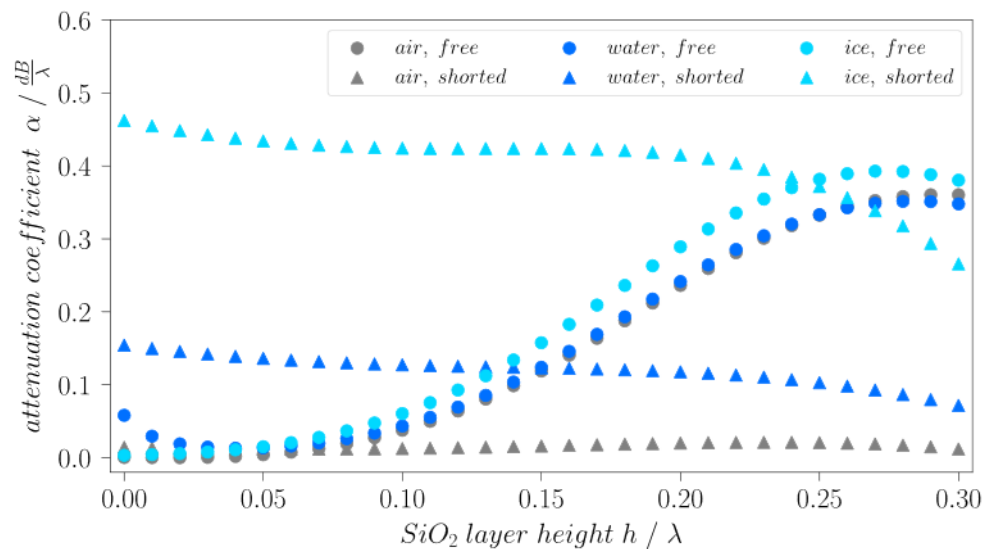


Abbildung 6 – Beladungsabhängigkeit des Dämpfungsverhaltens von 41LN mit SiO_2 -Wellenleiterschicht

Fazit:

- Quarz-Substrat ist aufgrund des sehr geringen Kopplungsfaktors ungeeignet für den Anwendungsfall.
- 128LN eignet sich zur Detektion von flüssigem Wasser und ist aufgrund der sehr starken Dämpfung bei Eisbeladung eher ungeeignet.
- 41LN, 64LN und 36LT eignen sich wegen der hohen Anregbarkeit von scherhorizontal polarisierten SAW gut zur Eisdetektion.
- 41LN weist den höchsten Kopplungsfaktor auf.
- Bei kurzgeschlossener Oberfläche eignet sich 41LN mit einer SiO_2 -Wellenleiterschicht mit einer Schichtdicke von etwa $0,05 h/\lambda$ zur differenzierten Detektion von flüssigem Wasser und Eis.

1.1.2 Konzeption

Für SAW-Bauelemente gibt es generell unterschiedliche Designtopologien je nachdem, ob sie als Filterelement, Sensor oder Aktor verwendet werden. Grundlegende Gestaltungsformen sind in **Abbildung 7** dargestellt. All diese Gestaltungsformen werden für die potentielle Verwendung als SAW-Eissensor in Betracht gezogen.

Die einfachste Form ist die interdigitale Elektrodenstruktur (**Abbildung 7a**), sie entspricht im Wesentlichen einem Interdigitalwandler. Die Beladung mit Wasser oder Eis findet hierbei direkt auf dem Gebiet der Elektrodenstruktur statt. Bei einer Oberflächenbeladung kommt es zu einer mechanischen Dämpfung der akustischen Wellen sowie zu einer Änderung der Permittivität und Leitfähigkeit der Umgebung. Das heißt, sowohl die mechanischen als auch die elektrischen Randbedingungen erfahren eine Änderung.

Bei der Zwei-Tor Verzögerungsleitung (**Abbildung 7b**) breiten sich die akustischen Oberflächenwellen von einem IDT zum anderen aus. Findet die Oberflächenbeladung mit Wasser bzw. Eis im akustischen Ausbreitungspfad zwischen den Interdigitalwandlern statt, werden die akustischen Wellen gedämpft.

Die reflektive Verzögerungsleitung (**Abbildung 7c**) besteht aus einem Interdigitalwandler und einer Reflektorstruktur, an der die vom IDT ausgesendeten Oberflächenwellen reflektiert werden. Werden die reflektierten Wellenanteile sowohl in ihrer Amplitude als auch in deren zeitlichem Verhalten betrachtet, dann verringern sich bei

Oberflächenbeladung die Amplituden der am jeweiligen Reflektorelement reflektierten Wellen durch Dämpfung. Eine Aussage zum entsprechenden Zustand eines Reflektorelements kann, durch die Auswertung der Eingangs- und Ausgangssignale im Zeitbereich erfolgen.

Die reflektive Verzögerungsleitung kann um ein Element zur Impedanzbeladung erweitert werden (**Abbildung 7d**). Das Element zur Impedanzbeladung kann als zusätzlicher externer Sensor [6] ausgeführt werden. Im Falle der Eisdetektion kann dies eine Spaltgeometrie zwischen zwei metallischen und leitfähigen Oberflächen sein, deren komplexe Impedanz sich ändert, wenn dort eine Beladung in Form von Wasser oder Eis stattfindet. Das Element zur Impedanzbeladung ist dabei mit einer Reflektorstruktur oder einer interdigitalen Elektrodenstruktur auf dem SAW-Chip elektrisch verbunden. Die Änderung der Impedanz führt damit zu einer Änderung des Reflexionsfaktors der verbundenen Elektrodenstruktur.

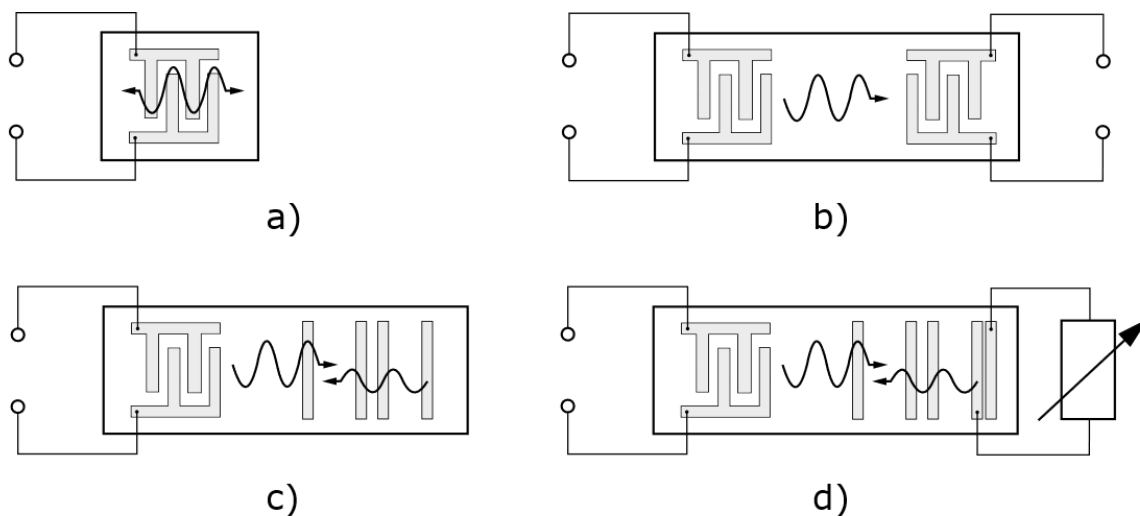


Abbildung 7 - Schematische Darstellung von SAW-Sensortopologien

a) Einfache Interdigitalelektrodenstruktur, b) Zwei-Tor-Verzögerungsleitung, c) Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung, d) Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung.

Tabelle 2 - Bewertung der Sensortopologien zur SAW-Eisdetektion

Gestaltungsform	Vorteile	Nachteile
Interdigital-elektrodenstruktur	- Einfachster und kleinster Aufbau - Zusätzlich Verwendung als Temperatursensor möglich	- Elektrodenstruktur direkt benetzt (Korrosionsrisiko) - Vollständige Bedämpfung durch Beladung kann auch falsch als Defekt interpretiert werden.
Zwei-Tor-Verzögerungsleitung	- Elektrodenstruktur frei von Beladung - Dual-Mode-Anordnung für redundante Messung möglich - Zusätzlich Verwendung als Temperatursensor möglich	- Mindestens zwei Anschlüsse bzw. Antennen (RX, TX) - Anspruchsvolle Gehäusegestaltung (Schutz der Elektrodenstruktur vor Umgebung)
Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung	- Elektrodenstruktur frei von Beladung - Messung von Eisschichtdicken möglich	- Anspruchsvolle Gehäusegestaltung - Benetzung der Reflektorstruktur (Korrosionsrisiko)

	• Zusätzlich Verwendung als Temperatursensor möglich	
Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung	• Räumliche Entkopplung von SAW- und Detektionsort • Einfaches Packaging • Keine direkte Benetzung des SAW-Bauelements • Messung von Eisschichtdicken möglich • Zusätzlich Verwendung als Temperatursensor möglich • Erweiterbar um weitere Messaufgaben	• Zusätzliche Entwicklung von externem Sensorelement • Anspruchsvolle Sensorabfrage und Auswertungsroutine

1.1.3 Herstellung

Die Herstellung der SAW-Bauelemente erfolgt mittels Mikroelektronik-Standardverfahren unter Reinraumbedingungen. Aufgrund der hohen Kopplungsfaktoren werden vorrangig Bauelemente auf Lithiumniobat-Basis hergestellt. Dabei werden 4"-Wafer nach chemischer und mechanischer Reinigung mit einem Umkehr-Fotolack mittels Rotationsbeschichtung beschichtet. Das Wafer-Layout mit den entsprechenden Chip-Layouts der SAW-Bauelemente wird per maskenloser Fotolithografie (MLA 100, Heidelberg Instruments) auf dem Wafer belichtet. Nach der Belichtung erfolgt ein Post-Exposure-Bake und ein Flood-Exposure bevor die Entwicklung folgt. Im Anschluss an die erfolgreiche Entwicklung und einen weiteren Reinigungsschritt in der Ozon-Kammer wird der Wafer metallisiert. Die Metallisierung mit Titan (5 nm) und Aluminium (295 nm) erfolgt per Elektronenstrahlverdampfen. Nach der Metallisierung findet das Lift-Off-Verfahren statt, bei dem der Fotolack mit einem chemischen Ätzmittel gelöst wird. Die verbleibende metallische Struktur entspricht nun dem Wafer-Layout. Abschließend wird der Wafer in einzelne SAW-Bauelemente gesägt.

1.1.4 Untersuchungen zur Eisdetektion

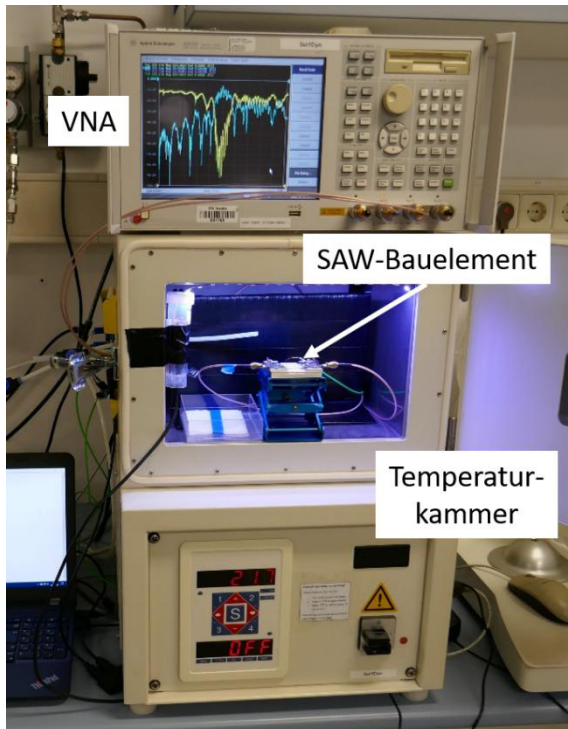


Abbildung 8 – Laborstand zur Temperaturcharakterisierung

Alle hier vorgestellten Untersuchungen wurden mit dem in **Abbildung 8** dargestellten Labormessstand bestehend aus Temperaturkammer (VT4002, Vötsch) und Vektornetzwerkanalysator (VNA, E5070B, Keysight Technologies), durchgeführt. Die Temperaturkammer erlaubt einen Temperaturbereich von - 40 °C bis 130 °C. Die elektrische Charakterisierung der SAW-Bauelemente erfolgte in Form von S-Parametermessungen mithilfe des Vektornetzwerkanalysators was auch Aussagen über deren akustisches Verhalten ermöglicht. Bei einer reinen interdigitalen Elektrodenstruktur oder bei reflektiven Ein-Tor-Verzögerungsleitungen wird der Eingangsreflexionsfaktor S_{11} gemessen. Ein elektrisches Eingangssignal a , welches vom VNA an den Wandler des SAW-Bauelements gesendet wird, wird am Wandler reflektiert und als elektrisches Ausgangssignal b wieder am VNA gemessen. Das komplexwertige Verhältnis aus elektrischem Ausgangssignal zu Eingangssignal entspricht dem komplexen Eingangsreflexionsfaktor

$$S_{11} = b_1/a_1 \quad (1)$$

und ist ein Maß dafür wie viel Energie aus dem Eingangssignal als Ausgangssignal an der Wandlerebene reflektiert wird. Bei der Messung über einen Frequenzbereich, der die Arbeitsfrequenz des SAW-Bauelements umschließt, kann so ermittelt werden, bei welcher Frequenz die Umwandlung von elektrischer zu akustischer Energie am größten ist. Ein Eingangsreflexionsfaktor S_{11} von Null entspricht dabei einer vollständigen Wandlung von elektrischer zu akustischer Energie.

Aus dem Eingangsreflexionsfaktor kann außerdem das Admittanzverhalten des Interdigitalwandlers bestimmt werden:

$$Y_{11} = Y_0(1 - S_{11})/(1 + S_{11}). \quad (2)$$

Die komplexe Admittanz Y_{11} entspricht dabei der IDT-Admittanz, aus der direkt Aussage zum akustischen Verhalten abgeleitet werden können. Y_0 entspricht mit 20 mS dem reziproken Wert des Wellenwiderstands des Messsystems von 50 Ohm.

Bei der Charakterisierung von Zwei-Tor-Verzögerungsleitungen wird zusätzlich der Vorwärtstransmissionsfaktor S_{21} betrachtet. Dieser entspricht dem Verhältnis aus elektrischem Ausgangssignal an Tor bzw. IDT 2 zu Eingangssignal an Tor bzw. IDT 1

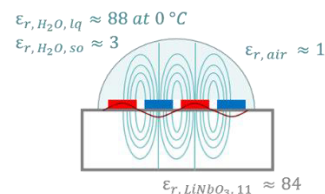
$$S_{21} = b_2/a_1 \quad (3)$$

und beschreibt damit wie viel Energie von einem Wandler zum anderen übertragen wird. Da bei den verwendeten passiven Bauelementen alle Wandler identisch aufgebaut sind, gilt außerdem $S_{11} = S_{22}$ sowie $S_{21} = S_{12}$.

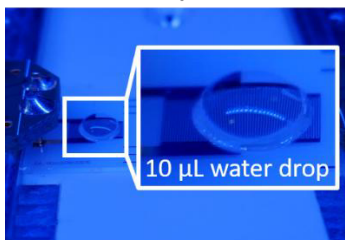
a) Interdigitale Wandlerstruktur

Generell dient eine interdigitale Wandlerstruktur zur Anregung und zum Empfang von akustischen Oberflächenwellen. Für SAW-Sensorelemente zur Eisdetektion sind dabei im Bereich des IDT sowohl die Einflüsse des elektrischen Feldes (**Abbildung 9a**), welches bei Empfang des elektrischen Eingangssignals entsteht, sowie die Einflüsse der akustischen Wellen auf das Messobjekt in gleichem Maße zu berücksichtigen.

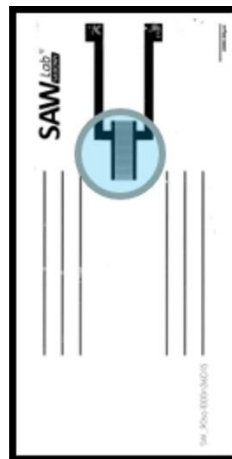
Bei den untersuchten SAW-Bauelementen handelt es sich um die piezoelektrischen Substrate 128LN und 64LN auf denen sich jeweils nur ein einzelner Interdigitalwandler befindet (**Abbildung 9c**). Auf dem IDT wurde anschließend ein Wassertropfen platziert (**Abbildung 9b**) und das gesamte Bauelement in der Temperatorkammer auf -30 °C heruntergekühlt.



a)



b)



c)

Abbildung 9 – Sensorschema Interdigitalwandlerstruktur
a) schematische Darstellung der Feldverteilung der interdigitalen Elektrodenstruktur im Schnitt bei Beladung, b) Versuchsanordnung in Temperatorkammer, c) schematische Darstellung des applizierten Wassertropfens auf dem SAW-Bauelement

Das Admittanzverhalten der Wandlerstruktur wurde mit Hilfe des Vektornetzwerkanalysators im trockenen Zustand sowie bei Wasser- und bei Eisbeladung untersucht. Bei den verwendeten piezoelektrischen Substraten handelt es sich um den 128°-rotierten und 64°-rotierten Y-Schnitt Lithiumniobat (128LN, 64LN). Auf 128LN lassen sich die sagittal polarisierten Rayleighwellen anregen und auf 64LN die scher-horizontal polarisierten Oberflächenwellen. Die **Abbildung 10** und **Abbildung 11** zeigen das charakteristische Admittanzverhalten für Sensoren auf den beiden Substratmaterialien. Die Admittanzkurven lassen sich in einen akustisch aktiven Frequenzbereich und einen rein elektrischen Bereich einteilen. Für das 128LN-Bauelement liegt die Arbeitsfrequenz bei etwa 26

MHz und der akustisch aktive Bereich verläuft von etwa 24 bis 26 MHz. Außerhalb dieses Frequenzbereiches ist nur der mit der Frequenz zunehmende Einfluss der statischen Wandlerkapazität und der jeweiligen Beladung (Luft, Wasser, Eis) messbar. Beim 64LN-Bauelement liegt die Arbeitsfrequenz mit 30 MHz höher und der akustisch aktive Frequenzbereich bei etwa 28 bis 32 MHz. Die Benetzung des Interdigitalwandlers mit einem 10 µL Wassertropfen verringert in beiden Fällen die Admittanzvariation im akustisch aktiven Bereich. Diese Verringerung fällt beim 128LN-Bauelement allerdings höher aus. Außerdem sieht man, dass die Admittanz über den gesamten Frequenzbereich zunimmt. Dies liegt an der höheren Permittivität von flüssigem Wasser ($\epsilon \approx 88$) im Gegensatz zu der von Luft ($\epsilon \approx 1$). Gefriert der Wassertropfen zu Eis, fällt die Permittivität der Beladung von $\epsilon \approx 88$ auf $\epsilon \approx 3$, weshalb auch die Admittanz wieder auf das Niveau im trockenen Zustand abfällt. Die Eisbeladung führt zu einer noch stärkeren Dämpfung der Admittanzvariation im akustisch aktiven Frequenzbereich, der beim 128LN-Bauelement wieder höher ausfällt. Aufgrund des insgesamt höheren Dynamikbereichs bezüglich der Admittanz bei 64LN und

der größeren Unterscheidbarkeit von Wasser- und Eisbeladung eignet sich dieses Substrat gegenüber 128LN folglich besser zur Verwendung als Sensorelement zur Eisdetektion.

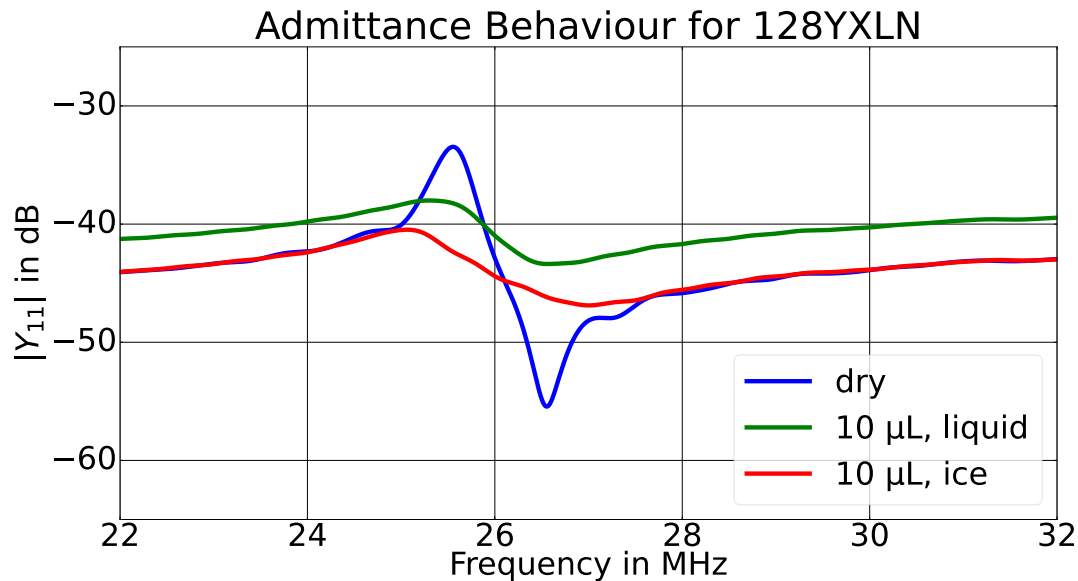


Abbildung 10 - Admittanzverhalten für IDT auf 128°-rotiertem Y-Schnitt Lithiumniobat in trockenem Zustand sowie bei Wasser und Eisbeladung (getort)

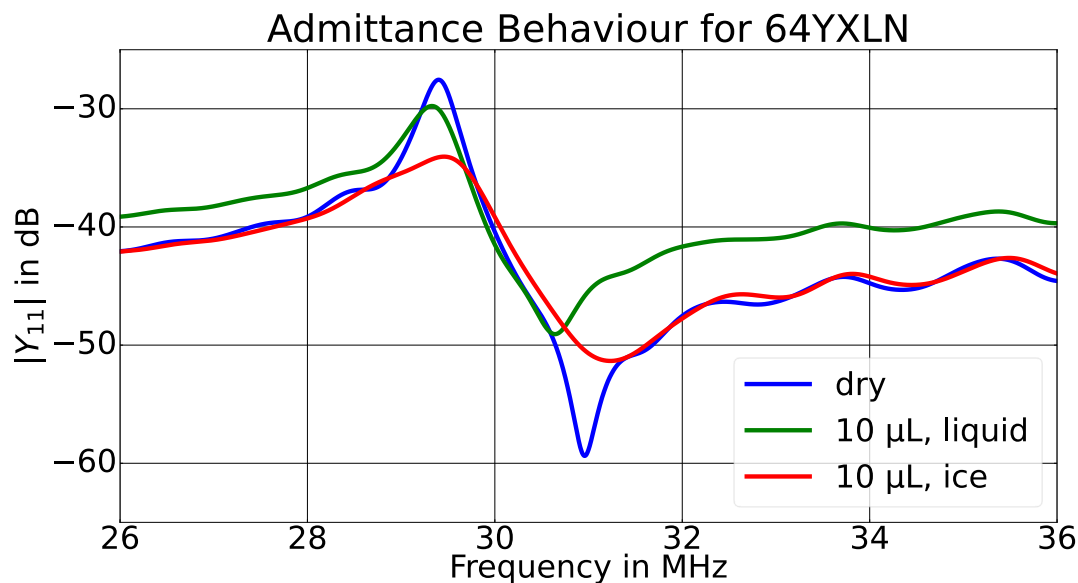


Abbildung 11 - Admittanzverhalten für IDT auf 64°-rotiertem Y-Schnitt Lithiumniobat in trockenem Zustand sowie bei Wasser und Eisbeladung (getort)

b) Zwei-Tor-Verzögerungsleitung

Bei der Zwei-Tor-Verzögerungsleitung wird das Übertragungsverhalten S_{21} bei verschiedenen Beladungszuständen untersucht. Auch in diesem Fall werden Bauelemente bestehend aus den piezoelektrischen Substratmaterialien 64LN und 128LN in der Temperaturkammer platziert und die Interdigitalwandler über Koaxialkabel mit dem VNA verbunden. Wassertropfen werden mittig zwischen den IDTs aufgebracht (**Abbildung 12b**) und der Vorwärtstransmissionsfaktor S_{21} gemessen. Die auf 128LN angeregte Rayleighwelle erfährt bei Flüssigkeitsbeladung eine Dämpfung. Am Übergang von freier zu benetzter Oberfläche strahlt die Oberflächenwelle Longitudinalwellen in die Flüssigkeit ab, weshalb weniger akustische Energie zum gegenüberliegenden Wandler übertragen wird.

Mit zunehmender Viskosität beim Vereisungsprozess des Wassers nimmt die Dämpfung zu. Die scher-horizontal polarisierte Oberflächenwelle auf 64LN koppelt mechanisch nur sehr schwach mit der Flüssigkeit aufgrund der sehr geringen Viskosität und fehlender rückstellender Scherkräfte. Nimmt die Viskosität beim Gefrierprozess zu, treten Scherspannungen auf, die zu rückstellenden Scherkräften führen. Die so entstehende mechanische Kopplung führt zur Dämpfung der akustischen Welle auf 64LN (**Abbildung 12a**).

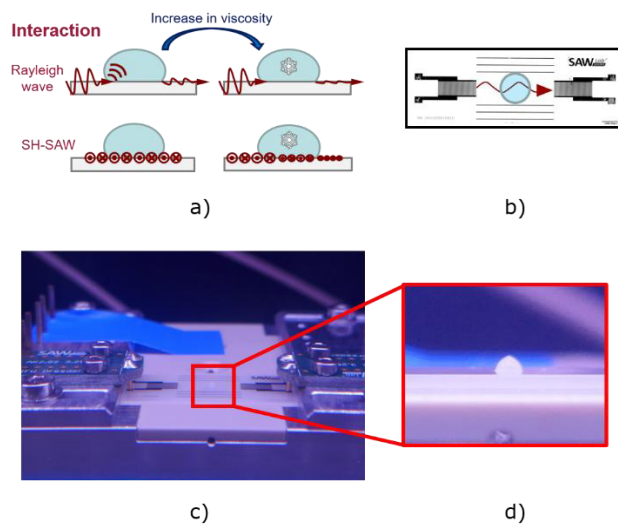


Abbildung 12 – Sensorschema Zwei-Tor-Verzögerungsleitung
a) schematische Darstellung des Detektionsmechanismus bei Wasser- und Eisbeladung, b) Ort der Oberflächenbeladung zwischen den IDT, c) Zwei-Tor-Verzögerungsleitung auf Probenhalter in der Temperaturkammer mit d) Eisbeladung (Detailansicht)

Im Anschluss an die grundlegende Untersuchung des Detektionsmechanismus für Eisbeladung anhand von Zwei-Tor-Verzögerungsleitungen wurden die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 1.1.1 bezüglich der Anregung von scher-horizontal polarisierten SAW auf 64LN und Rayleighwellen bei einem Wellenausbreitungswinkel von 90° zur Kristallachse X, herangezogen. Die gezeigten Ergebnisse erlauben die Entwicklung und Herstellung einer Dual-Mode-Verzögerungsleitung mit vier Toren (**Abbildung 13**). Ziel dieser Entwicklung ist die erweiterte Detektion von Wasser- und Eisbeladung mit zwei akustischen Moden, um die Aussagekraft des SAW-Sensorelements zu erhöhen.

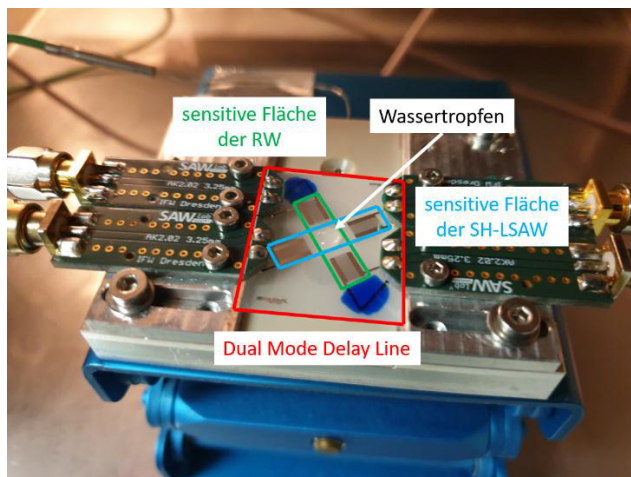


Abbildung 13 – Realisierte Dual-Mode Verzögerungsleitung

Darstellung mit akustischen Ausbreitungspfaden und Wassertropfen auf Benetzungsfläche in Temperaturkammer

Dabei wurde nachgewiesen, dass es möglich ist, auf einem gemeinsamen Substrat zwei unterschiedliche SAW-Moden mit überlappenden akustischen Ausbreitungspfaden für die Detektion von Eisbeladung zu nutzen. Aus **Abbildung 14** geht hervor, dass die beiden akustischen Model der Dual-Mode-Verzögerungsleitung Dämpfung in unterschiedlichem Maße als Reaktion auf die Oberflächenbeladung erfahren. Dies führt zu einer Abnahme der entsprechenden Transmissionskurven.

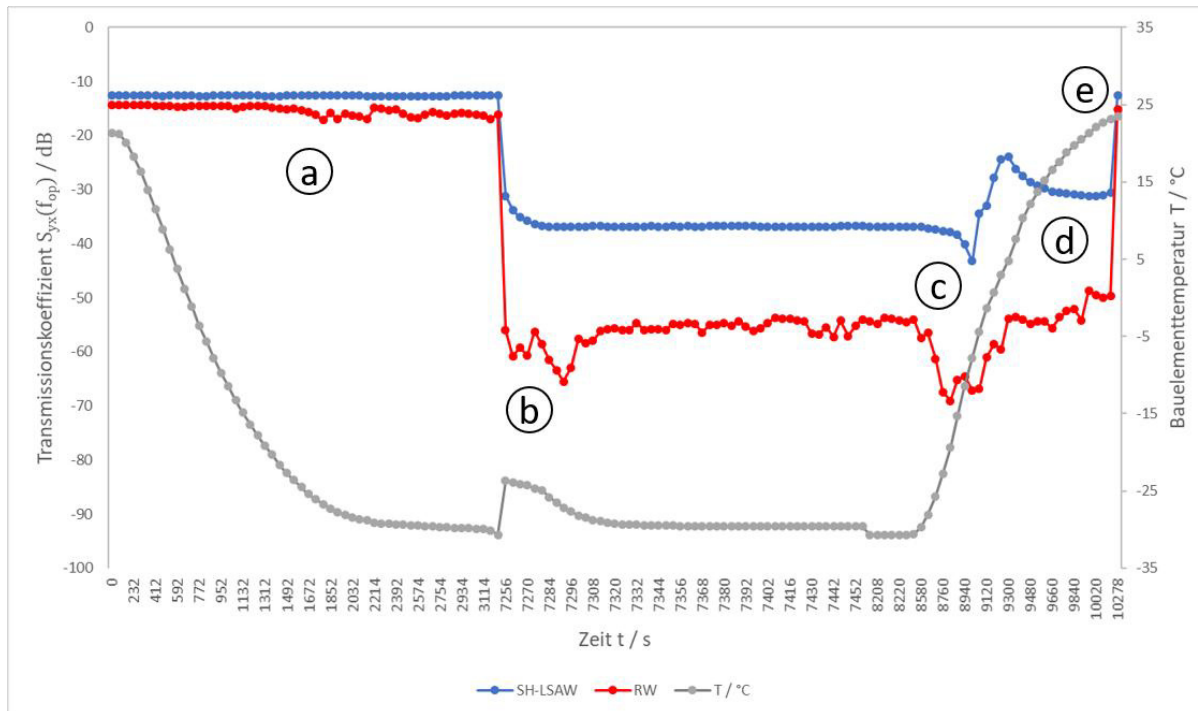


Abbildung 14 – Eisdetektion mittels Dual-Mode-Verzögerungsleitung.

Temperatur der Dual-Mode-Verzögerungsleitung (grau) und getortes Übertragungsverhalten über der Zeit für die akustischen Ausbreitungspfade der scher-horizontal polarisierten SAW (grün) und der Rayleighwelle (gelb). a: Kühlvorgang in trockenem, unbenetztem Zustand, b: Applizierung des Wassertropfens und Gefriervorgang, c: Aufwärmphase mit Taubildung und Schmelze, d: Wassertropfen in flüssigem Zustand, e: trockene, unbenetzte Oberfläche.

c) Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung

Die reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung besteht aus einem piezoelektrischen Substrat mit einem Interdigitalwandler und einer Reflektorstruktur. Die Reflektorstruktur besteht aus mehreren Reflektorelementen, die in definierten Abständen zum IDT angeordnet sind. Wird vom Interdigitalwandler eine akustische Oberflächenwelle ausgesendet, läuft diese entlang der Oberfläche, bis sie an einem Reflektorelement zu einem Teil reflektiert und einem anderen Teil transmittiert wird. Das heißt ein Teil der Welle verläuft in gegengesetzter Richtung zurück zum Sendewandler und ein weiterer Teil der ausgesendeten Welle verläuft weiter zum nächsten Reflektorelement. An diesem Reflektorelement findet wiederum Reflexion und Transmission statt. Die Betrachtung des Reflexionsfaktors am VNA im Frequenzbereich liefert nach einer inversen Fourier-Transformation in den Zeitbereich eine Information zur Laufzeit der ausgesendeten Welle bis zum Eingang der an den jeweiligen Reflektorelementen reflektierten Wellenanteile.

Entsprechend der in **Abbildung 5** und **Abbildung 6** gezeigten Simulationsergebnisse wurde zur experimentellen Untersuchung eine reflektive Verzögerungsleitung aus 41LN mit einer 0,05 h/λ dicken SiO₂-Wellenleiterschicht hergestellt. Auf diesem SAW-Bauelement befinden sich drei Reflektorelemente, welche von einer durchgehend metallisierten Oberfläche umgeben sind. Die Metallisierung besteht aus Aluminium.

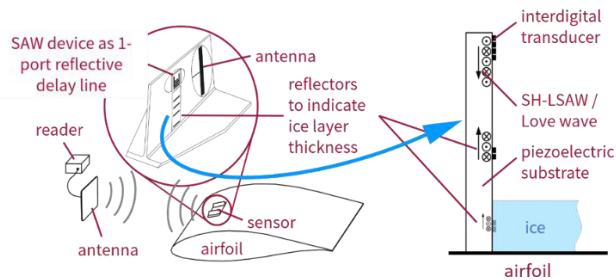


Abbildung 15 – Arbeitsschema des SAW-Sensors zur Eisschichtdickenmessung

In **Abbildung 15** ist das Arbeitsschema des im Projekt entwickelten SAW-Sensors zur Eisschichtdickenmessung auf Basis einer reflektiven Ein-Tor-Verzögerungsleitung dargestellt. Das Bauelement ist dabei senkrecht zur Rotorblattoberfläche ausgerichtet und das Eis wächst mit zunehmender Schichtdicke von der unteren Substratkante in Richtung des am

oberen Ende des Bauelements befindlichen IDTs. Je dicker die Eisschicht, umso mehr Reflektorelemente werden von diesem bedeckt. Die hat zur Folge, dass sowohl die reflektierten als auch die am Reflektorelement transmittierten Wellenanteile gedämpft werden. Da die diskreten Abstände zwischen IDT und Reflektorelement vordefiniert sind. Mittels der Phasengeschwindigkeit der SAW können die entsprechenden Laufzeiten bestimmt werden. Dabei werden die im Zeitbereich auftretenden Maximalwerte des Reflexionsfaktors den einzelnen Reflektorelementen zugeordnet und hieraus die Eisdicke bestimmt.

Der Funktionsnachweis für die Eisdickensensorik erfolgte mittels reflektiver Ein-Tor-Verzögerungsleitung VNA-gebunden in der Temperatorkammer. Das SAW-Bauelement ist auf einem Probenhalter fixiert, der in der Höhe so verstellt werden kann, dass die Eintauchtiefe in einen Behälter mit Wasser variiert werden kann (**Abbildung 16**). Die Messung des Reflexionsfaktors S_{11} wird einmal im trockenen, nicht benetzten Zustand des Bauelements durchgeführt. Anschließend wird das Bauelement bis zur Substratkante in das flüssige Wasser eingetaucht und eine Messung durchgeführt. Im Anschluss wird die Kammer auf minus 30 Grad Celsius heruntergekühlt, bis das Eis gefroren ist. Der Reflexionsfaktor wird erneut gemessen. Dieser Ablauf wird nach einer Aufheizphase zum Wiederauftauen des Eises für weitere Eintauchtiefen wiederholt.

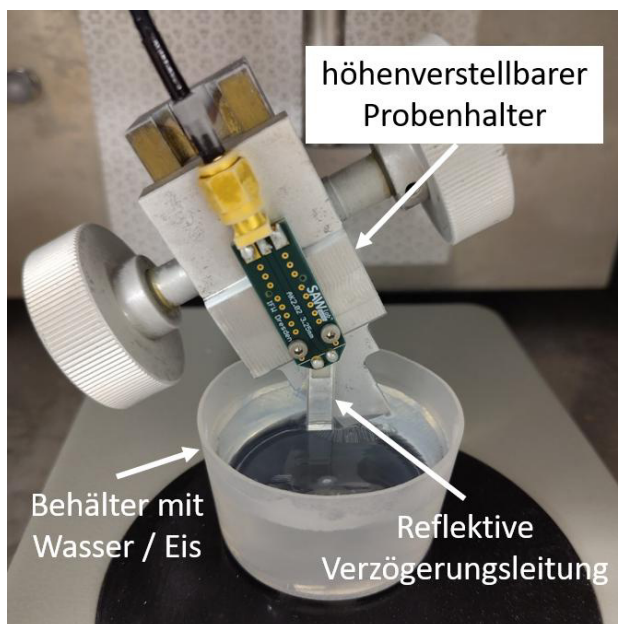


Abbildung 16 - SAW-Sensor zur Eisschichtdickenmessung

Experimenteller Aufbau für Temperatorkammer

SAW statt. Dies drückt sich darin aus, dass im Zeitbereich von über 6 μ s die

In **Abbildung 17** sind die Reflexionsfaktoren S_{11} für die jeweiligen Eintauchtiefen in trockenem Zustand (grau), in flüssigem Wasser (blau) und in Eis (cyan) dargestellt. Abbildung 19a zeigt die Reflexionsfaktoren für das SAW-Bauelement bei einer Eintauchtiefe bis kurz über der Substratkante. Die Wasseroberfläche befindet sich noch unterhalb des unteren Reflektorelements, welches einen Abstand von 1,66 mm bis zur Substratkante hat. Das heißt, die Eintauchtiefe liegt über Null und unter 1,66 mm. Die akustische Oberflächenwelle benötigt 6,56 μ s vom IDT bis zur Substratkante und wieder zurück. Da die sägeraue Substratkante im Gegensatz zu einem Reflektorelement eine undefinierte Kante darstellt, findet dort Streuung der

Reflexionsfaktoren kein eindeutiges Maximum aufweisen. Aufgrund der durch das Design vorgegebenen Geometrie des Bauelements kann das Maximum jedoch der Reflexion an der Substratkante zugeordnet werden.

Entsprechend der Simulationsergebnisse (**Abbildung 6**) wird die akustische Oberflächenwelle bei Benetzung mit flüssigem Wasser kaum gedämpft. Erst, wenn das Wasser gefriert, wird die SAW stark gedämpft. Wird das SAW-Bauelement nun weiter in den Behälter eingetaucht, sodass das untere Reflektorelement benetzt ist, kann die Eintauchtiefe bzw. die Eisschichtdicke im Abstand zur Substratkante innerhalb eines Bereiches von über 1,66 mm und unter 5,26 mm eingegrenzt werden.

Wird z.B. das obere Reflektorelement bedämpft beträgt die Eisschichtdicke von der Substratkante aus mindestens 10,66 mm. In **Abbildung 17** ist der Signalverlauf bei der Eisschichtdickenmessung dargestellt und **Abbildung 18** veranschaulicht die durch den jeweiligen Reflektorstreifen hervorgerufene Dämpfung bei zunehmender Eintauchtiefe. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dämpfung bei Eisbeladung stark zunimmt.

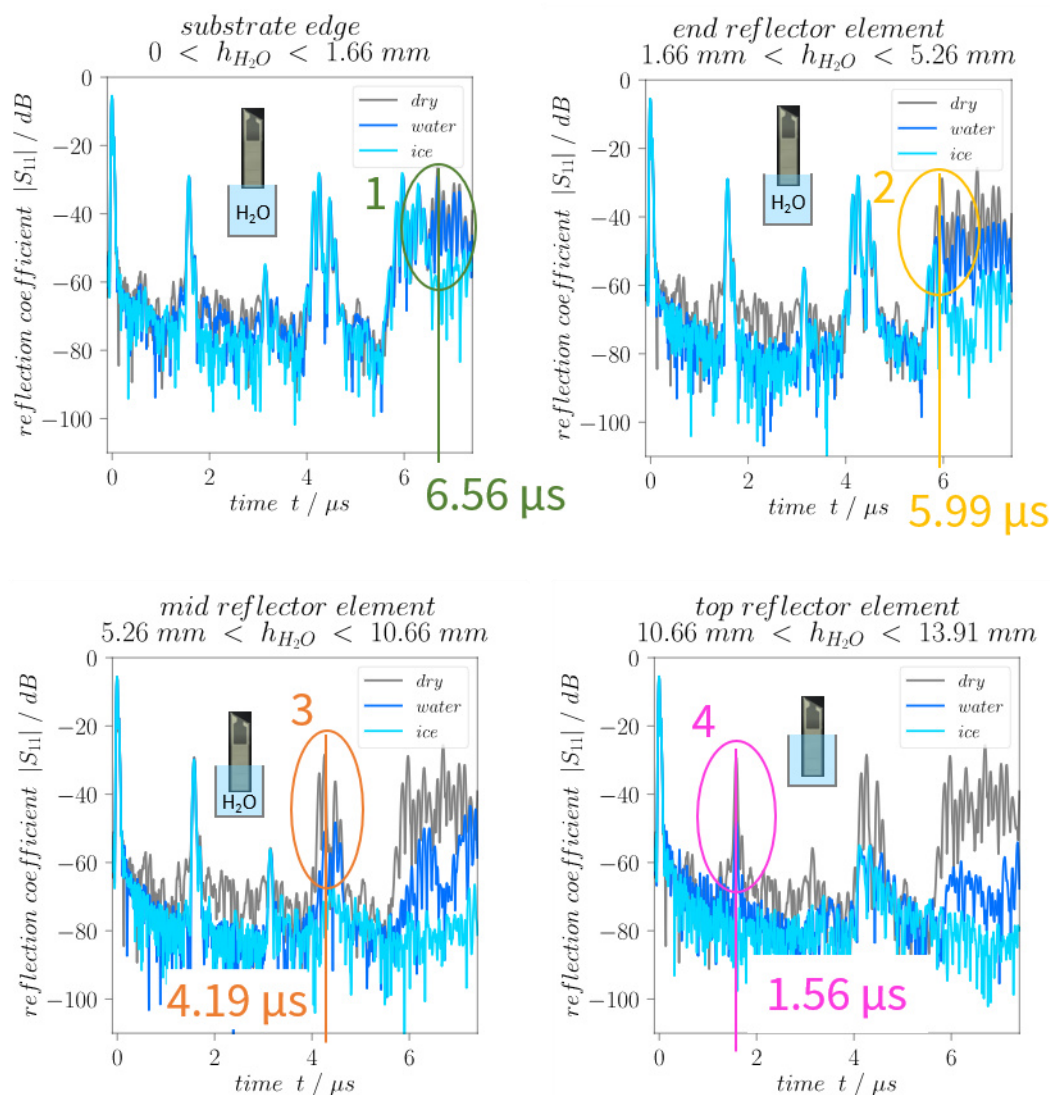


Abbildung 17 – Charakteristischer Signalverlauf bei Eisschichtdickenmessung.

Reflexionskoeffizienten im Zeitbereich bei verschiedenen Eintauchtiefen des SAW-Bauelements. Benetzung a) der Substratkante, b) des unteren, c) des mittleren und d) des oberen Reflektorelements.

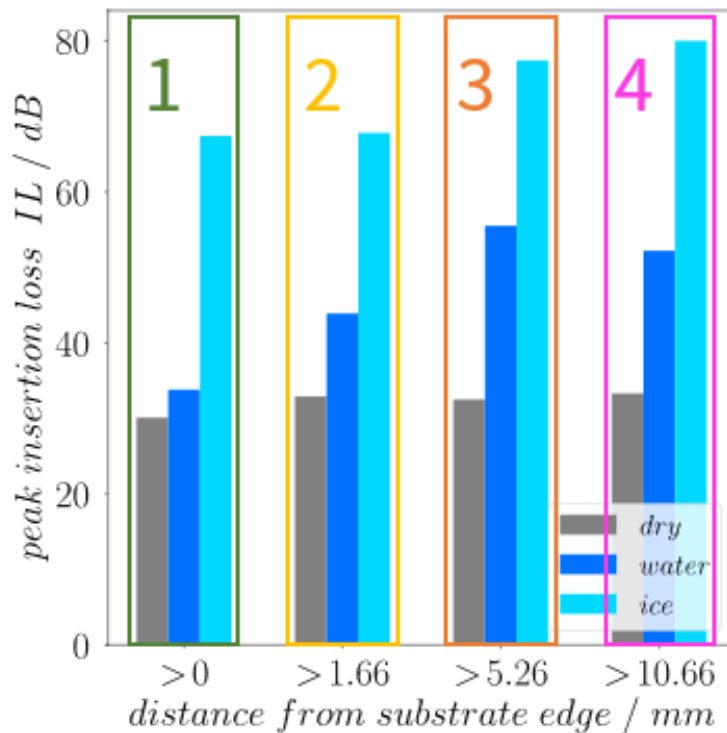


Abbildung 18 – Reaktion des Sensors auf unterschiedliche Beladungen.

Einfügedämpfung bei Benetzung der jeweiligen SAW-Bauelementgeometrie. 1: Substratkante, 2: unteres, 3: mittleres, 4: oberes Reflektorelement.

d) Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung

Die reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung kann bezüglich der Gestaltungstopologie sowohl als Zwei-Tor-Verzögerungsleitung als auch wie in Abschnitt 1.1.4.3 beschriebene reflektiven Ein-Tor-Verzögerungsleitung ausgeführt werden. In jedem Fall wird diese Gestaltungstopologie als Ein-Tor ausgeführt. Die hier berücksichtigte Impedanzbeladung erfolgt über den Anschluss eines externen elektrischen Sensorelements mit komplexer elektrischer Impedanz entweder über das zweite Tor (IDT) einer Zwei-Tor-Verzögerungsleitung oder über ein bzw. mehrere Reflektorelemente einer reflektiven Verzögerungsleitung. Der externe elektrische Schaltkreis kann in Form eines zusätzlichen Sensors oder in einfachster Form als elektrische Leitung ausgeführt sein. Das Sensorprinzip basiert auf der Änderung der Impedanz an einer Störstelle (IDT, Reflektorelement) im akustischen Ausbreitungspfad der SAW, welche zu einer Änderung des zugehörigen Reflexionsfaktors S_{11} führt. Wird ein Reflektorelement oder eine interdigitale Wandlerelektrode bspw. über eine elektrische Leitung, die sich in Wasser oder Eis befindet, impedanzbelastet, wird diese Änderung von Leitfähigkeit und Permittivität über die elektrische Leitung in einer Änderung des Reflexionsfaktors S_{11} transformiert.

Zum experimentellen Nachweis wird eine Zwei-Tor-Verzögerungsleitung zu einer reflektiven Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung modifiziert. Dies erfolgt über den Anschluss einer metallischen Struktur an den dem Sendewandler gegenüberliegenden Interdigitalwandler.

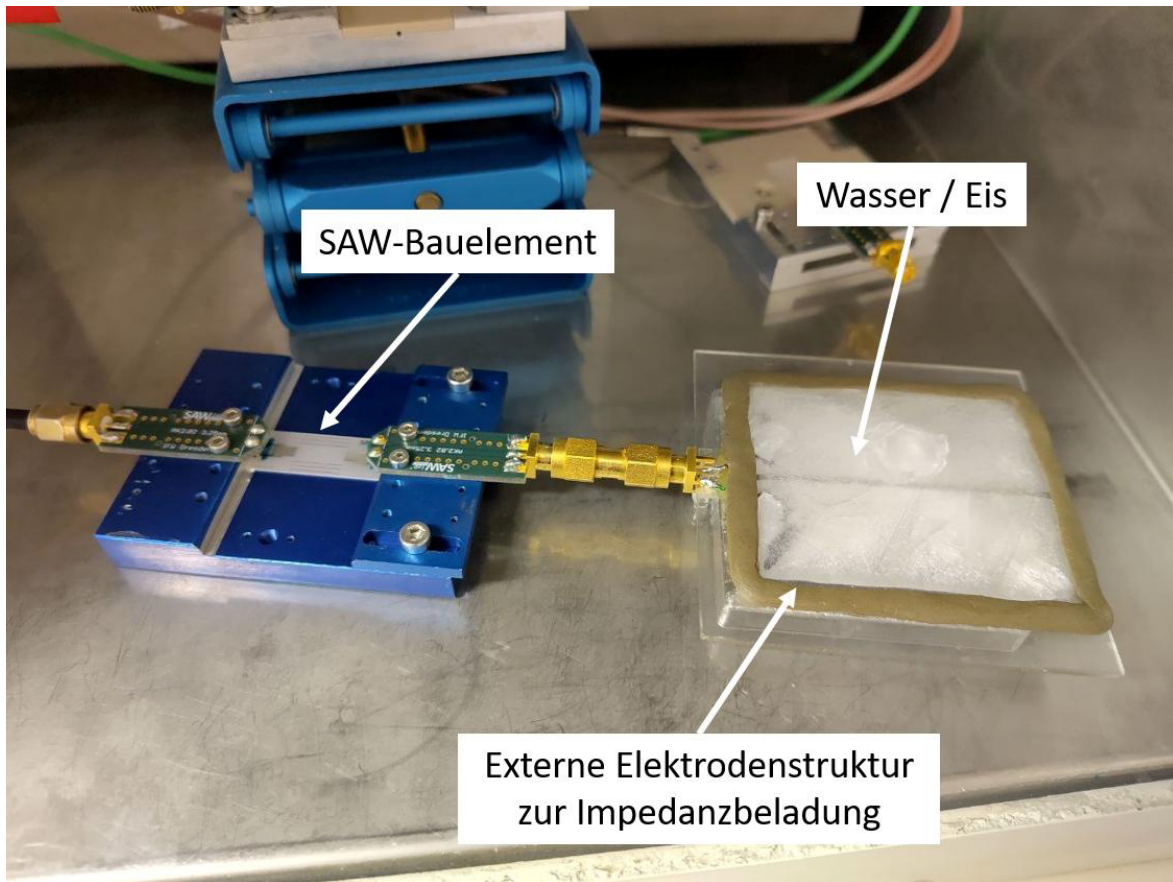


Abbildung 19 – Eisdetektion mittels impedanzbeladener reflektiver Verzögerungsleitung: Aufbau

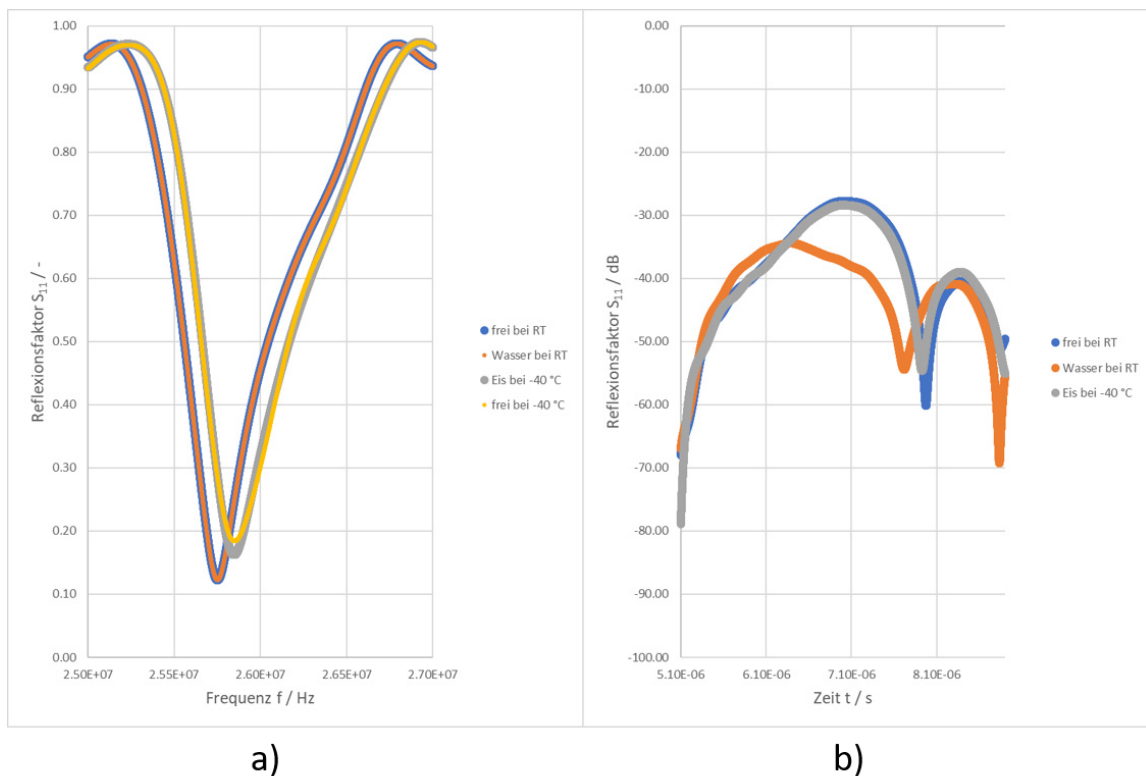


Abbildung 20 – Eisdetektion mittels impedanzbeladener reflektiver Verzögerungsleitung: Signalverläufe Reflexionsverhalten bei freier Elektrodenstruktur und Impedanzbeladung a) im Frequenzbereich und b) im Zeitbereich. Im Zeitbereich ist nur das Triple-Transit-Echo des Wandlers mit externer Elektrodenstruktur dargestellt.

Bei der metallischen Messstruktur handelt es sich um eine planare Doppelelektrode. Auf diese Doppelelektrode wird Wasser aufgebracht und der gesamte Aufbau in der Temperaturkammer auf $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt (**Abbildung 19**). Mittels VNA wird das Reflexionsverhalten des Sendewandlers im Frequenzbereich gemessen und über die Fourier-Transformation in den Zeitbereich überführt. Im Frequenzbereich können nun die Änderungen bestimmt werden, die direkt den frequenzselektiven Sendewandler beeinflussen. In diesem Fall sind das ausschließlich Temperatureinflüsse (**Abbildung 20a**). Durch die Transformation in den Zeitbereich wird darüber hinaus das Reflexionsverhalten an der dem Sendewandler gegenüberliegenden Wandlerstruktur bei einer Impedanzbeladung sichtbar (**Abbildung 20b**). Die Beladung der externen Elektrodenstruktur mit flüssigem Wasser ($\epsilon \approx 88$) führt zu einer deutlichen Dämpfung des sogenannten Triple Transit Echos. Gefriert das Wasser zu Eis, senkt dies die Permittivität der Beladung auf einen Wert von $\epsilon \approx 3$ ab und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie bei Luft ($\epsilon \approx 1$). Dadurch ist es möglich, eine Flüssigkeitsbeladung auf der externen Elektrodenstruktur sicher zu detektieren. In dieser Ausführungsform erfordert die Detektion von Eisansatz auf der Oberfläche der externen Elektrodenstruktur noch weitere Entwicklungsarbeiten.

1.1.5 Ergebnisse & Bewertung

Im Rahmen des Projekts wurden vier verschiedene Gestaltungstopologien für einen SAW-Sensor zur Eisdetektion und Eisschichtdickenmessung beschrieben, hergestellt und untersucht. Bei diesen handelt es sich um:

- die interdigitale Wandlerstruktur,
- die Zwei-Tor-Verzögerungsleitung in Form einer Dual-Mode-Anwendung,
- die reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung und
- die reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung.

Im Ergebnis konnte die in **Tabelle 3** dargestellte Bewertungsmatrix die Vor- und Nachteile bzw. Herausforderungen bzgl. der einzelnen Sensortopologien erarbeitet werden.

Tabelle 3 - Bewertung der Gestaltungsformen anhand der Untersuchungsergebnisse

Gestaltungsform	Vorteile	Nachteile/Herausforderungen
Interdigitale Wandlerstruktur	• sehr klein • geringe Komplexität der Strukturierung • Eisdetektion möglich • Vergleichsweise einfaches Packaging • Gute Funkabfragbarkeit	• Keine Unterscheidung zwischen hoher Dämpfung durch Eisbeladung und Defekt möglich • Nutzung als Temperatursensor nur bei freier Substratoberfläche
Dual-Mode-Verzögerungsleitung	• Redundante Detektion von Wasser- und Eisbeladung • Nutzung als Temperatursensor möglich	• Reduktion der Anzahl an Ports/IDTs notwendig für einfache Funkabfrage • Komplexes Packaging, da IDT vor Beladung geschützt sein muss.
Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung	• Eisschichtdickenmessung möglich • Temperaturmessung möglich	• Komplexes Packaging, da IDT vor Beladung geschützt sein muss

	• Gute Funkabfragbarkeit (Vgl. ID tags)	
Reflektive Ein-Tor-Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung	• Einfachstes Packaging, SAW-Bauelement kann vollständig gehaust sein • Gute Funkabfragbarkeit (Vgl. ID tags) • Nutzung als Temperatursensor möglich • Detektion von Flüssigkeitsbeladung möglich	• Eisdetektion erfordert noch weitere Entwicklung

1.2 Materialbeständigkeit

Die Untersuchungen zur Materialbeständigkeit von SAW-Bauelementen sind auf zwei Ebenen durchgeführt worden. Dabei wurden zum einen unterschiedliche Passivierungstechnologien im Labormaßstab untersucht, um grundsätzliche Aussagen zu Versagensmechanismen zu gewinnen. Darüber hinaus wurden auch Feldversuche an einer Windenergieanlage durchgeführt, um die Auswirkungen über die Laboruntersuchungen hinausgehenden realen Umwelteinflüssen zu untersuchen und einsatzrelevante Materialkonzepte zu entwickeln.

1.2.1 Laboruntersuchungen zum Korrosionsverhalten

Um das Korrosionsverhalten von mit unterschiedlichen Barriersystemen passivierten SAW-Bauelementen zu bewerten, wurden Laborversuche durchgeführt. Bei diesem wurden mehr als 20 Bauelemente untersucht und einer zehnpromzentigen Kaliumhydroxid- oder Salzsäurelösung ausgesetzt.

Die Bauelemente bestehen aus 500 µm dicken 64°YX-Lithiumniobat-Einkristallen mit SAW-Strukturen aus einer 300 nm dicken Aluminium-Titan-Metallisierung. Diese Metallisierung ist als Doppelschicht ausgeführt und besteht aus 5 nm Titan sowie 295 nm Aluminium. Die kleinste Strukturbreite bildet die Elektrodenfingerbreite des Interdigitalwandlers mit 38 µm. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden sowohl Bauelemente ohne Passivierungsschicht als auch solche mit chemisch weitgehend inerten SiO₂-Schichten mit Dicken von 20, 45, 70, 80, 95, 100 und 500 nm hergestellt. Zusätzlich wird untersucht, wie sich verschiedene SiO₂-Abscheideverfahren auf die Korrosionsbeständigkeit der Bauelemente auswirken.

Für die Passivierung kommen zwei Verfahren zum Einsatz: die Atomlagenabscheidung (ALD, englisch: Atomic Layer Deposition) und das Magnetronspütern. Die ALD ist ein chemisches Verfahren, das zyklisch abläuft. Dabei wird das Substrat unter Vakuum einem Präkursor ausgesetzt, wodurch an der Oberfläche eine Monolage des Präkursors absorbiert wird. Anschließend erfolgt die Zugabe eines Oxidationsmittels, das selbstkatalytisch mit der Monolage reagiert, bis alle Funktionsgruppen besetzt sind. Zwischen den einzelnen Zyklen wird die Vakuumkammer mit Stickstoff gespült, um die gleichmäßige Verteilung der Chemikalien zu gewährleisten. Zur Abscheidung von Siliziumdioxid (SiO₂) wird eine Kombination aus APTES, H₂O und Ozon (O₃) verwendet. Das ALD-Verfahren zeichnet sich durch eine präzise, gleichmäßige und lückenlose Abdeckung dreidimensionaler Strukturen wie Interdigitalwandler aus und ermöglicht damit deren weitgehende chemische Beständigkeit. Es ist jedoch zeitaufwändig, da die Schichtwachstumsrate nur 0,03 bis 0,04 nm pro Zyklus beträgt und ein Zyklus etwa zwei Minuten dauert.

Das eingesetzte RF-Magnetronputtern ist hingegen ein physikalischer Prozess, bei dem Argon und Sauerstoff in eine Vakuumkammer geleitet werden. Ein hochfrequentes elektrisches Feld erzeugt ein Argonplasma, dessen Ionen das Siliziumdioxidtarget beschießen. Dabei werden SiO_2 -Teilchen herausgeschlagen, die sich mit Sauerstoffionen und freien Elektronen zu Siliziumdioxid (SiO_2) auf dem Substrat verbinden. Dieses Verfahren ermöglicht eine wesentlich höhere Schichtwachstumsrate von 37,5 nm/min und damit auch die zum mechanischen Schutz erforderlichen größeren Schichtdicken. Jedoch ist diese anfällig für ungleichmäßige Abdeckungen bei komplexen Oberflächenstrukturen, insbesondere an Strukturkanten.

Zur Herstellung der SiO_2 -Schichten werden ALD und Magnetronputtern kombiniert. Mit ALD werden Schichtdicken von 20, 45 und 80 nm erzeugt, da dieses Verfahren eine lückenlose Abdeckung der Elektrodenkanten gewährleistet. Wegen der langen Prozesszeiten ist die maximale Schichtdicke real auf 80 nm begrenzt, was hier einer Prozessdauer von etwa vier Tagen entspricht. Magnetronputtern wird für größere Schichtdicken von 100 und 500 nm eingesetzt, da hier keine lückenlose Abdeckung garantiert ist. Zusätzlich werden einige Bauelemente mit einer Kombination beider Verfahren beschichtet, wobei eine ALD-Schicht von 80 nm durch eine 50 nm dicke Schicht per Magnetronputtern ergänzt wird. Ziel ist es, eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit durch die Kombination von lückenloser Kantenabdeckung und großer Gesamtschichtdicke zur Gewährleistung des mechanischen Abrasionsschutzes zu erreichen.

Alle Bauelemente werden sowohl vor als auch nach der Exposition in der Lösung mit einem Digitalmikroskop auf Korrosionserscheinungen untersucht. Dabei wird darauf geachtet, dass die nicht passivierten Kontaktflächen der Wandlerstrukturen nicht mit der Säurelösung in Kontakt kommen. Die Expositionsintervalle sind für alle Bauelemente identisch, sodass die Ergebnisse direkt vergleichbar sind. Nach jeder Exposition werden die Bauelemente mit destilliertem Wasser gereinigt, um Korrosionsprozesse für die anschließende Untersuchung zu stoppen.

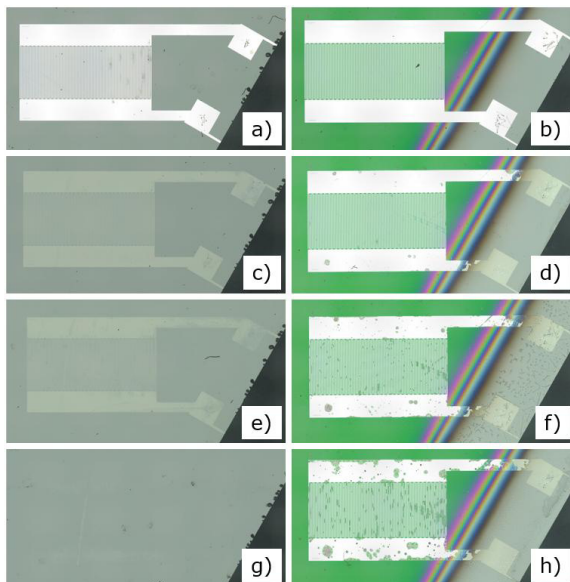


Abbildung 21 – Laboruntersuchung zur Korrosionsbeständigkeit gegenüber KOH. Korrosionsverlauf von in Kaliumhydroxid (10 % wässrige Lösung) exponierten SAW-Bauelementen aus 64°YX-Lithiumniobat mit 300 nm dicker Aluminium-Titan-Metallisierung. a), c), e) und g) ohne SiO_2 -Schicht b), d), f) und h) 500 nm SiO_2 -Schicht mittels Magnetronputter-Verfahren. Expositionszeiten: a) und b) 0 s, c) und d) 1060 s, e) und f) 2860 s, g) und h) 6460 s.

Die Untersuchungen zur Exposition in zehnprozentiger Kaliumhydroxidlösung (alkalisch) ergab, dass die Metallisierung auf Bauelementen ohne SiO_2 -Passivierungsschicht gleichmäßig heruntergeätzt wird. Bauelemente, die mit einer 500 nm dicken SiO_2 -Passivierungsschicht versehen sind, zeigen nach einer Expositionszeit von über 10 Minuten erste Anzeichen von Lochkorrosion. Die Lochkorrosion verstärkt sich mit Zunahme der Expositionszeit. Insgesamt fallen die Korrosionserscheinungen bei Exposition in zehnprozentiger Kaliumhydroxidlösung schwächer aus als in zehnprozentiger Salzsäurelösung. Aus diesem Grund wurde im Verlauf der Untersuchungen der Fokus auf die Exposition in Salzsäure gelegt.

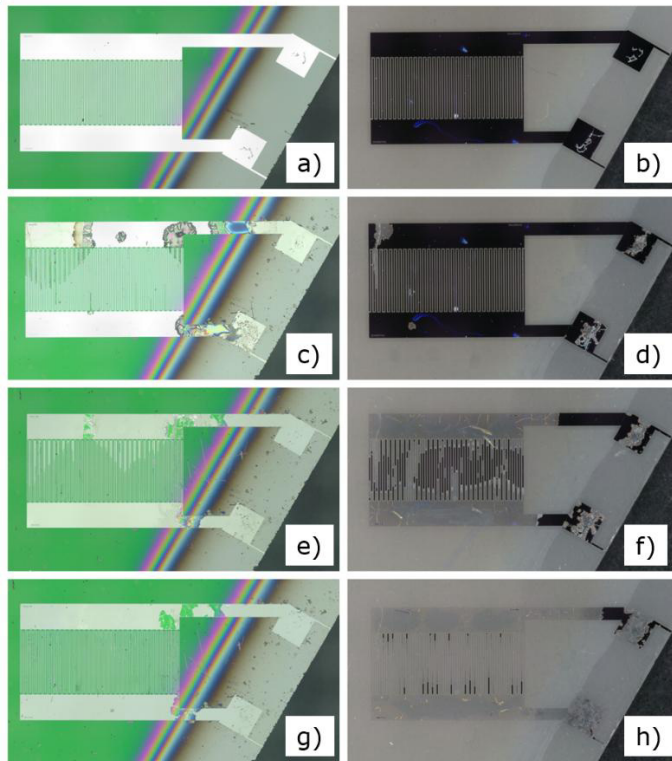


Abbildung 22 – Mikroskopische Aufnahmen nach Laborversuch zur Materialbeständigkeit mit HCl. Korrosionsverlauf von in Salzsäure (10 % wässrige Lösung) exponierten SAW-Bauelementen aus 64°YX-Lithiumniobat mit 300 nm dicker Aluminium-Titan-Metallisierung und SiO₂-Passivierungsschicht. a), c), e) und g) 500 nm SiO₂-Schicht mittels Magnetronsputter-Verfahren. b), d), f) und h) SiO₂-Doppelschicht bestehend aus 80 nm mittels ALD- und 50 nm mittels Magnetronsputter-Verfahren. Expositionszeiten: a) und b) 0 s, c) und d) 1060 s, e) und f) 2860 s, g) und h) 6460 s.

Die Ergebnisse der Exposition in zehnprozentiger Salzsäurelösung zeigen, dass bei Bauelementen ohne Passivierungsschicht bereits nach 40 Sekunden punktuelle Korrosionserscheinungen in Form von Lochfraß an der Aluminium-Wandlerstruktur auftreten, die sich mit längerer Expositionsdauer flächig ausbreiten. Nach etwa 15 Minuten ist die Aluminiumschicht im gesamten Wandlerbereich abgetragen, während die darunterliegende Titanschicht weitgehend erhalten bleibt. Dies deutet auf galvanische Korrosion hin, bei der Aluminium als Anode wirkt. Bauelemente mit Passivierungsschicht zeigen punktuelle Spannungsrisskorrosion, die auf Spannungszustände innerhalb der Metallisierung und Risse in der SiO₂-Schicht zurückzuführen ist. Die Homogenität und Spannungsfreiheit der Passivierungsschicht spielen eine entscheidende Rolle für die Korrosionsbeständigkeit. Übergangsbereiche zwischen der Passivierungsschicht und dem nackten Substrat sowie Kratzer und Verschmutzungen erweisen

sich als kritische Faktoren.

Die höchste Beständigkeit gegenüber Korrosion wird bei Bauelementen mit einer Kombination aus 80 nm ALD und 50 nm Magnetronsputter erreicht. Dies unterstreicht die Bedeutung der Wahl des Passivierungsverfahrens und einer sauberen Umgebung während des Prozesses, die wichtiger sind als die Schichtdicke allein.

1.2.2 Feldversuch

Der Feldversuch am Rotorblatt einer realen WEA in der sächsischen Lausitz hatte das Ziel, den Einfluss der vorherrschenden Real-Bedingungen, insbesondere an der Anströmkante im Bereich der Blattspitze, genauer zu untersuchen. Dabei wurde der Fokus auf die Auswirkungen von Verschmutzung, Erosion und Korrosion der SAW-Bauelemente gelegt. Zudem sollte die Machbarkeit der Installation von SAW-Bauelementen analysiert werden, um zukünftige Studien hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit zu optimieren. Der Versuch erstreckte sich über einen Zeitraum von sieben Monaten. Die Installation der sieben Probenträger erfolgte im Juni, während die Deinstallation des letzten Probenträgers im Januar durchgeführt wurde, gefolgt von anschließender Analyse im Labor.

Der gewählte Zeitraum erlaubte die Exposition der SAW-Bauelemente gegenüber einer Vielzahl von umweltbedingten Störgrößen. Im Frühsommer waren die Wetterbedingungen

optimal für die Installation der Probenträger. Während der Sommermonate führte die landwirtschaftliche Aktivität zu einer erhöhten Aufwirbelung von Sandpartikeln. Im Spätsommer war die Luft von einer größeren Anzahl an Insekten geprägt. Der Herbst brachte wind- und regenreiche Tage, die stärkere Abrasion sowie größere Temperaturschwankungen verursachten. In den frühen Wintermonaten traten Frost und leichter Schneefall auf, wodurch die Einflüsse von Kälte und Feuchtigkeit untersucht werden konnten. Die monatliche Deinstallation und Untersuchung der Probenträger erfolgte mit Ausnahme des Dezembers, sodass im Januar die beiden verbleibenden Probenträger gemeinsam entfernt wurden.

Die Analyse umfasste sowohl Sichtprüfungen der allgemeinen Zustände der Probenträger als auch detaillierte Laboruntersuchungen der einzelnen Komponenten. Für diese wurden die deinstallierten Probenträger in ihre Bestandteile zerlegt, und die SAW-Bauelemente mithilfe eines Digitalmikroskops untersucht.

Zur Befestigung der SAW-Bauelemente in den 3D-gedruckten Probenträger wurden diese mit doppelseitigem Klebeband auf Leiterplatten fixiert. Die Kontaktflächen der Interdigitalwandler wurden durch Platinbonddrähte elektrisch verbunden, welche anschließend mit Zwei-Komponenten-Epoxidharz abgedeckt wurden, um Korrosion und mechanischen Ablösungen vorzubeugen.

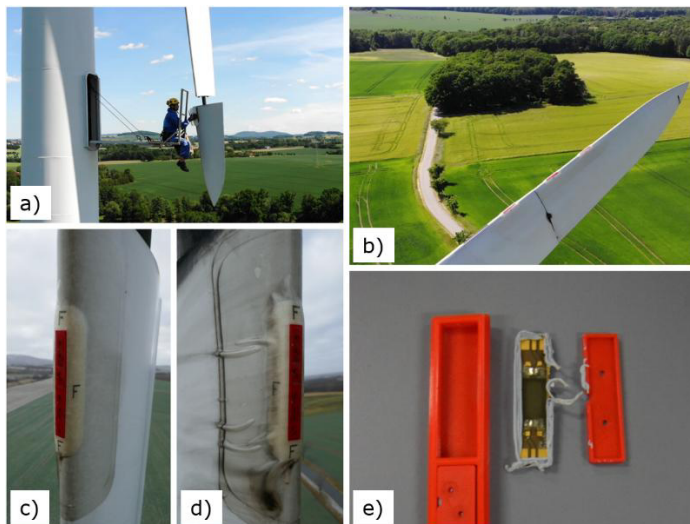


Abbildung 23 – WEA-Felduntersuchung zur Sensorbeständigkeit.

a) Installation der Probenträger im Bereich der Rotorblattspitze, b) Probenträger nach Installation während des Betriebs der WEA. Probenträger nach sieben Monaten von c) rechts und von d) links. e) Leiterplatte mit zwei SAW-Bauelementen nach Deinstallation und Zerlegung des Probenträgers.

Die Probenträger bestanden aus zwei Hauptkomponenten. Der innere Kern aus Polylactid (PLA) wurde so konstruiert, dass er die Leiterplatten aufnahm. Diese wurden mit einem druckempfindlichen, kittähnlichen Klebstoff eingebaut, der zusätzlich die aus PLA gedruckte Abdeckung fixierte. Die Abdeckung enthielt Löcher mit einem Durchmesser von einem Millimeter, die eine direkte Exposition der SAW-Bauelemente ermöglichten. Der äußere Teil des Probenträgers wurde aus flexiblem, thermoplastischem Polyurethan (TPU) gefertigt, wodurch sich der gesamte Probenträger an die Rundung der Anströmkante des Rotorblattes anpassen konnte. Zur Befestigung am Rotorblatt wurde

UV-beständige Erosionsschutzfolie verwendet, die in der Rotorblatttechnik üblicherweise zur Abrasionsprävention genutzt wird. Diese selbstklebende Folie ermöglichte eine Sandwichbauweise, bei der die 3D-gedruckten Teile zwischen zwei Folienlagen eingebettet wurden.

Die SAW-Test-Resonatoren bestanden aus 530 µm dickem ST-X-Quarz und wiesen eine Strukturbreite der Fingerelektroden von etwa 1,8 µm auf. Die Resonatorstruktur wurde mit Aluminium-Titan-, Aluminium-Kupfer- oder Aluminium-Magnesium-Legierungen metallisiert, wobei die Schichtdicke 300 nm betrug. Zusätzlich wurden SiO₂-Passivierungsschichten mit Dicken von 200, 500 und 1000 nm aufgebracht, um deren Einfluss auf das Korrosionsverhalten zu analysieren. Insgesamt wurden 48 SAW-Resonatoren mit und ohne Passivierung auf dem Rotorblatt installiert. Ein siebter Probenträger enthielt vier Zwei-Tor-Verzögerungsleitungen (two-port delay lines), die aus 64° YX- und 128° YX-LiNbO₃ bestanden. Die Verzögerungsleitungen wiesen eine SiO₂-

Passivierungsschicht von 500 nm auf, die jedoch an den Kontaktflächen ausgespart war, um elektrische Messungen zu ermöglichen.

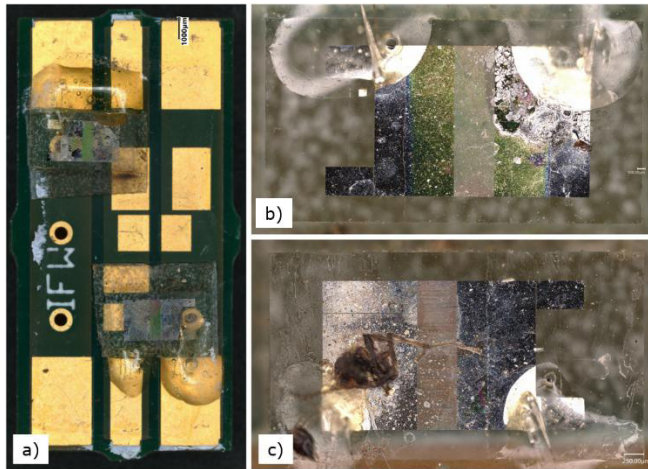


Abbildung 24 – Schädigungsbilder nach WEA-Feldversuch. a) Leiterplatte mit zwei korrodierten SAW-Bauelementen. b) Korrodiertes SAW-Bauelement nach zwei Monaten am Rotorblatt. c) Korrodiertes SAW-Bauelement mit Insekt nach drei Monaten am Rotorblatt. c) Korrodiertes SAW-Bauelement mit Insekt nach drei Monaten am Rotorblatt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Korrosion primär in der Nähe der Bonddrähte und des Epoxidklebers auftrat.

Verschiedene Korrosionsarten wie Flächenkorrosion, Lochkorrosion, Spaltkorrosion, interkristalline Korrosion und Spannungsrisskorrosion wurden beobachtet. Verschmutzungen wie Staubpartikel, Agglomerationen größerer Partikel und Delaminationen an SiO₂-Schichten wurden ebenfalls festgestellt. Mechanische Schäden wie Kratzer und Bruchkanten traten vereinzelt auf, was die Bedeutung angepasster Montagetechnologien unterstreicht. Die chemischen Eigenschaften der verwendeten Materialien sowie die Umwelteinflüsse, darunter Aerosole

im Regenwasser, beeinflussten das Korrosionsverhalten signifikant.

Die Analyse lieferte wertvolle Erkenntnisse über die Umweltbedingungen und deren Einfluss auf SAW-Bauelemente. Die Ergebnisse sind essenziell für die Entwicklung robuster Schutzmaßnahmen und die Optimierung der Integration solcher Systeme unter realen Betriebsbedingungen und werden bei folgenden Bauelemente-Generationen berücksichtigt.

1.2.3 Ergebnisse & Bewertung

Der Laborversuch hat folgende Erkenntnisse hervorgebracht:

- Die Stabilität von Passivierungsschichten hängt stark von den Prozessbedingungen bei der Herstellung ab (saubere Umgebung).
- Die Kanten der SAW-Bauelemente sind kritische Stellen, da dort Korrosionsmedien eindringen können, und müssen besonders geschützt werden (z.B. mit zusätzlichem Schutzlack).
- Mit ALD wird eine bessere Passivierung der Kanten der metallischen Strukturen erzielt.
- Eine dickere SiO₂-Schicht hat eine höhere Schutzwirkung gegenüber korrosiven und abrasiven Medien.
- Die Kombination aus ALD und Sputtern erhöht die Schutzfunktion von SiO₂-Passivierungsschichten.

Der Feldversuch hat folgende Erkenntnisse hervorgebracht:

- An der Anströmkante des Rotorblattes treten die höchsten Beanspruchungen in Form von Verschmutzung und Erosion auf.
- Wenige Zentimeter neben der Anströmkante (in Profiltiefenrichtung) ist der Grad an Verschmutzung und Erosion deutlich verringert.
- Verschmutzung tritt überwiegend in Form von Sandpartikeln und Insekten auf.
- Es wird davon ausgegangen, dass Regen, der auf der Rotorblattoberfläche fließt Abrieb des Lackes (Polyurethan) transportiert und bei Kontakt mit dem SAW-Bauelement einen Film hinterlässt.

Fazit:

- Die Kombination aus ALD und Sputtern erhöht die Schutzfunktion auf dem SAW-Bauelement.
- Die Installation von SAW-Bauelementen wird außerhalb des Anströmkantenbereichs empfohlen.
- Die Oberfläche des SAW-Bauelements sollte möglichst parallel zur Strömungsrichtung auf dem Rotorblatt ausgerichtet sein.
- Beim Packaging des SAW-Bauelements ist darauf zu achten, dass insbesondere die Wandlerstruktur als auch die Kanten des Bauelements besonders geschützt werden.

1.3 Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Untersuchungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik wurden durchgeführt, um herauszufinden wie die Installation eines SAW-Sensor-Systems an einer WEA realisiert werden kann. Während in Abschnitt 1.2.1 bereits die Installation der SAW-Bauelemente an der gekrümmten Anströmkante eines Rotorblattes behandelt wurde, beschäftigen sich die folgenden Abschnitte mit den Mounting-Lösungen für die SAW-Bauelemente inklusive sensorseitiger Antenne am Rotorblatt einer WEA.

1.3.1 Sensorgehäuse & Installation

Zur Anbringung von SAW-Bauelementen inklusive Antenne am Rotorblatt wurden zwei verschiedene Bauelemente mit eigens dafür per Rapid-Prototyping hergestellten Gehäusen verwendet. Bei den in den **Abbildung 25a, b** und **c** gezeigten Optionen handelt es sich um einen kommerziellen SAW-Temperatursensor mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz (SAW Components Dresden). Das SAW-Bauelement befindet sich in seinem Gehäuse auf dem PCB (Printed Circuit Board), das auch die flächig ausgeführte Antenne mit beinhaltet. Die Antenne liegt in Form einer Flach-Antenne vor und ist auf dem gleichen PCB wie das SAW-Bauelement integriert.

Zur Anbringung dieses Sensors auf dem Rotorblatt wurde ein TPU-Gehäuse gedruckt. TPU ist ein thermoplastisches Polyurethan, welches dank seiner elastischen Eigenschaften an gekrümmte Oberflächen angepasst werden kann. Die Abmessungen dieses Gehäuses betragen 10x11 cm mit einer Gesamtdicke von 4 mm (**Abbildung 25c**). Der SAW-Sensor wurde anschließend inklusive Antenne und samt TPU-Gehäuse in eine untere und obere Erosionsschutzfolie eingebettet, in der Art, dass die untere Lage der Erosionsschutzfolie die Haftfläche zur Installation am Rotorblatt bietet.

Der eingebettete Sensor wurde in zweifacher Ausführung realisiert. Diese unterscheiden sich in der Farbe der Erosionsschutzfolie (weiß bzw. transparent). Vor der Installation im Bereich der Rotorblattwurzel wurde die Oberfläche des Rotorblattes mit Isopropanol gereinigt. Der Reinigungsvorgang wurde in Voruntersuchungen optimiert, da sich auf der Rotorblattoberfläche aufgrund der Umweltbedingungen immer ein haftmindernder Film befindet, welcher vor der Installation entfernt werden muss. Dieser Film besteht aus einer Kombination von Staubpartikeln aus der Umgebung und Lackpartikeln, die sich durch witterungsbedingte Abrasionsvorgänge gebildet haben. Außerdem wurde bei den Tests mit Gaffa Tape eine angeraute Oberfläche simuliert, um zu zeigen, dass dadurch die

Haftbedingungen zwischen Erosionsschutzfolie und Rotorblattoberfläche verbessert werden kann (**Abbildung 25c**).

In **Abbildung 25d** ist ein 433 MHz-SAW-Sensor inklusive Dipolantenne abgebildet, mit einem 3D-gedruckten TPU-Gehäuse. Das SAW-Bauelement wurde in ein Chip-Gehäuse geklebt und mit Bonddrähten kontaktiert. Das Chip-Gehäuse wurde anschließend auf eine Leiterplatte mit SMA-Anschluss gelötet, sodass eine Dipol-Antenne mit SMA-Anschluss angeschlossen werden konnte. Da sowohl die Dipol-Antenne als auch die verwendeten Koaxialanschlüsse noch nicht für den Anwendungsfall optimiert werden konnten, liegt die Gesamtdicke dieses Aufbaus im 3D-gedruckten Gehäuse bei 10 mm. Die maximalen seitlichen Abmessungen des T-förmigen Gehäuses liegen bei 25cm x 14,5cm.

Analog zum 2,45 GHz-Sensor wird auch der 433 MHz-Sensor in Erosionsschutzfolie eingebettet, damit die Installation am Rotorblatt nach dem gleichen Montageprotokoll erfolgen kann (**Abbildung 25e**).

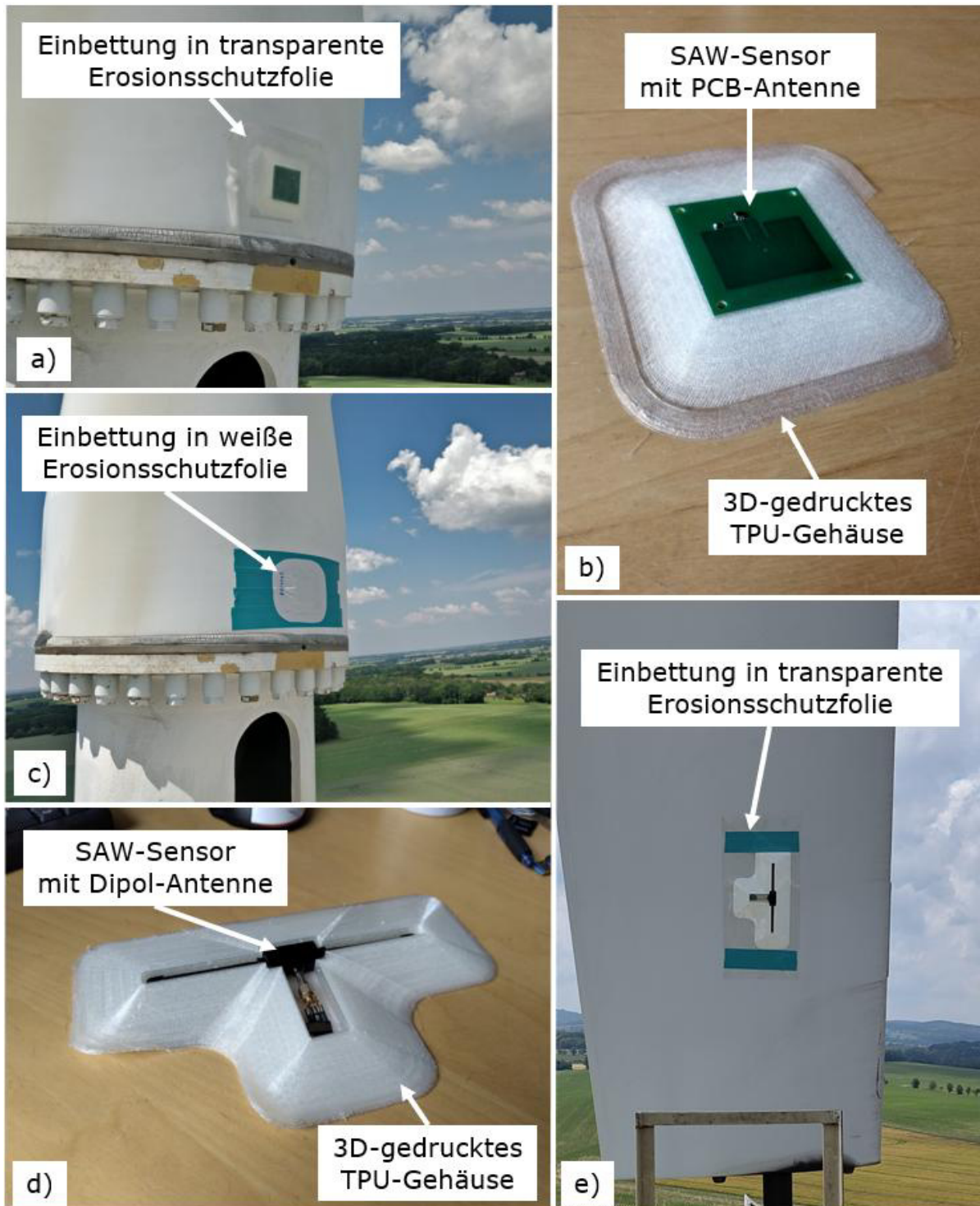


Abbildung 25 - Anbringung von SAW-Bauelement inklusive Antenne am Rotorblatt.

a) und c) 2,45 GHz-SAW-Sensor mit PCB-Antenne an Rotorblattwurzel, b) 2,45 GHz-SAW-Sensor in 3D-gedrucktem TPU-Gehäuse, d) 433 MHz-SAW-Bauelement mit Dipolantenne in 3D-gedrucktem TPU-Gehäuse, e) 433 MHz-SAW-Bauelement mit Dipolantenne im Bereich der Rotorblattspitze.

Zusätzlich zu dieser Form der Anbringung, welche sich insbesondere für eine horizontale Anordnung des SAW-Bauelements und für vollständig gehauste SAW-Bauelemente eignet, wurden zwei weitere innovative Gehäuseformen und Installationsarten konzipiert, die Teil einer laufenden Schutzrechtsanmeldung sind und deshalb noch nicht offengelegt werden können.

1.3.2 Antennen- und Lesegerätinstallation an WEA

Die Installation der Antennen für die verwendeten Lesegeräte erfolgte auf der Gondel der WEA und außen am Turm auf Höhe der Rotorblattspitze. Für die Installation auf der Gondel wurde ein T-förmiger Fuß aus Aluminium-Lochblech gefertigt und direkt mit dem Gondeldach verschraubt. Das Gondeldach besteht aus faserverstärktem Kunststoff. Zum Schutz vor Feuchtigkeit wurden die Bohrungen mit Dichtungsringen versehen. Auf den T-förmigen Aluminium-Fuß wurde ein L-förmiges Stahlblech als Antennenhalter befestigt. Antenne und Lesegerät sind mit einem Koaxialkabel mit N-Anschlüssen verbunden. Das Koaxialkabel wird für die Dauer der Untersuchung durch eine der Service-Zugänge geführt (**Abbildung 26a** und **b**), damit in dieser Phase auf eine weitere Bohrung durch das Gondelgehäuse verzichtet werden kann.

Die Antennen-Installation am Turm, der aus Stahl besteht, erfolgt mit Hilfe von Magnetfüßen (**Abbildung 26c**). Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die Haltekraft der Magnete groß genug ist um ein Rutschen zu verhindern. Je nach Antennengewicht wurden zwischen vier bis acht Neodym-Magnete verwendet, die jeweils eine Haltekraft von bis zu 30 N aufweisen (**Abbildung 26d**). Dies entspricht einer Masse von 3 kg.

Während die Anbringung des 433 MHz-Lesegeräts über Magnetfüße innerhalb des Turms erfolgt, wurde das 2,45 GHz-Lesegerät für die Dauer der Untersuchung auf dem Generatorgehäuse platziert. Eine permanente Installation kann problemlos per Schraubverbindung oder durch das Einlaminieren einer Wandhalterung in der Gondel erfolgen.

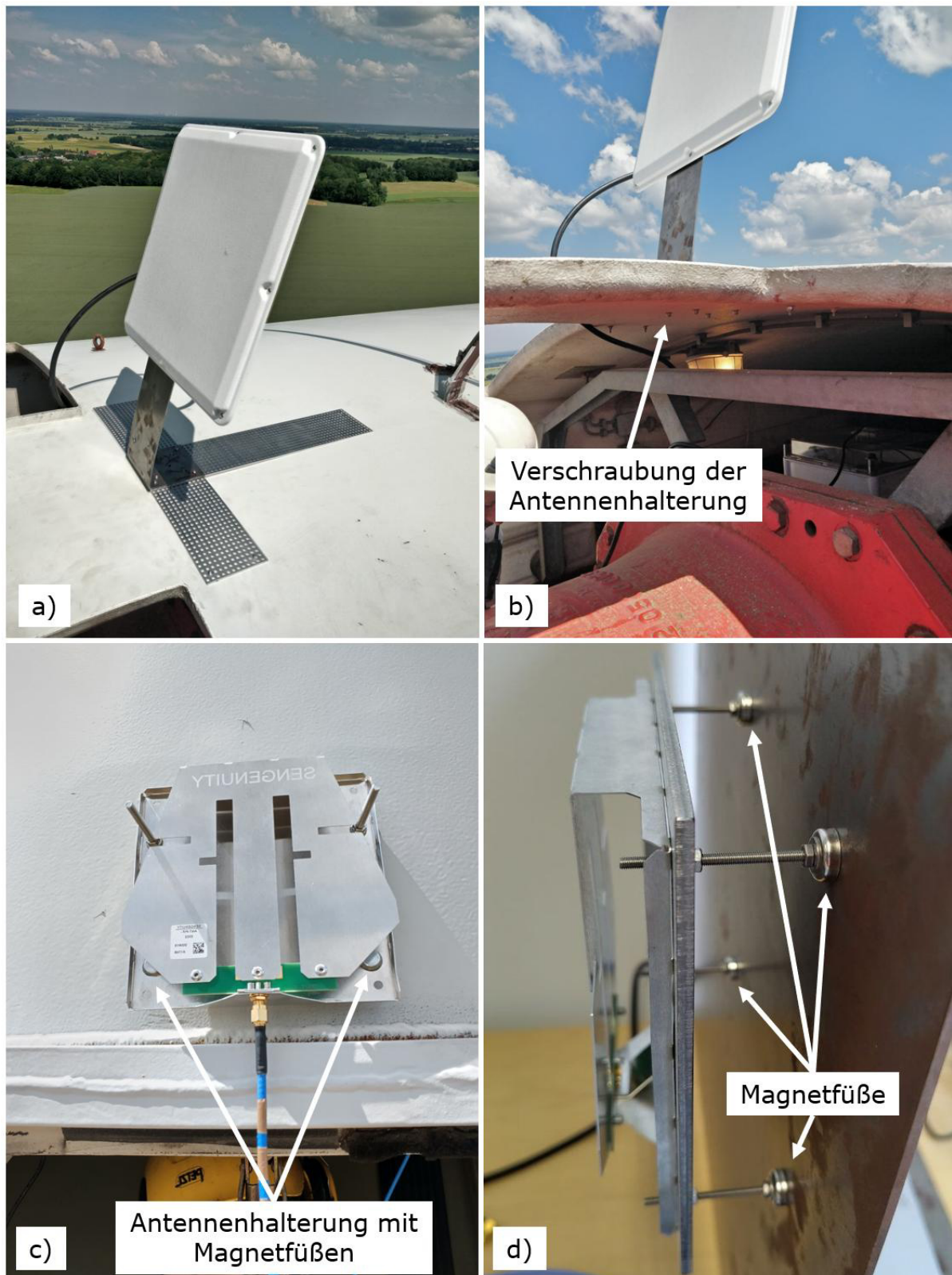


Abbildung 26 - Installation der Antennen an der WEA
a), b) auf der Gondel sowie c) am Turm auf Höhe der Rotorblattspitze. d) Foto von Antenne mit Magnetfußhalterung.

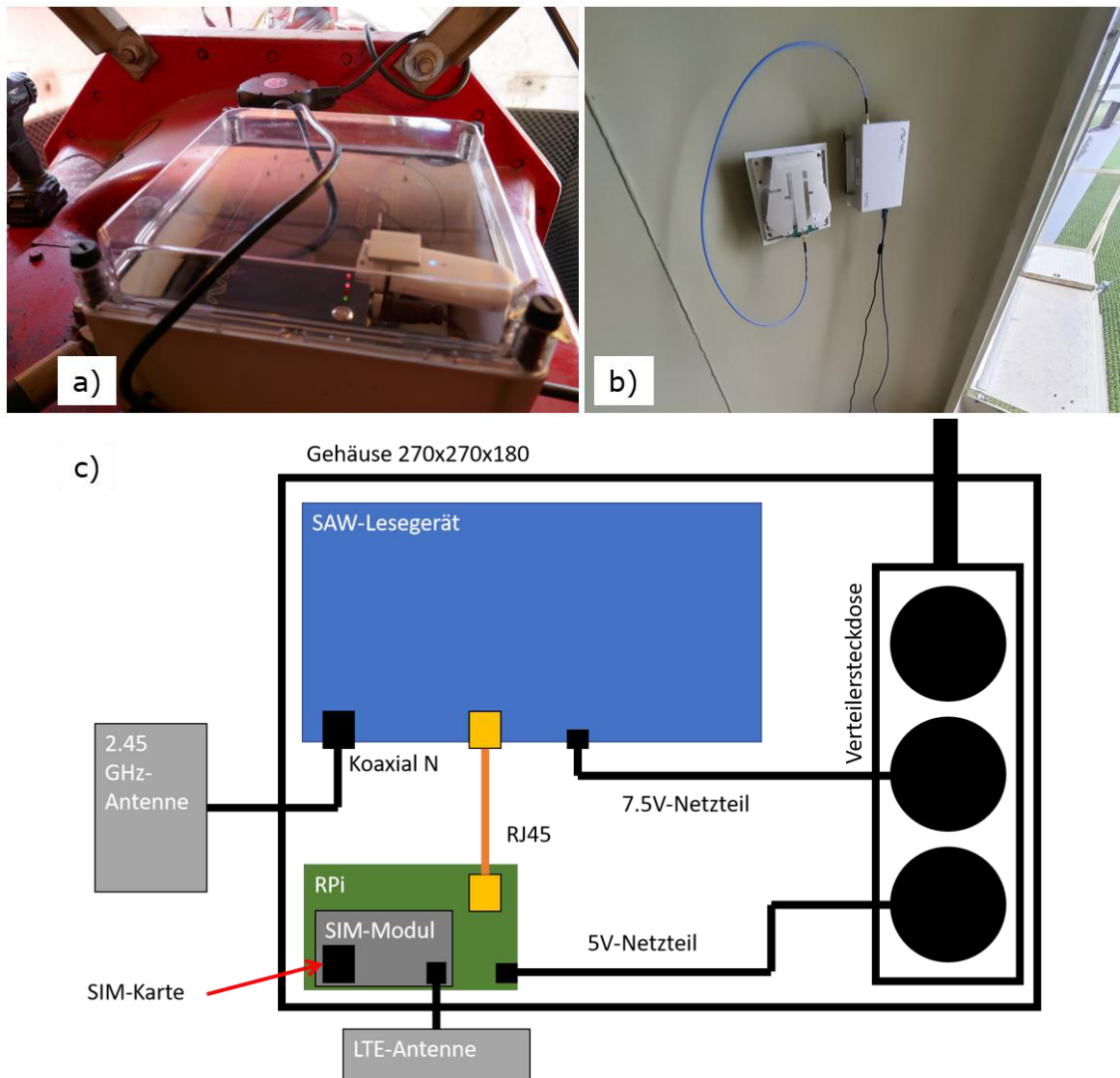


Abbildung 27 – Lesegeräte und schematische Darstellung.

a) 2,45 GHz-Lesegerät in WEA-Gondel, b) 433 MHz-Lesegerät in WEA-Turm und c) schematische Darstellung zum Aufbau des 2,45 GHz-Lesegeräts mit internetfähiger Datenabfrage.

1.3.3 Bewertung

Die Untersuchungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik haben gezeigt:

- SAW-Sensoren als Baugruppe aus SAW-Bauelement und Antenne können in kleiner Baugröße realisiert werden.
- Eine Eigenentwicklung von Antennen kann dafür von großem Vorteil sein.
- Die verwendeten Sensoren mit Gesamtdicken von 10 und 4 mm können bei Verwendung von bspw. IPEX-Konnektoren und sehr dünnen Leiterplatten deutlich flacher ausgeführt werden.
- Der 3D-Druck von TPU-Gehäusen eignet sich in besonderem Maße zum Schutz der Baugruppe und zur Installation auf gekrümmten Oberflächen.
- Nach gründlicher Reinigung und Vorbehandlung der Rotorblattoberfläche eignet sich Erosionsschutzfolie, um Sensoren auf dem Rotorblatt zu installieren.
- Vortex-Generatoren und Grenzschichtzäune können so gestaltet werden, dass die Integration von SAW-Sensoren zur Eisschichtdickenmessung möglich wäre.
- Die Anbringung von Antennen mittels Magneten ist am Turm möglich.
- Die Anbringung von Antennen auf der Gondel ist über eine Schraubverbindung möglich.

- Die Anbringung der Lesegeräte innerhalb der Gondel und dem Anlagenturm konnte realisiert werden.
- Das 2,45 GHz-Lesegerät erlaubt die Datenabfrage per Mobilfunk.

1.4 Funkabfrage

Die Zuverlässigkeit einer Funkabfrage von SAW-Sensoren über eine möglichst große Reichweite und an sich bewegenden Objekten (hier: Rotorblatt) wird von einer Vielzahl an Faktoren bestimmt, die optimal aufeinander abgestimmt sein müssen. Für die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen, die sich im Proof-of-Concept-Rahmen bewegen, wurden diese Faktoren betrachtet. Eine Optimierung der drahtlosen Abfrage konnte in diesem Rahmen nicht stattfinden und stellte keinen Teil des Aufgabenpakets dar.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden zwei kommerzielle Lesegeräte (SAW Components Dresden) verwendet, deren Betriebseigenschaften und -einstellungen für herkömmliche SAW-Sensoren optimiert sind und nur eingeschränkt an den Anwendungsfall der Eissensorik angepasst werden konnten.

Die beiden Geräte ermöglichen die Funkabfrage von SAW-Sensoren bei Arbeitsfrequenzen von entweder 2,45 GHz oder im Bereich von 100 MHz bis 700 MHz. Das Gerät, welches eine Abfrage im Frequenzbereich von 100 MHz bis 700 MHz erlaubt, wird bei dieser Untersuchung zur Abfrage von SAW-Bauelementen mit 433 MHz Arbeitsfrequenz genutzt. Dieses Lesegerät wird im Folgenden als 433 MHz-Lesegerät bezeichnet.

Da das 2,45 GHz-Lesegerät (**Abbildung 27a**) das im Unterschied zum 433 MHz-Lesegerät (**Abbildung 27b**) einen integrierten Windows-PC aufweist, kann mithilfe eines Raspberry Pis, eines SIM-Moduls oder einer LTE-Antenne eine Datenübertragung per Mobilfunk ausgelesen werden (**Abbildung 27c**). Die mit diesem Lesegerät aufgenommenen Daten wurden während der Untersuchungen zunächst an ein Smartphone gesendet und dort zur späteren Weiterverarbeitung gespeichert.

Bevor die Funkabfragbarkeit von SAW-Sensorsystemen an einer Windenergieanlage untersucht wird, erfolgt zunächst eine Analyse der maximalen Reichweiten, die bei der Funkabfrage der SAW-Bauelemente am Boden erreichbar sind. Hierfür werden beide kommerziellen Lesegeräte verwendet. Die Abtastrate des 2,45 GHz-Lesegeräts ist im Datenblatt mit 10 Hz angegeben. Diese variiert allerdings stark in Abhängigkeit von der Anzahl an Frequenzsweeps, der Anzahl an Mittelungen und der Dauer zur Durchführung des Auswertalgorithmus. Die jeweilige Abfragedauer wird auf der grafischen Benutzeroberfläche abgebildet und variiert von 25 ms bis zu 150 ms. Daraus folgt eine Abfragerate von etwa 7 bis 40 Hz. Ob es sich dabei um die tatsächliche Abfragerate handelt, konnte in diesem Rahmen nicht ermittelt werden.

Aus den Datenblättern gingen für beide Geräte keine Informationen zur tatsächlich verfügbaren Sendeleistung hervor. Es ist dabei jedoch davon auszugehen, dass die maximale Sendeleistung von 10 mW in den genutzten ISM-Bändern nicht erreicht wird.

Beide Lesegeräte sind mit spezifischen Antennen ausgestattet. Für das 2,45 GHz-Lesegerät kommt die Planarantenne zum Einsatz, die ein Stehwellenverhältnis von $\leq 1,5$ im Frequenzbereich von 2,4 bis 2,5 GHz sowie einen Antennengewinn von 19 dBi aufweist. Der vertikale und horizontale Strahlwinkel dieser Antenne beträgt jeweils 17°. Im 433-MHz-Band wird eine Planar Inverted F-Shaped Antenna genutzt, die eine Bandbreite von 5 % um die Mittenfrequenz von 433 MHz bietet. Diese Antenne hat ein Stehwellenverhältnis von 1,3 und einen Antennengewinn von 3,5 dBi. Ihre Polarisierung ist vertikal ausgerichtet.

Für eine zuverlässige Funkabfrage müssen die Polarisation der Antennen übereinstimmen. Deren Übereinstimmung wurde durch Ausprobieren ermittelt.

Das für die Tests im 2,4-GHz-Band verwendete SAW-Bauelement ist ein SAW-Resonator, der als Temperatursensor fungiert und bei einer Temperatur von 25 °C eine Arbeitsfrequenz von 2423,142 MHz besitzt. Laut Datenblatt beträgt die maximale Abfragereichweite dieses Resonators 50 cm. Das Bauelement ist zusammen mit einer PCB-Antenne auf einer Leiterplatte montiert. Im 433-MHz-Band wird ein Filterelement getestet, das als Resonator ausgelegt ist und bei 431,79 MHz ein Reflexionsfaktorminimum aufweist. Die Abfrage dieses Filterelements, das keinen expliziten Sensor darstellt, ist mithilfe des 433 MHz-Lesegeräts möglich, da dessen Abklingverhalten nach einer Anregung erfasst werden kann. Der Resonator ist über Bonddrähte mit einer Leiterplatte verbunden, die wiederum mittels SMA-Verbinder an eine 433-MHz-Dipolantenne angeschlossen ist.

1.4.1 Untersuchungen am Boden

Um die Eignung der funkabfragbaren SAW-Bauelemente für den Einsatz an einer Windenergieanlage zu bewerten, wurden umfangreiche Voruntersuchungen auf bebautem Gelände durchgeführt. Für das 2,4-GHz-System fanden die Tests in einem Konferenzraum und auf einem Parkplatz statt, während das 433-MHz-System auf demselben Parkplatz sowie in einem Freifeld neben der Babisnauer Pappel getestet wurde. Während aller Tests wurde darauf geachtet, die Messbedingungen möglichst realitätsnah zu gestalten. Die Antennen der Lesegeräte wurden über HF-taugliche Koaxialkabel mit den Geräten verbunden und mithilfe von Magneten an einer Stahlplatte befestigt, die den Stahlurm einer Windenergieanlage simulieren sollte. Der SAW-Sensor bzw. das SAW-Bauelement wurde in einer TPU-3D-gedruckten Halterung installiert, die für die spätere Montage am Rotorblatt vorgesehen ist. Diese Baugruppe wurde in gleicher Höhe wie die Antenne des Lesegeräts an einem Holzstab befestigt. Da Rotorblätter überwiegend aus nicht-leitfähigem glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) bestehen, wurde auch auf der Seite des Sensors ein nicht-leitfähiges Material verwendet. Die Installationshöhe der Antennen betrug etwa 1,5 m. Unterschiede in der Abfragereichweite wurden durch eine Variation der Antennenpolarisation untersucht.

Die Abfrage- und Auswertesoftware der Lesegeräte lieferte während der Messungen Daten zum Signalpegel, gemessen in dB, sowie zum Rauschpegel und zum Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR). Im Konferenzraum zeigte sich eine maximale Abfragereichweite von 5 m. Der gemessene Rauschpegel lag hier zwischen -72,5 und -78 dB, während das Signal-zu-Rausch-Verhältnis Werte zwischen 56 und 24 dB erreichte. Der Signalpegel lag im Bereich von -17 bis -53 dB, wobei im Nahbereich von weniger als 20 cm Abstand zur Wand ein erhöhter Signalpegel zu beobachten war. Auf dem Parkplatz wurde eine maximale Abfragereichweite von 3 m gemessen, wobei stabile Messwerte bis etwa 1,2 m erzielt wurden. Der Rauschpegel lag hier zwischen -47 und -54 dB, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis erreichte Werte zwischen 33 und 15 dB, und der Signalpegel variierte zwischen -21 und -38 dB.

Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, dass der Rauschpegel im Außenbereich deutlich höher ist als im Innenbereich des Konferenzraums, der aufgrund seiner Stahlbetonwände mit Aluminiumverkleidung als Faradayscher Käfig fungiert. Dies führt zu deutlich anderen Messbedingungen, da dort beispielsweise auch kein Handyempfang möglich ist. Insgesamt wurde festgestellt, dass das getestete System für den Einsatz am Rotorblatt ungeeignet ist. Als potenzieller Anwendungsfall wurde jedoch die Messung zwischen Gondel und Rotorblattnabe identifiziert.

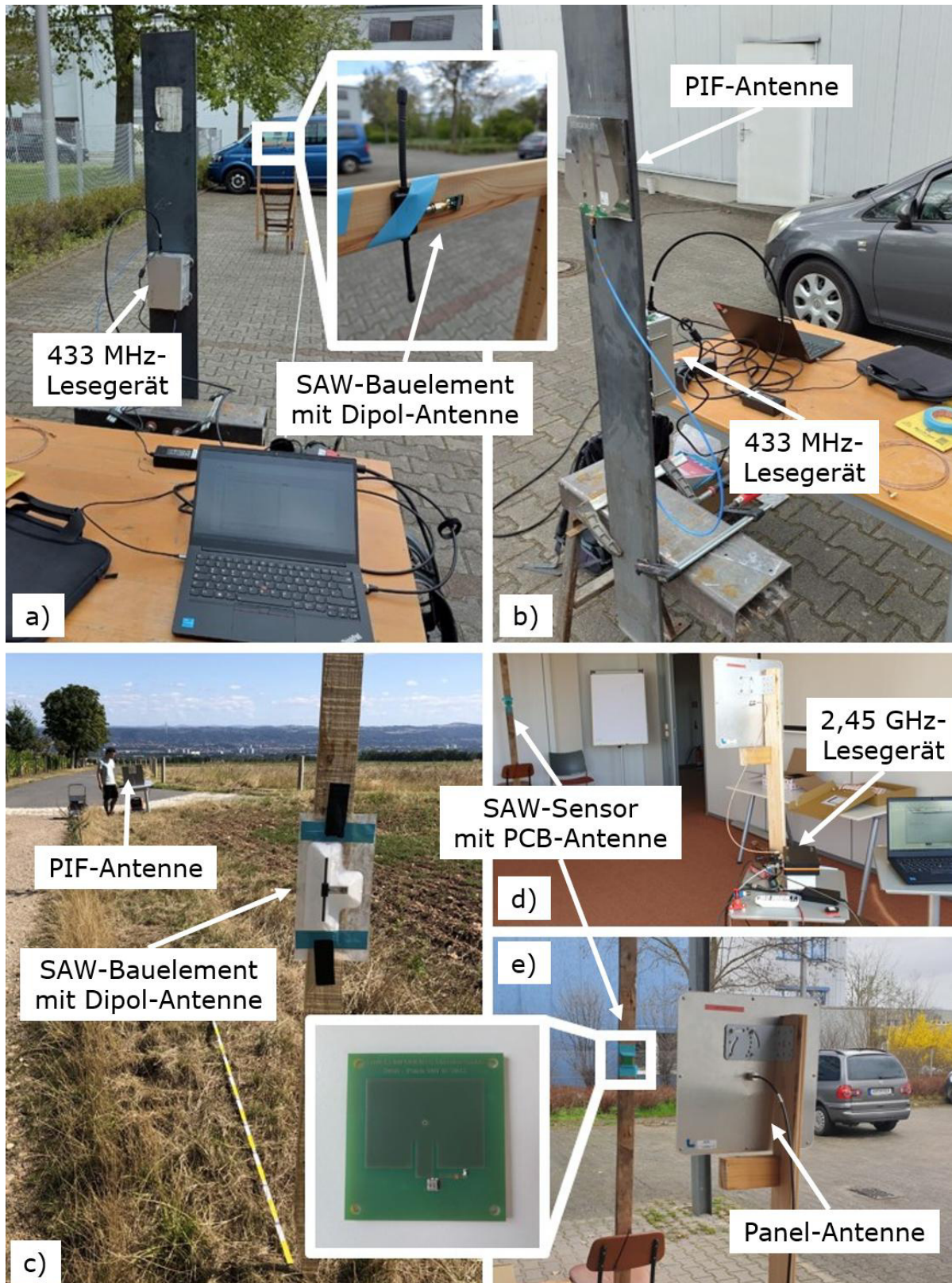


Abbildung 28 - Aufbau zur Untersuchung der Funkabfrage mittels des 433 MHz-Systems.
a), b) auf dem Parkplatz, c) im Feld und für das 2,45 GHz-System d) im Konferenzraum und e) auf dem Parkplatz.

1.4.2 Untersuchungen an WEA

Für die Untersuchung zur Funkabfrage an der WEA ist zum einen zu berücksichtigen, dass sich die Umgebungseigenschaften in Turmhöhe im Vergleich zu denen während der Untersuchungen am Boden aufgrund unterschiedlicher Ausbreitungsbedingungen der Funkwellen deutlich unterscheiden können. Insbesondere im Betrieb der WEA spielen die Abfragerate des Lesegeräts und der Gewinn wie auch die Öffnungswinkel der Antennen eine entscheidende Rolle. Die Zuverlässigkeit der Messung hängt davon ab wie lange sich der Sensor und dessen Antenne im Abstrahlungsbereich der Antenne des Lesegeräts befindet. Das heißt bei hohen Rotordrehgeschwindigkeiten und einer Durchgangsdauer, die unterhalb der Abfragerate des Lesegeräts liegt, kann keine Funkabfrage erfolgen.

a) Funkabfrage auf der Gondel

Das SAW-Messsystem wurde wie in Abschnitt 1.3 beschrieben installiert (**Abbildung 30**) und eine Funkabfrage durchgeführt. Bei Stillstand der WEA konnte kontinuierlich eine Funkabfrage stattfinden. Anschließend wurde die WEA gestartet und untersucht, inwieweit eine Messung im Betrieb möglich ist. Die Dokumentation der Messgrößen erfolgte zum einen durch Speicherung der vom Auswertalgorithmus erkannten Messwerte bei der Arbeitsfrequenz des SAW-Sensors und durch die Videoaufnahme der Signalwerte über den gesamten Frequenzbereich über der Zeit der Messung. Bereits nach zwei Rotorumdrehungen konnte der Auswertalgorithmus des kommerziellen Lesegeräts keine exakten Messwerte zuordnen und aufnehmen, während über die Benutzeroberfläche der Lesegerät-Software noch klar zuordnbare Messwerte abgelesen werden konnte. So war es möglich, mit Hilfe der Videoaufnahme in zwar zeitlich geringer Auflösung von nur einer Sekunde, Messwerte für den installierten SAW-Sensor für die Anfahrphase der WEA aufzunehmen. Aus der Messung war es anschließend möglich, die entsprechende Rotordrehzahl zu bestimmen. In **Abbildung 29** ist zu sehen, wie der Rotor anfährt und beschleunigt. Bei Erreichen der Nenndrehzahl ist die zeitliche Auflösung, die mit den zur Verfügung stehenden Lesegeräten realisiert werden kann, allerdings zu gering, um die Rotordrehzahl mittels des SAW-Sensors korrekt zu bestimmen. Mit einem Lesegerät, welches speziell an den Anwendungsfall angepasst ist, ist aber auch die Messung der Rotordrehzahl realisierbar.

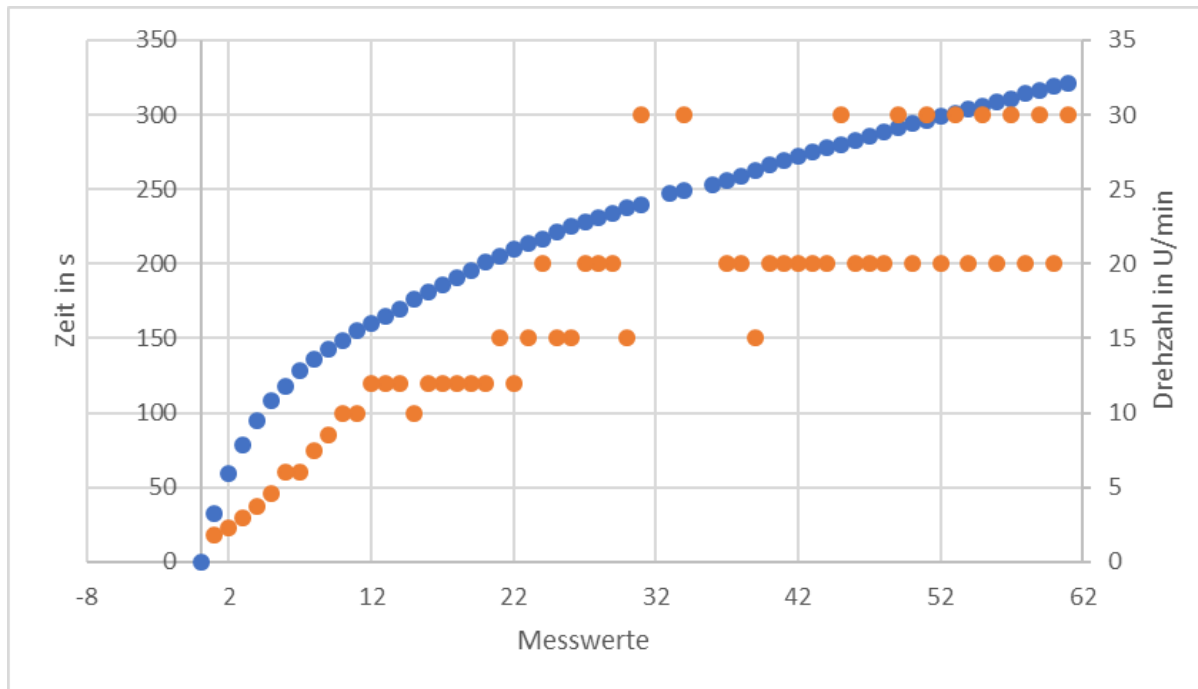


Abbildung 29 – Betriebsdiagramm der WEA-Messungen
Verlauf der Zeit (blau) und Rotordrehzahl (orange) für die ermittelten Messwerte

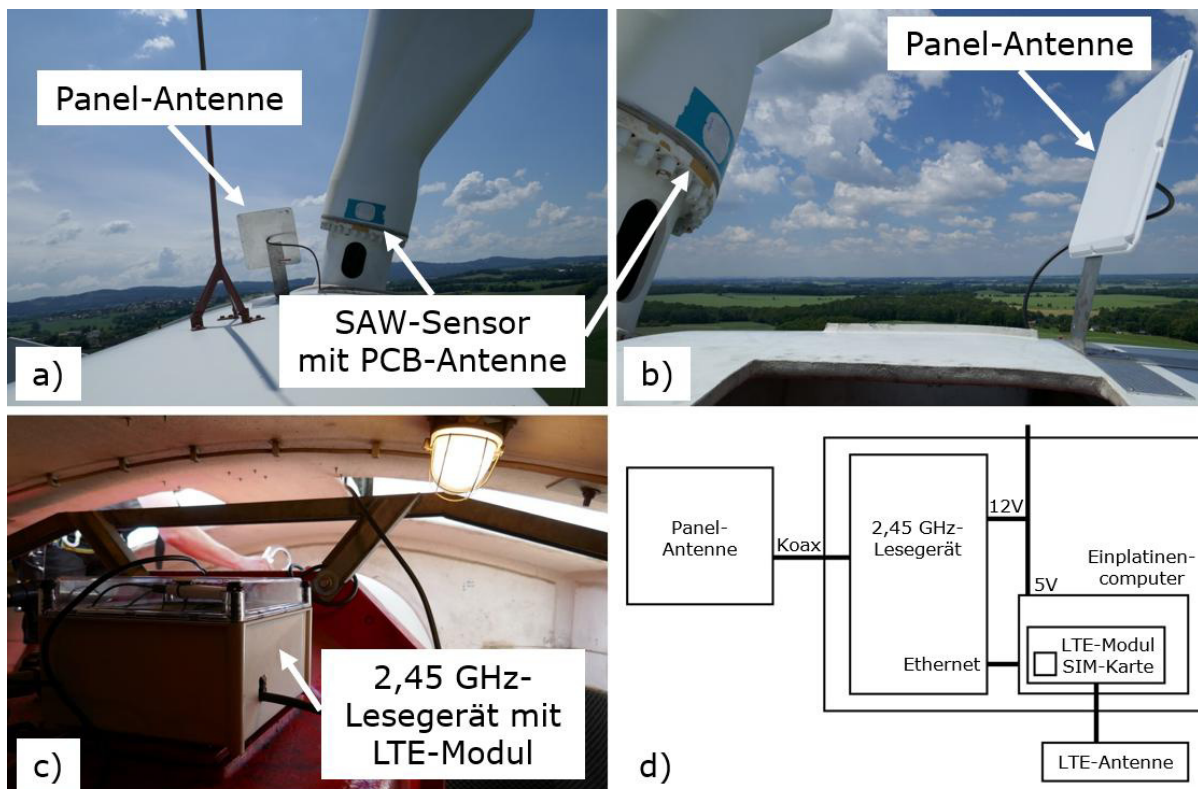


Abbildung 30 - Aufbau zur Untersuchung der Funkabfrage mittels des 2,45 GHz-Systems.
a), b) auf der Gondel und c) innerhalb der Gondel. d) Schematischer Aufbau des Lesegeräts zur Funkabfrage des Sensors und zur Datenkommunikation mittels Mobilfunk.

b) Funkabfrage an der Rotorblattspitze

Zur Untersuchung der Funkabfrage im Bereich der Rotorblattspitze wurden die in den vorherigen Abschnitten aus Kapitel 1.4 gezeigten Systemkomponenten um weitere Lesegerät- und Antennenkomponenten ergänzt. Verwendet wurden zwei Lesegeräte, die bei 433 MHz arbeiten können. Dabei handelt es sich um das bereits vorgestellte 433 MHz-Lesegerät und zusätzlich das WSR-T2 Lesegerät. Auch das bereits vorgestellte 2,45 GHz-Lesegerät, wurde für diese Untersuchung verwendet.

Auf Seite des Lesegerätes wurden zwei 433 MHz-Antennen und eine 2,45 GHz-Antenne getestet. Dabei handelt es sich um eine PIF-Antenne von SENGENUITY (**Abbildung 31b**) eine Panel-Antenne von Wireless-Edge (MT-182011/NV) und eine Panel-Antenne von ALFA (APA-L2419).

Auf Seite des Sensors wurde eine Dipol-Antenne (SENGENUITY), zwei Helix-Antennen (SENGENUITY und Texas Instruments), eine FPC-Antenne (Antenova) und eine PCB-Antenne (SAW COMPONENTS) untersucht.

Die SAW-Sensoren, welche mit der Helix-Antenne von SENGENUITY und der PCB-Antenne von SAW COMPONENTS verbunden sind, wurden auch von diesen Firmen hergestellt. Alle weiteren Antennen wurden mit selbstentwickelten SAW-Bauelementen verwendet.

Bei den Untersuchungen zur Funkabfragbarkeit der einzelnen Sensor-, Lesegerät- und Antennenkomponenten hat sich herausgestellt, dass mit allen Varianten mit Ausnahme der Dipol-Antenne (SENGENUITY) eine Funkabfrage zwischen Turm und Rotorblatt realisiert werden konnte.

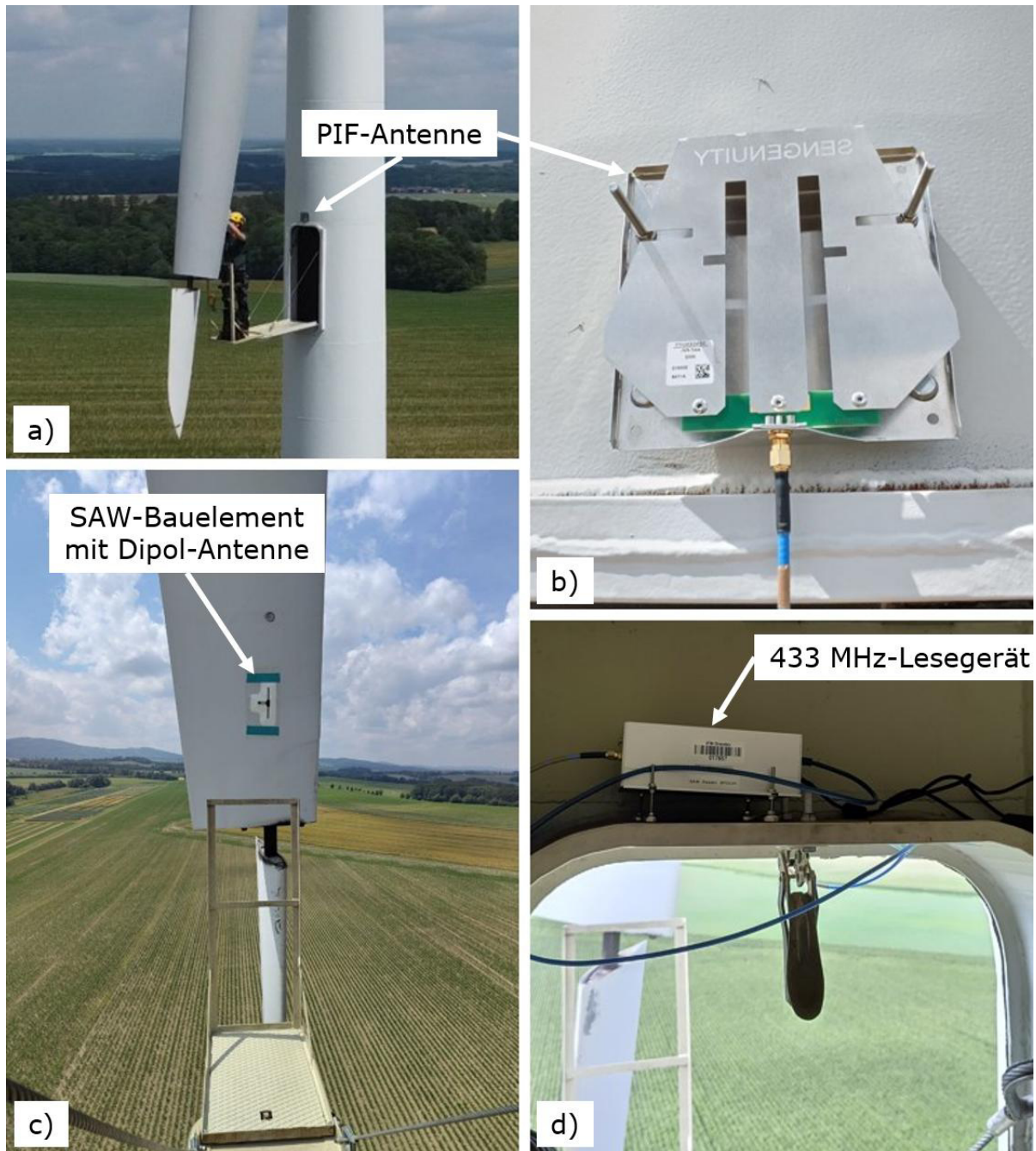


Abbildung 31 - Aufbau zur Untersuchung der Funkabfrage mittels 433 MHz-System im Bereich der Rotorblattspitze.

a) Drohnenaufnahme während der Installation, b) Installation der PIF-Antenne, c) Ansicht vom Servicezugang, d) Installation des Lesegeräts.

1.4.3 Bewertung

Die Untersuchungen zur Funkabfragbarkeit der SAW-Sensoren an WEA haben gezeigt:

- SAW-Sensoren können am Boden bis zu einer Reichweite von 15m abgefragt werden.
- SAW-Sensoren lassen sich sowohl im Bereich der Rotorblattwurzel und der Rotorblattspitze abfragen.
- Die Abfrage im Bereich der Rotorblattwurzel während des Betriebs der WEA ist aufgrund der geringeren Durchlaufgeschwindigkeit möglich, aber begrenzt.

- Zur Abfrage im Blattspitzenbereich ist ein Lesegerät erforderlich, welches grundlegend auf den Anwendungsfall abgestimmt wurde.

2 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Projekts in komprimierter Form der ursprünglichen Zielsetzung gegenübergestellt.

AP 1: Sensorentwicklung

Ziel: Herstellung mindestens eines Chipmusters und Charakterisierung der Bauelemente

Ergebnisse:

- Herstellung von fünf Chipmustern:
 - Interdigitale Wandlerstruktur
 - Zwei-Tor Verzögerungsleitung
 - Dual-Mode Verzögerungsleitung
 - Reflektive Ein-Tor Verzögerungsleitung
 - Reflektive Ein-Tor Verzögerungsleitung mit Impedanzbeladung
- Charakterisierung der fünf Chipmuster
- Bewertung der fünf Chipmuster entsprechend des Anwendungsfalls
- Schutzrechtsanmeldung für neues Konzept zur Eisdetektion und Eisschichtdickenmessung mittels reflektiver Ein-Tor Verzögerungsleitung mit und ohne Impedanzbeladung.

Fazit: erfüllt

AP 2: Materialbeständigkeit

Ziel: Herstellung von passivierten Testbauelementen und Untersuchung der Widerstandsfähigkeit unter Labor- und industriellen Einsatzbedingungen am Rotorblatt

Ergebnisse:

- Herstellung von passivierten Testbauelementen ist erfolgt.
- Laboruntersuchungen zur Widerstandsfähigkeit der Testbauelemente hat gezeigt, dass eine Kombination aus zwei Passivierungsverfahren (Atomic-Layer-Deposition und Sputtern) zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegenüber korrosiven Medien führt.
- Die Untersuchung von passivierten Testbauelementen in industrieller Umgebung am Rotorblatt ist erfolgt und hat zu wertvollen Erkenntnissen bezüglich zu erwartender Störgrößen und der Installation von SAW-Sensoren am Rotorblatt geführt.

Fazit: erfüllt

AP 3: Aufbau- und Verbindungstechnik

Ziel: Entwicklung der finalen Konzepte für AVT und Montagefassung von Sensoren und Antennen sowie Felduntersuchungen an WEA zur Evaluierung

Ergebnisse:

- Entwicklung von AVT-Konzepten und Montagefassung für SAW-Sensoren und deren Antennen ist erfolgt und hat zu drei Konzepten geführt. Zwei dieser Konzepte sind Teil einer laufenden Schutzrechtsanmeldung

- Entwicklung von AVT-Konzepten und Montagefassung für Lesegeräte und Antennen inklusiver der Datenübertragung per Mobilfunk ist erfolgt und wurde an der WEA erprobt.

Fazit: erfüllt

AP 4: Funkabfrage

Ziel: Untersuchung und Qualifizierung des ausgewählten Funkabfragesystems und Betriebsregimes unter den realen WEA-Einsatzbedingungen

Ergebnisse:

- Die in AP 3 entwickelten Konzepte wurden unter realen WEA-Einsatzbedingungen untersucht.
- Die Durchführung der Untersuchungen zur Funkabfrage hat sich zeitlich stark verzögert, da sich die Auslieferung der Lesegeräte aufgrund von Lieferengpässen um circa 6 Monate verspätet hat.
- Die Funkabfrage bei Installation auf der Gondel der WEA war sowohl im Stillstand als auch Betrieb erfolgreich.
- Die Funkabfrage bei Installation im Rotorblattspitzenbereich war im Stillstand erfolgreich.
- Die Abfragerate der kommerziell erhältlichen Lesegeräte ist zu gering, um bei hohen Rotordrehzahlen eine zuverlässige Funkabfrage zu ermöglichen.
- Die Eigenentwicklung eines an den Anwendungsfall angepassten Lesegeräts ist ein lohnenswerter Lösungsansatz.

Fazit: erfüllt

AP 5: Funktionstest an WEA

Ziel: Herstellung sowie Vor-Ort-Untersuchung und Validierung eines Demonstrator-Systems zur Eisdetektion am WEA-Rotorblatt

Ergebnisse:

- Demonstratorsystem konnte trotz erfolgreicher Komponentenuntersuchung in Projektzeitraum noch nicht realisiert werden, Validierung steht dementsprechend aus

Fazit: noch ausstehend

AP 6: Projektauswertung und Ausblick

Ziel: Zusammenfassung aller Erkenntnisse, darauf aufbauend Konzeption zur Weiterarbeit und Untersuchung weitgehender Anwendungsszenarien

Ergebnisse:

- Zusammenfassung der Projektergebnisse in wissenschaftlicher Publikation sowie Berichtsform erfolgt
- Konzeptentwicklung für weitergehenden Einsatz funkabfragbarer SAW-Sensorik erfolgt

Fazit: erfüllt

3 Bewertung der Ergebnisse

Bei diesem Vorhaben handelt es sich um die erstmalige und umfassende Untersuchung

zur Integration von innovativer SAW-Sensorik als Zustandsüberwachungssystem bei Windenergieanlagen. Der betrachtete Anwendungsfall ist die Eisdetektion auf der Rotorblattoberfläche von WEA mit dem Ziel der Reduktion von Stillstandszeiten durch die Nutzung von SAW-Sensoren, die keine zusätzliche Energieversorgung benötigen, kabellos abfragbar und in ihrer Herstellung umwelt- und ressourcenschonend sind.

Im Rahmen des Vorhabens wurde nachgewiesen, dass SAW-Bauelemente alle erforderlichen Fähigkeiten besitzen, um Eisansatz auf Oberflächen zuverlässig zu detektieren. Des Weiteren können SAW-Bauelemente so gestaltet werden, dass diese eine Eisschichtdickenmessung erlauben.

Ebenso konnte gezeigt werden, dass es möglich ist passive SAW-Sensoren im industriellen Umfeld von Windenergieanlagen kabellos abzufragen. Die Abfrage von SAW-Sensoren im Bereich der Rotorblattwurzel mit SAW-Systemaufbau auf der WEA-Gondel und im Bereich der Rotorblattspitze mit SAW-Systemaufbau am Turm der WEA wurde realisiert. Auch während des Betriebs der Windenergieanlage konnten SAW-Sensoren kabellos abgefragt werden. Allerdings treten hierbei Limitationen auf, die durch die zur Verfügung stehenden Lesegeräte bedingt sind. Der Stand der Technik bei der kabellosen SAW-Technologie beruht in den meisten Fällen auf eine statische Funkabfrage oder die Funkabfrage von sich langsam bewegendenden SAW-Sensoren. Aus diesem Grund sind kommerziell verfügbare SAW-Lesegeräte nur bedingt geeignet. Die technologische Anpassung von Lesegeräten an den hier beschriebenen Anwendungsfall ist ein Lösungsansatz.

4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Vorhabensergebnisse wurden umfassend in Form von Beiträgen auf Fachkonferenzen diskutiert. Aus Vorarbeiten, die zu diesem Vorhaben führten, ergab sich bereits ein Konferenzbeitrag mit Präsentation auf dem 16. Dresdner Sensor Symposium 2022 [7], der hier ebenfalls erwähnt werden soll. Während der Projektbearbeitungszeit wurden Vorhabensergebnisse in Form einer Präsentation auf der Sensor and Measurement Science International 2023 in Nürnberg [8], sowie Posterbeiträge auf dem SAW Symposium 2023 in Dresden und der Acoustofluidics Conference 2024 in Uppsala erbracht. Der innovative Lösungsansatz zur Eisdetektion an Rotorblättern mittels SAW-Sensorik wurde darüber hinaus auf der Acoustofluidics Conference mit dem „W. Terence Coakley Award“ gewürdigt [9].

Im Open Access Journal Sensors wurde 2024 der Artikel „A Dual-Mode Surface Acoustic Wave Delay Line for the Detection of Ice on 64°-Rotated Y-Cut Lithium Niobate“ [5] publiziert, in dem das neuartige Sensorkonzept zur Eisdetektion erstmals vorgestellt wurde. Weitere Veröffentlichungen von Vorhabensergebnissen aus diesem Projekt sind geplant.

Für ein im Rahmen des Projekts entwickeltes Konzept zur erweiterten drahtlosen Eisdetektion und Eisschichtdickenmessung wurde ein Schutzrecht beantragt, das sich zurzeit in der Prüfungsphase befindet. Im Erteilungsfall wird eine breite Nutzung angestrebt, sowohl beim Projektpartner (KMU) als auch durch entsprechende Lizenzvergaben

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Untersuchungen und Ergebnisse aus diesem Vorhaben in eine studentische Projektarbeit und eine Dissertationsschrift eingeflossen sind.

5 Fazit

Mit den in diesem Projekt gewonnenen Ergebnissen konnte erfolgreich die Eignung von SAW-Sensoren zur Eisdetektion und sogar zur Messung von Eisschichtdicken erfolgreich nachgewiesen werden. Es wurde herausgearbeitet, welche Chipdesigns vorteilhaft für die Installation an Rotorblättern von Windenergieanlagen und welche Maßnahmen zum Schutz

der empfindlichen Bauelemente am wirkungsvollsten sind. Die Untersuchungen zur Funkabfrage von kommerziell verfügbaren sowie aufgabenspezifisch angepassten und selbstgefertigten SAW-Bauelementen, sowohl auf der Gondel als auch im Bereich der Rotorblattspitze, zeigen die prinzipielle Eignung von SAW-Sensorsystemen im industriellen Umfeld von Windenergieanlagen.

Die Entwicklung und Herstellung eines Demonstratorsystems zur Erprobung der Eisdetektion und Eisschichtdickenmessung am Rotorblatt im Betrieb der Windenergieanlage konnte im Rahmen der Projektlaufzeit noch nicht fertiggestellt werden. Die Herstellung eines Demonstratorsystems zur Erreichung des Technologiereifegrades TRL 5/6 (Versuchsaufbau und Demonstrator in Einsatzumgebung) erfordert noch die folgenden Arbeiten:

- Packaging des gesamten Sensors unter Berücksichtigung des Schutzes der interdigitalen Wandlerstruktur auf dem SAW-Bauelement vor äußeren Einflüssen
- Anpassung des SAW-Bauelements an einen zur Funkabfrage mit Standard-Antennen und -Lesegeräten geeigneten Frequenzbereich (ISM-Band)
- Entwicklung von Lesegeräten, die optimal an den Anwendungsfall angepasst sind und eine höhere Abfragerate ermöglichen (nicht Teil dieses Vorhabens)

Die erzielten Ergebnisse und Aussichten empfehlen eine Fortführung der Forschungsaktivitäten und Übertragung dieser Technologie in die Praxis. Das ökonomische und ökologische Potenzial, welches mit der Weiterführung und Realisierung des angestrebten SAW-Sensorsystems für Rotorblätter von Windenergieanlagen erreicht werden soll, wird von uns und dem industriellen Projektpartner cp.max, sowie dem im Rahmen des Projekts aufgebauten Experten-Netzwerk als vielversprechend und hoch eingeschätzt. Aus diesem Grund wird angestrebt den Technologiereifegrad im Rahmen von Folgevorhaben auf 5-6 zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, „Erneuerbare Energien in Deutschland. Das Wichtigste im Jahr 2023 auf einen Blick,“ 2024. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/erneuerbare-energien-in-deutschland-2023_auf-einen-blick_v2.pdf. [Zugriff am 29 Januar 2025].
- [2] S. Dierer, R. Oechslin und R. Cattin, „Wind turbines in icing conditions: performance and prediction,“ *Adv. Sci. Res.*, Bd. 6, pp. 245-250, 2011.
- [3] J. M. Pinar Pérez, F. P. García Márquez und D. Ruiz-Hernández, „Economic viability analysis for icing blades detection in wind turbines,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 135, 2016.
- [4] M. Aslam, H. Zhang, V. Sreejith, M. Naghdi and S. Ju, "Advances in the surface acoustic wave sensors for industrial applications: Potentials, challenges, and future directions: A review," *Measurement*, vol. 222, 2023.
- [5] P. Schulmeyer, M. Weihnacht and H. Schmidt, "A Dual-Mode Surface Acoustic Wave Delay Line for the Detection of Ice on 64°-Rotated Y-Cut Lithium Niobate," *Sensors*, vol. 24, no. 7, 2024.
- [6] R. Steindl, A. Pohl and F. Seifert, "Impedance loaded SAW sensors offer a wide range of measurement opportunities," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 12, pp. 2625-2629, 2002.
- [7] P. Schulmeyer und H. Schmidt, „Oberflächenwellensensoren zur Überwachung von Eisbildung an Rotorblättern von Windenergieanlagen,“ in *16. Dresdner Sensor Symposium*, Dresden, 2022.
- [8] P. Schulmeyer and H. Schmidt, "Electroacoustic Ice Detection Using Surface Acoustic Wave Devices," in *Sensor and Measurement Systems International*, Nürnberg, 2023.
- [9] Acoustofluidics, "Award Winners," 2024. [Online]. Available: https://acoustofluidics.net/home/award_winners.html. [Accessed 29 Januar 2025].

Anhänge

- A1 Konferenzbeitrag: Electroacoustic Ice Detection Using Surface Acoustic Wave Devices
- A2 Publikation: A Dual-Mode Surface Acoustic Wave Delay Line for the Detection of Ice on 64°-Rotated Y-Cut Lithium Niobate
- A3 Posterbeitrag: Towards Love Wave-based in-situ Measurement of Ice Layer Thickness on Wind Turbine Rotor Blades

A1

Konferenzbeitrag auf
Sensor and Measurement Science International
7. – 11. Mai 2023, Nürnberg

Electroacoustic Ice Detection Using Surface Acoustic
Wave Devices

Philipp Schulmeyer und Hagen Schmidt

Electroacoustic Ice Detection Using Surface Acoustic Wave Devices

Philipp Schulmeyer¹, Hagen Schmidt¹

¹ *Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden, p.schulmeyer@ifw-dresden.de*

Summary:

Icing of infrastructure or vehicles can lead to structural failure due to increased loads. In particular aerodynamic structures like wind turbine rotor blades demand for a small, thin, retrofittable and wirelessly working ice detection sensor. This paper shows that surface acoustic wave (SAW) devices, made from piezoelectric single crystals 64° YX- and 128° YX-lithium niobate, allow to directly detect ice loaded surfaces by analysing the acoustic- and capacitive-dominated admittance behaviour of an ice-loaded interdigital transducer.

Keywords: surface acoustic wave sensor, ice detection, lithium niobate, admittance, interdigital transducer

Introduction

Surface acoustic waves (SAW) allow the development of small, lightweight and retrofittable SAW sensors which, as passive components, can be operated and interrogated by radio signal via antennas. A remotely installed interrogation unit transmits an electromagnetic signal, which is received by the sensor's antenna and converted into an acoustic wave in the interdigital transducer (IDT) via interdigitated comb electrodes. This conversion is based on the converse piezoelectric effect. The acoustic wave is reflected or sent back to the interrogation unit as an electromagnetic wave. The analysis of the output and input signal thus allows a statement about ambient conditions like surface loads. While [1] and [2] show the ability to determine liquid wetting and phase transitions from water to ice of a loaded delay line (DL), by changing propagation characteristics of the acoustic wave, this paper focuses on changes in admittance due to a water loaded IDT. A related approach considering water toxicity sensing is shown in [3].

Materials

The SAW devices considered are two-port delay lines (DL) made of piezoelectric substrates 128° YX- and 64° YX-lithium niobate (LiNbO₃) respectively with a thickness of 500 µm. In the following, these will be abbreviated as 128LN and 64LN. The IDT's aluminium metallisation and the passivation layer of silicon dioxide (SiO₂) have a thickness of 300 nm and 500 nm. Input and output transducers each consist of 31 finger pairs with a finger width of 30 µm. The aperture is 2 mm and the delay line has a length of 10 mm

(see Fig. 1). All measurements are carried out in a temperature test chamber (Voetsch VT4002).

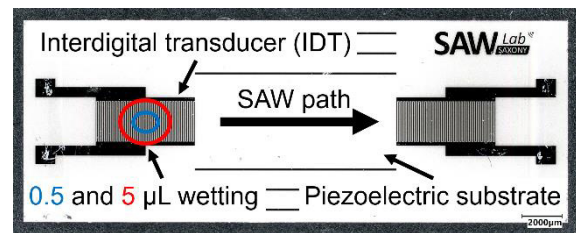


Fig. 1: SAW two-port delay line

The SAW device to be measured is located on a carrier and is connected to a vector network analyser (Agilent E5070B, short: VNA) with two spring contacts per IDT via a printed circuit board matched to 50 Ohm characteristic impedance and SMA connection. The IDT's admittance Y_{11} over frequency is calculated from S-parameters retrieved by VNA.

Measurements

First, the devices are measured at room temperature (20 °C) in dry condition. Then drops of water are placed in the centre of one IDT in 0.5 µL steps using a pipette. Slight deviations of volume due to evaporation are neglected because of a short measuring time. The maximum drop volume for this measurement is 5 µL. Subsequently, these measurements are repeated at -20 °C in the temperature test chamber.

Results

Surface loading on the IDT shows a significant influence on the admittance behaviour for 128LN and 64LN devices. Figures 2 and 3 describe the

normalised conductance and susceptance over frequency. Each curve can be zoned in an acoustically ($0.95 < f/f_s < 1.05$) and capacitively ($0.95 > f/f_s > 1.05$) dominated frequency range (f_s : synchronous frequency, where acoustic wavelength and transducer period match for maximal SAW excitation).

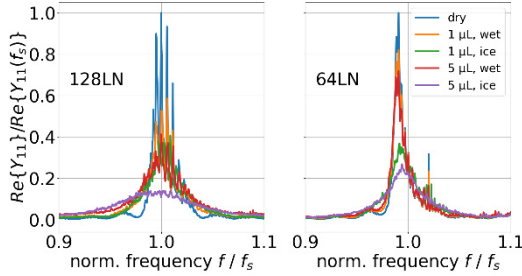


Fig. 2: Normalized conductance over frequency for 128LN (left) and 64LN (right)

IDT loading by liquid and frozen water on 128LN leads to a high decrease in conductance with a further decrease by increasing drop volume (see Fig. 2, left). 64LN device shows a significantly lower decrease in wet state but a higher decrease in conductance for frozen water. An increasing drop volume slightly decreases conductance (see Fig. 2, right). This behaviour can be explained by the different polarisation of the SAWs propagating in 128LN and 64LN. 128LN's Rayleigh waves with a dominant surface-normal amplitude radiate bulk acoustic waves into the drop and get damped. 64LN's shear-horizontal polarised SAW does not couple at the substrate-fluid-interface due to water's low viscosity but gets damped by increasing viscosity due to freezing.

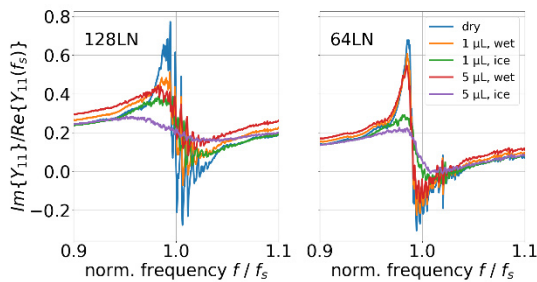


Fig. 3: Normalized susceptance over frequency for 128LN (left) and 64LN (right)

The 128LN device shows a higher susceptance compared to the 64LN device and a more significant capacitive influence in the wet state. In both cases the susceptance increases with frequency (see Fig. 3). The difference in susceptance despite of identical IDTs is caused by 128LN's higher effective dielectric constant ϵ_{eff} . The more significant capacitive influence in wet state and the linear increase of susceptance with frequency can be explained by the dependence to

frequency and the IDT's static transducer capacitance. The susceptance increases with an increase in total effective dielectric constant of the load and frequency.

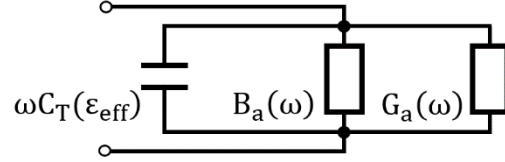


Fig. 4: Equivalent circuit regarding crossed-field model

These relations are described by the crossed-field model [4] which applies due to a parallel order of wave vector and substrate's crystallographic rotation axis [5]. The equations for conductance (1) and susceptance (2) can be derived by using an equivalent circuit (see Fig. 4):

$$G = \text{Re}\{Y\} = G_a(\omega) \quad (1)$$

$$B = \text{Im}\{Y\} = B_a(\omega) + \omega C_T(\epsilon_{eff}) \quad (2)$$

with $\omega = 2\pi f$ and the static transducer capacity $C_T(\epsilon_{eff})$ as well as acoustic-related G_a and B_a .

Conclusion

Both, 128LN and 64LN, devices show capabilities to gain information about a water drop's phase by analysing the loaded IDT's admittance. In the acoustically dominant region 64LN's admittance behaviour allows a differentiation between liquid and frozen water drops in the measuring range. In the frequency range where the capacitive behaviour dominates 128LN's admittance allows for the same differentiation.

References

- [1] N.J. Vellekoop, et al., A Love-wave ice detector, *IEEE Ultrasonics Symposium Proc.* 1, 453-456 (1999); doi: 10.1109/ULTSYM.1999.849438
- [2] W. Wang, et al., Development of a Love Wave Based Device for Sensing Icing Process with Fast Response, *J. Electr. Eng. & Techn.* 15, 1245-1254 (2020), doi: 10.1007/s42835-020-00411-y
- [3] J. Furniss, et al., Love mode surface acoustic wave and impedance sensors for water toxicity sensing, *Environm. Progress & Sustainable Energy* 37, 172-179 (2017); doi: 10.1002/ep.12715
- [4] W. R. Smith, et al., Analysis of Interdigital Surface Wave Transducers by Use of an Equivalent Circuit Model, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 17, no. 11, 856-864 (1969); doi: 10.1109/TMTT.1969.1127075.
- [5] G. Martin, et al., Properties of interdigital transducers in relation to the substrate crystal symmetry, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 43, no. 4, 646-653 (1996); doi: 10.1109/58.503726.

A2

Publikation in
Sensors

A Dual-Mode Surface Acoustic Wave Delay Line for the
Detection of Ice on 64°-Rotated Y-Cut Lithium Niobate

Philipp Schulmeyer, Manfred Weihnacht und Hagen
Schmidt

Article

A Dual-Mode Surface Acoustic Wave Delay Line for the Detection of Ice on 64°-Rotated Y-Cut Lithium Niobate

Philipp Schulmeyer¹, Manfred Weihnacht² and Hagen Schmidt^{1,*} ¹ Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, 01069 Dresden, Germany; p.schulmeyer@ifw-dresden.de² innoXacs, 01744 Dippoldiswalde, Germany; innoxacs@online.de

* Correspondence: h.schmidt@ifw-dresden.de

Abstract: Ice accumulation on infrastructure poses severe safety risks and economic losses, necessitating effective detection and monitoring solutions. This study introduces a novel approach employing surface acoustic wave (SAW) sensors, known for their small size, wireless operation, energy self-sufficiency, and retrofit capability. Utilizing a SAW dual-mode delay line device on a 64°-rotated Y-cut lithium niobate substrate, we demonstrate a solution for combined ice detection and temperature measurement. In addition to the shear-horizontal polarized leaky SAW, our findings reveal an electrically excitable Rayleigh-type wave in the X+90° direction on the same cut. Experimental results in a temperature chamber confirm capability for reliable differentiation between liquid water and ice loading and simultaneous temperature measurements. This research presents a promising advancement in addressing safety concerns and economic losses associated with ice accretion.

Keywords: surface acoustic wave (SAW); SH-LSAW; Rayleigh wave; ice; lithium niobate; piezoelectric; sensor; finite-element method (FEM); non-destructive testing (NDT)



Citation: Schulmeyer, P.; Weihnacht, M.; Schmidt, H. A Dual-Mode Surface Acoustic Wave Delay Line for the Detection of Ice on 64°-Rotated Y-Cut Lithium Niobate. *Sensors* **2024**, *24*, 2292. <https://doi.org/10.3390/s24072292>

Academic Editors: Sergio Castiñeira Ibáñez, Daniel Tarrazó-Serrano and Constanza Rubio Michavila

Received: 29 February 2024

Revised: 23 March 2024

Accepted: 2 April 2024

Published: 4 April 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The accumulation of ice on infrastructure and machines compromises their performance and reliability, leading to safety concerns and economic losses. This applies to various industrial fields concerned with road, rail track and power line surveillance, wind power and aviation as well as with environmental and condition monitoring and instruments providing machine vision for unmanned vehicles. To address these issues, the development of robust and effective ice detection systems is crucial. Such systems not only allow the detection of iced surfaces but also serve as an essential prerequisite for de-icing procedures and provide indicators for the malfunction of anti- and de-icing systems. The purpose of this paper is to show a new non-destructive surface guided wave test approach in combined ice detection and temperature measurement by theoretical and experimental investigations using a surface acoustic wave (SAW) dual-mode delay line. Its significance is underlined by the technology's benefits of small sensor designs, passive and wireless operation, retrofit options and capabilities for mass production [1]. The findings also strongly relate to investigations of liquid characteristics like required for lab-on-a-chip, biomedical or chemical process applications [2].

The concept of a SAW-based sensor for ice detection was first introduced by [3] using a delay line device deploying a shear-horizontal polarized leaky surface acoustic wave (SH-LSAW) on 36°-rotated Y-cut LiTaO₃ (36LT) with propagation the along X direction. It was followed by the first devices deploying a Love wave in a SiO₂ waveguide layer on ST-X+90° quartz [4] and 31°-rotated Y-cut quartz [5], respectively. Today's aspirations in further developing SAW ice sensors still cover Love wave [6] as well as acoustic plate mode devices [7,8]. Moreover, dual-mode delay line devices are proposed by [9], consisting of a ZnO/quartz structure making use of the difference of Rayleigh-type wave's dominating sagittal polarization strongly coupling with liquids for actuation (mixing) and the Love

wave's horizontal polarization weakly coupling with liquids for sensing purposes. Another dual-mode approach consisting of two separate acoustic propagation paths perpendicular to each other is proposed deploying Rayleigh-type waves and SH-SAW on 36LT for the determination of the acoustic properties of liquids [10].

In contrast, the work presented here demonstrates how Rayleigh-type wave and SH-LSAW utilized together in a dual-mode delay line (DM-DL) device on 64°-rotated Y-cut lithium niobate (64° YX LiNbO₃, 64LN) with an electromechanical coupling coefficient approximately twice as large compared to 36LT can be used for ice detection. While recent investigations deploying SH-modes on 64LN deal with protein detection [11], hydrogen sulfide [12] or hydrogen sensing [13] as well as with microfluidic actuators [14] the choice of this substrate here has a different motivation. Due to its strong electromechanical coupling, 64LN supports efficient excitation of different modes providing capabilities for a wireless sensor device able to reliably differentiate between liquid water and ice loading and simultaneously measuring temperature.

2. Modal Analysis

64°-rotated Y-cut LiNbO₃ is well known for its shear-horizontal polarized leaky SAW (SH-LSAW) with propagation along the crystallographic X-axis. A modal analysis is performed to find electrically excitable acoustic surface modes exhibiting a dominant polarization within the sagittal plane spanned by the propagation direction and the surface-normal direction. These can be either a Rayleigh-type wave (RW) with pure sagittal polarization or a generalized SAW (GSAW) with a significant sagittal polarization accompanied by a less dominant horizontal component.

Finite-element (FEM) software COMSOL Multiphysics 6.2 is used to perform a modal analysis to search for configurations supporting different modes [15] and, more specifically, where both SH-LSAW and sagittal-polarized wave can be electromechanically excited on the same cut and which directions are beneficial for the excitation of sagittal-polarized wave and of SH-LSAW, respectively. The 3D model (Figure 1) consists of a lithium niobate block of 1 µm in length with 20 mesh elements, exactly one element of 0.3 µm in width and 4 µm in height with 80 elements. The 80 elements have an exponential growth rate where the lowest element is 5 fold the size of the element at the top. This is set to ensure a finer mesh in the surface region. Surface domains facing length and width directions have periodic boundary conditions. The material constants for lithium niobate are chosen according to [16]; see Table A1. Additionally, a perfectly matched layer (PML) domain of 1 µm height and ten elements in global z direction is used at the bottom to suppress ground reflection of bulk components at the lower boundary with fixed constraint. Crystallographic X-axis of lithium niobate corresponds to global x-coordinate and the 64°-rotated Y-cut corresponds to the x-y plane of the model.

An eigenfrequency study with a parametric angular sweep about the global z-axis reveals for a rotation of 0°, the existence of an SH eigenmode (Figure 1b) with a complex eigenfrequency of $f = Re(f) + j \cdot Im(f) = (4695.96 + 4.5361j)$ MHz, where the very small imaginary component indicates the related acoustic damping caused by leakage into bulk acoustic waves (BAW). This eigenmode corresponds to the well-known shear-horizontal polarized leaky wave (SH-LSAW) propagating along the X-axis of 64LN. Considering as wavelength λ the spatial periodicity of 1 µm along the length coordinate as defined by the periodic boundary condition and the real part of complex eigenfrequency f , Equation (1) yields the real part of the complex phase velocity v of the corresponding SH-LSAW mode for free (electrically open) surface, which results in 4695.96 m/s (Figure 2a). This value differs by only 0.084% compared to [14].

$$v = \frac{\lambda}{Re(f)} \quad (1)$$

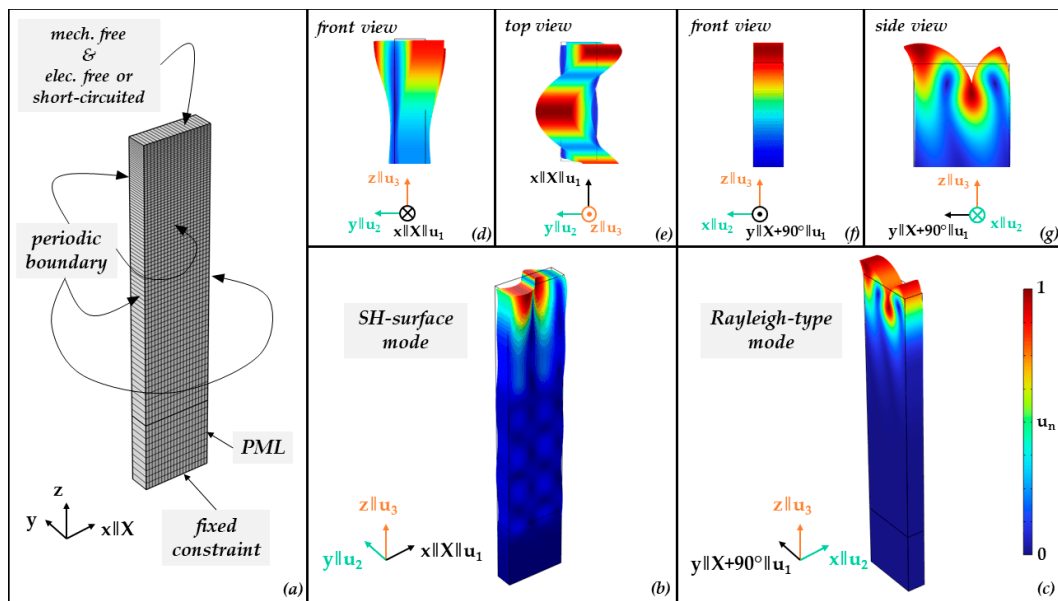


Figure 1. 3D FEM eigenfrequency study: (a) model of 64LN block with mesh and boundary domain definitions, (b) shape of leaky SH-surface mode and (c) shape of Rayleigh-type mode. (d) Front and (e) top view of (b); (f) front and (g) side view of (c); color bar corresponds to normalized displacement magnitude $u_n = \frac{u_{res}}{u_{res,max}}$ with $u_{res} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$ for all color plots.

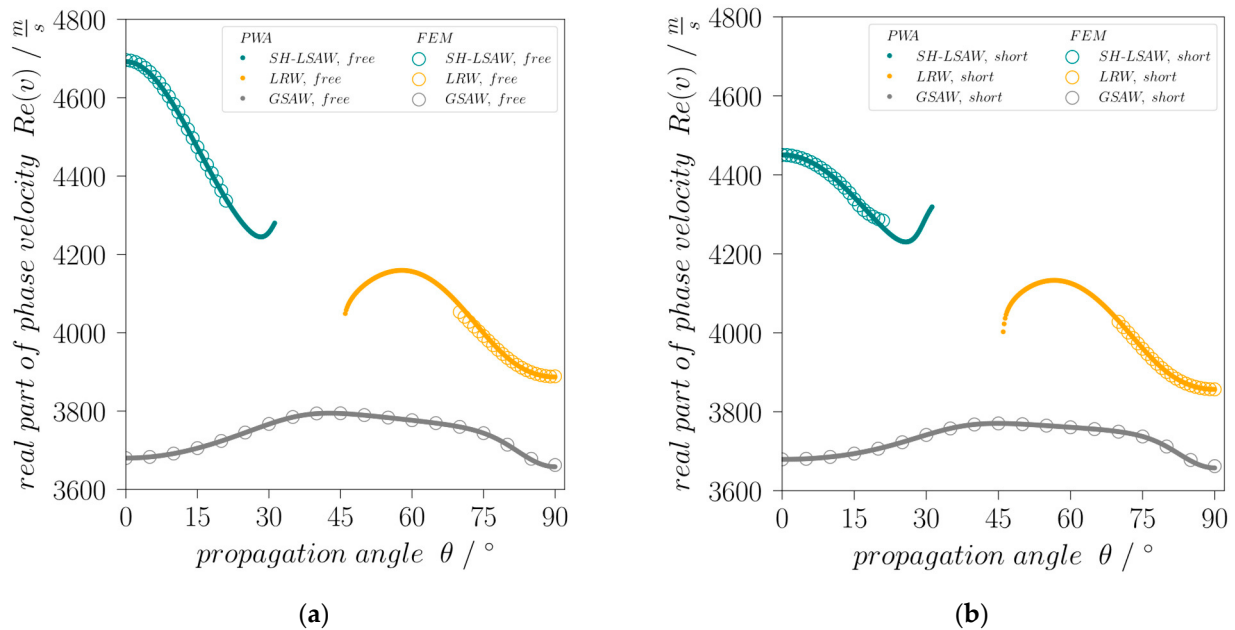


Figure 2. Angular dispersion of phase velocities of SH-LSAW, leaky Rayleigh-type (LRW) wave and generalized SAW (GSAW) branches with (a) free and (b) short-circuited surface.

In addition to the eigenfrequency study, a partial-wave analysis (PWA; see [17] for details) is performed with a custom made software package based on [18] proving the suitability of the FEM model for further investigation.

In case of the finite-element analysis at a rotation angle of 90° , an eigenmode with $f = (3887.71 + 0j)$ MHz indicates a corresponding SAW mainly polarized within the sagittal plane, i.e., a Rayleigh-type wave (Figure 1c). As this mode is non-leaky only for this special direction but leaky for all other angles, it will be referred to in the following as leaky Rayleigh-type wave (LRW) branch. Additionally, there exists a third, generalized surface wave mode (GSAW) branch with a polarization significantly changing its character

over propagation direction and with a phase velocity always lower than SH-LSAW and LRW (Figure 2). To further investigate the possibility to excite the identified SAW modes electrically, the electromechanical coupling coefficient K^2 that is formally defined in terms of the relative phase velocity difference for electrically open and short-circuited surface by Equation (2) [19]

$$K^2 = \frac{2(v_{free} - v_{short})}{v_{free}} \quad (2)$$

is calculated for the modes as a function of the propagation angle. For this, eigenfrequency analysis and PWA are performed for the whole angular range under the same conditions like before but with an electrically short-circuited substrate surface. K^2 for the leaky SH-LSAW at 0° has been calculated to 10.46% which is very close to the value of 11% given in [19]. The leaky Rayleigh-type wave has a K^2 of 1.6% at 90° propagation angle whereas the coupling of the GSAW mode for the angles 0° and 90° is zero (Figure 3a). This means it is practically non-piezoelectric for these directions and can therefore not be excited by electrical fields but by scattering effects [14] making it useless for devices. An interesting effect is also seen in case of the SH-LSAW for angles with high attenuation, where K^2 even reaches negative values when calculated formally using Equation (2) [20]. Note for comparison that commonly used STX-quartz has a K^2 of only 0.12% [19]. Another important feature for the technical deployment of waves is their attenuation, what is especially important for all leaky modes. Figure 3b shows the attenuation coefficient $\alpha_{dB/\lambda}$ calculated from complex phase velocity components using Equation (3).

$$\alpha_{dB/\lambda} = 10 \cdot \lg(e) \cdot 4\pi \frac{\text{Im}(v)}{\text{Re}(v)} \quad (3)$$

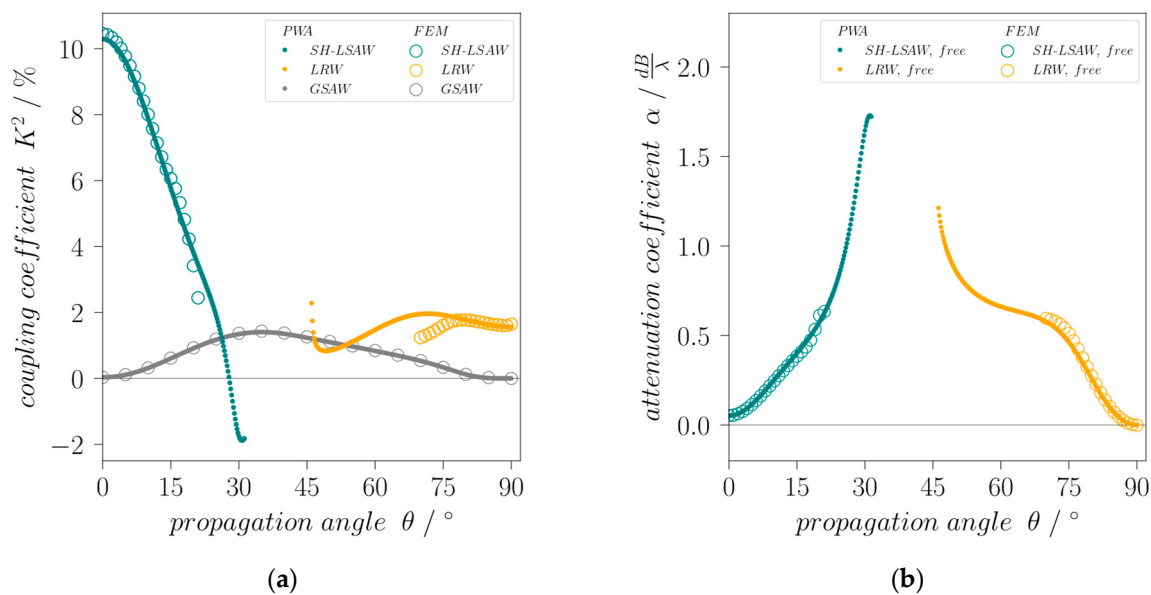


Figure 3. Angular dispersion of (a) electromechanical coupling coefficient K^2 for SH-LSAW, leaky Rayleigh-type wave (LRW) and generalized SAW (GSAW) branches and of (b) attenuation coefficient α for SH-LSAW and LRW for free surface.

For the SH-LSAW propagation along X-axis the attenuation has an acceptable minimum of $0.05 \text{ dB}/\lambda$ whereas for the leaky Rayleigh-type wave (LRW) it is zero for 90° propagation angle θ .

3. Device Characterization

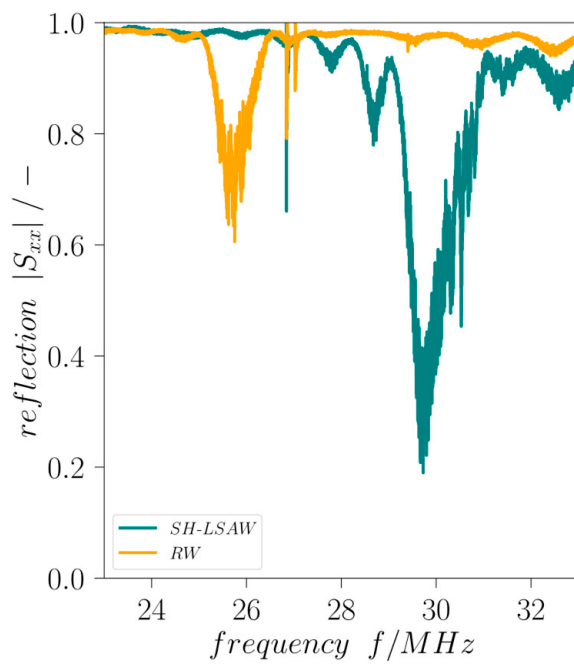
Based on simulation results, dual-mode delay line devices are prepared on 64° -rotated Y-cut lithium niobate with Euler angles (0° , -26° , 0°) for the SH-SAW and (0° , -26° , 90°)

for the attenuation-free Rayleigh wave (RW) as an exceptional case of the LRW branch. The single-side polished piezoelectric substrate has a thickness of 500 μm with the electrode metallization with an overall thickness of 300 nm (295 nm Al on 5 nm Ti) on top. The interdigital transducer (IDT) structures are patterned by mask-less photolithography (MLA 100, Heidelberg Instruments, Heidelberg, Germany) using conventional lift-off technique after e-beam evaporation. All four solid finger IDTs (4 ports, 4P) are of identical design, consisting of 33 finger pairs with a finger width and gap of $\lambda/4 = 37.5 \mu\text{m}$ ($\lambda_{\text{SAW}} = 150 \mu\text{m}$) and an aperture of 2 mm. Both delay lines have a length of 50λ face-to-face. To reduce coherent reflections at the device edges these are cut at a 30-degree angle to the transducer orientation and covered with highly viscous photoresist. Generally, the radiation of bulk acoustic waves (BAW) into the depth of the substrate as a result of parasitic SH-BAW excitation in the case of Rayleigh wave IDTs as well as the energy leakage of the SH-LSAW can lead to undesired acoustic interference at the surface due to back-reflection from the substrate rear side. To avoid this, a waffle-weave pattern [14] has been cut into the backside of the substrate to diffuse BAW scattering and thereby minimizing negative effects on the sensor signal.

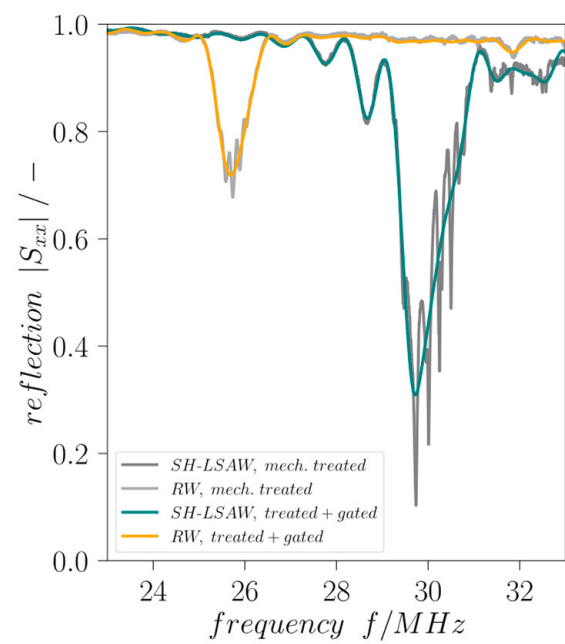
All IDTs are electrically pair-wise characterized in respect to their orientation by S-parameter measurements using a vector network analyzer (VNA, E5070B, Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA). The SAW dual-mode delay line device (DM-DL) is mounted on a custom-made sample holder and electrically connected via gold-plated spring-loaded pins soldered to a printed circuit board (PCB) with conductor-backed coplanar waveguides (CBCPW) of 50 Ω characteristic impedance and SMA connectors. A short-open-load-through (SOLT) calibration is performed at the SMA connector level and the electrical delay caused by the CBCPWs is compensated. For both delay lines, all scattering parameters are measured at the corresponding ports 1, 2 (SH-LSAW) and 3, 4 (RW), i.e., reflection in terms of S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44} and transmission S_{21} , S_{12} , S_{43} , S_{34} , with all determined at room temperature for unloaded substrate surface. Due to the DM-DL structure, the relations $S_{xx} = S_{yy}$ and $S_{yx} = S_{xy}$ are valid for the corresponding ports and are experimentally confirmed. The $|S_{11, \text{SH-LSAW}}|$ and $|S_{33, \text{RW}}|$ minimum frequencies are 29.72 MHz and 25.69 MHz, respectively. While the SH-LSAW IDT reflection coefficient shows a minimum of 0.31, the $|S_{33, \text{RW}}|$ minimum is 0.72 (Figure 4). This is because all IDTs are of identical design and no specific impedance matching was introduced for the Rayleigh wave direction.

Mechanical treatment is applied to the DM-DL devices in order to reduce influences of parasitic BAW contributions as well as distortions caused by edge-reflected surface wave components. Comprising a waffle-weave pattern cut into the chip backside and applying photoresist at the edge-facing end of all IDTs this treatment proves to be effective as the curves of reflection coefficients $|S_{xx}|$ and transmission coefficients $|S_{yx}|$ are significantly less distorted (Figures 4 and 5). Moreover, the destructive acoustic interference in the SH-LSAW transmission curve at approximately 30 MHz is also prevented (Figure 5a,b). Further improvement of all S-parameter curves is achieved by signal processing that includes Fourier transformation, application of appropriate gating in the time domain to suppress non-mode-specific contributions and back-transformation into the frequency domain.

The wavefield of an DM-DL device is experimentally investigated by Laser-Doppler-Vibrometry (LDV, UHF-120, Polytec, Waldbronn, Germany) to validate results of the mode simulations. Figure 6a shows measured displacement amplitudes in surface-normal direction (i.e., parallel to global z-axis) for a Rayleigh mode pattern along $y||X+90^\circ$ direction at 25.69 MHz with both IDTs activated to check their correct operation. The maximum displacement of the resultant standing wave pattern reaches $u_{3, \text{max}} = 120 \text{ pm}$. Figure 6b shows displacement amplitudes for the SH-LSAW at 29.72 MHz under the same operation conditions. As expected from modal analysis, the surface-normal displacements ($u_{3, \text{max}} = 37 \text{ pm}$) are much smaller here compared to the Rayleigh mode. Nevertheless, the characteristic standing wave pattern can be clearly identified within the IDT aperture.

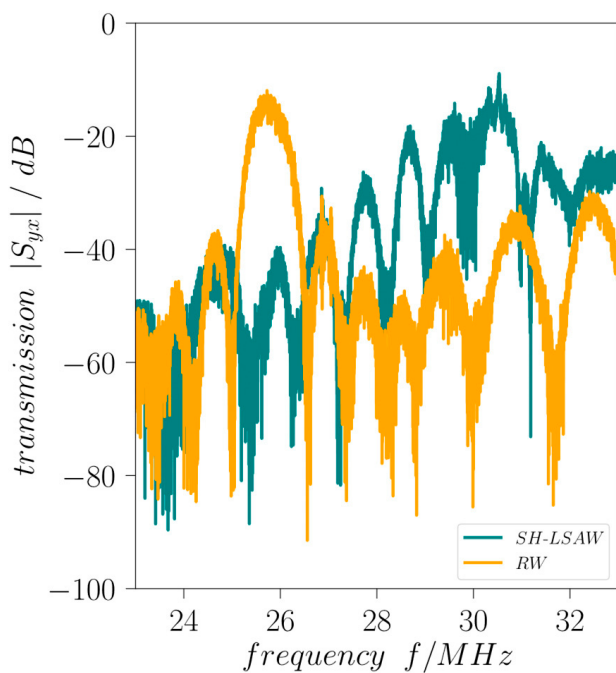


(a)

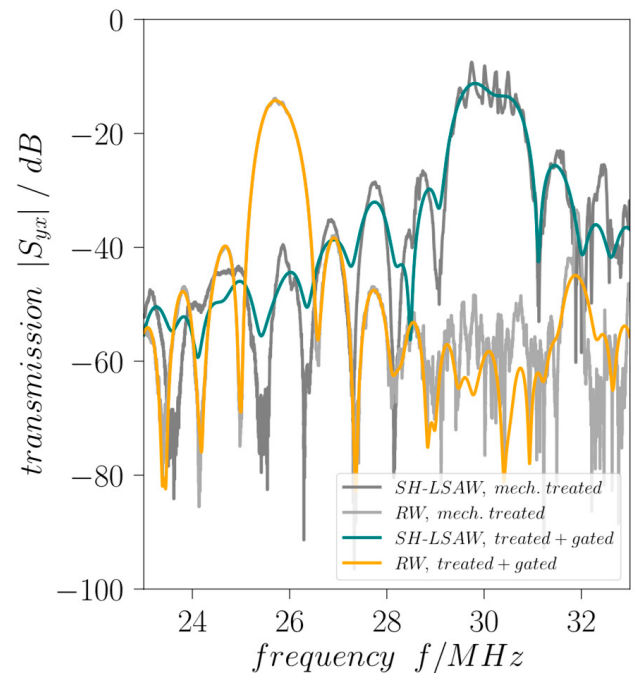


(b)

Figure 4. Scattering parameter $|S_{xx}|$ vs. frequency (a) without and (b) with mechanical treatment and gating.



(a)



(b)

Figure 5. Scattering parameter $|S_{yx}|$ vs. frequency (a) without and (b) with mechanical treatment and gating.

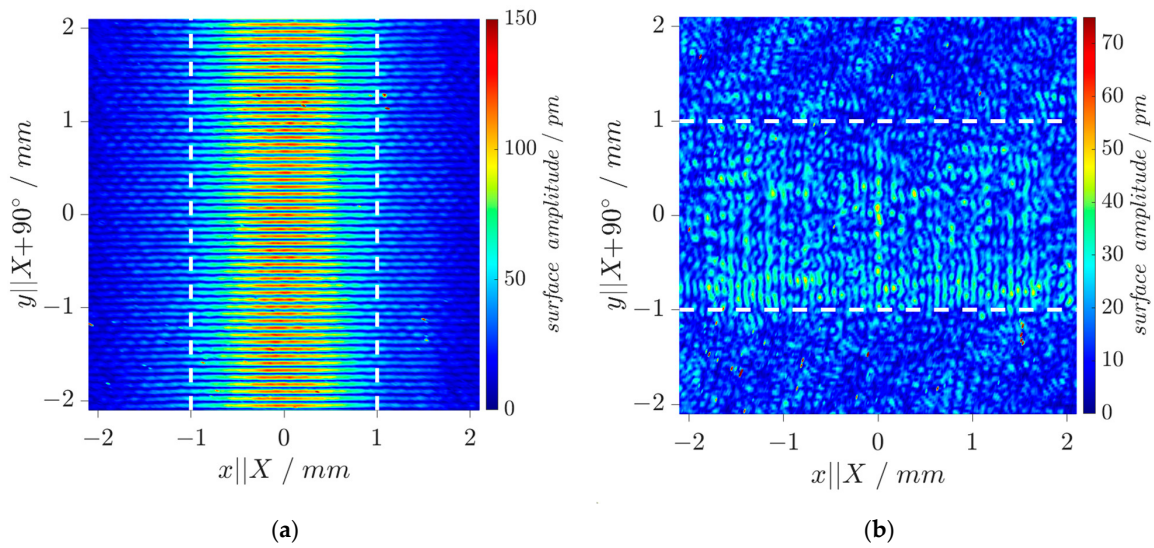


Figure 6. LDV wavefield measurements: Surface displacement amplitudes in surface-normal direction for (a) Rayleigh-type wave at 25.69 MHz and (b) SH-LSAW at 29.72 MHz (device under test without mechanical treatment; IDT aperture shown by white dashed lines).

4. Sensing Experiments

The experimental test setup to characterize the dual-mode delay line behavior with liquid water and ice loading consists of a temperature chamber (VT 4002, Vötsch, Balingen, Germany) and VNA. Temperature behavior of the DM-DL device within the range of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ is measured in the state without surface loading, resulting in temperature coefficients of frequency (TCF) for both modes. A type-K thermocouple (TC) inserted underneath the custom-made sample holder with its tip directly touching the bottom-side of the piezoelectric chip measures the substrate temperature. Substrate and aluminum sample holder are thermally decoupled by a PEEK plate (Figure 7).

The frequency shift of the minimum of reflection $|S_{xx}|$ provides information about the actual device temperature which can be deployed as additional indicator for the presence of icing conditions. Figure 8 shows the according frequency shifts of time-gated reflection curves for SH-LSAW and Rayleigh-type waves (path directions X and $X+90^{\circ}$, respectively). There is a linear temperature behavior obtained for both modes in the investigated range of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ yielding temperature coefficients (TCF) calculated from the shift of minimum $|S_{xx}|$ of $TCF_X = -61.62\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ and $TCF_{X+90^{\circ}} = -82.11\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ w.r.t $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ as the reference.

To investigate the dual-mode device response on ice loading the transmission behavior of both propagation paths is measured. Figure 9 shows the temperature of the DM-DL device measured underneath the piezoelectric substrate during the experiment (grey curve) as well as the regarding time-gated transmission coefficients $|S_{yx}(f_{op})|$ at operating frequency f_{op} defined by the center frequency between the zeros next to the transmission main lobe. While the device is still in dry conditions, without any surface load the temperature chamber is cooled down to $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ until the piezoelectric substrate temperature stabilizes as can be concluded from stable S-parameters. The cooling takes approximately 40 min. After 120 min, the chamber door is opened to apply a drop of tap water (non-deionized, room temperature) with a volume of $40\text{ }\mu\text{L}$ by pipette (Eppendorf Research, Hamburg, Germany) onto the sensitive surface of the sensor device including both wave propagation paths (Figure 7b,c). Considered the device geometry, a $40\text{ }\mu\text{L}$ drop ensures complete wetting of the whole sensitive area. The chamber door is closed immediately after the deposition. Due to the difference between water and the DM-DL substrate temperature, a rise of $7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ quickly reverting to approximately $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ is measured, and is indicated in Figure 9 by a small peak. During the droplet application, comparatively warm and humid air streams into the chamber, leading to a deposition of a thin and weakly adherent ice

layer on all parts with a sub-freezing temperature including the SAW device. Here, a small decrease in transmission for the Rayleigh wave can be seen as the thin ice layer covers the full device including IDTs and attenuates the sagittal polarized Rayleigh wave there. The shear-horizontal polarized wave is not influenced due to the very low adhesion of the ice to the sensitive surface. As the air inside the chamber cools down again quickly and becomes cooler than the device setup the thin ice layer vanishes due to sublimation. The applied liquid water load freezes in an approximate time frame of less than 5 min, resulting in a cone-shaped ice tip (Figure 7d). Underlying this procedure is the assumption that the surface area covered by ice is equal to that formerly covered by the liquid water. Moreover, thermal expansion of the water as well as changes in the substrate surface energy during the freezing process are neglected.

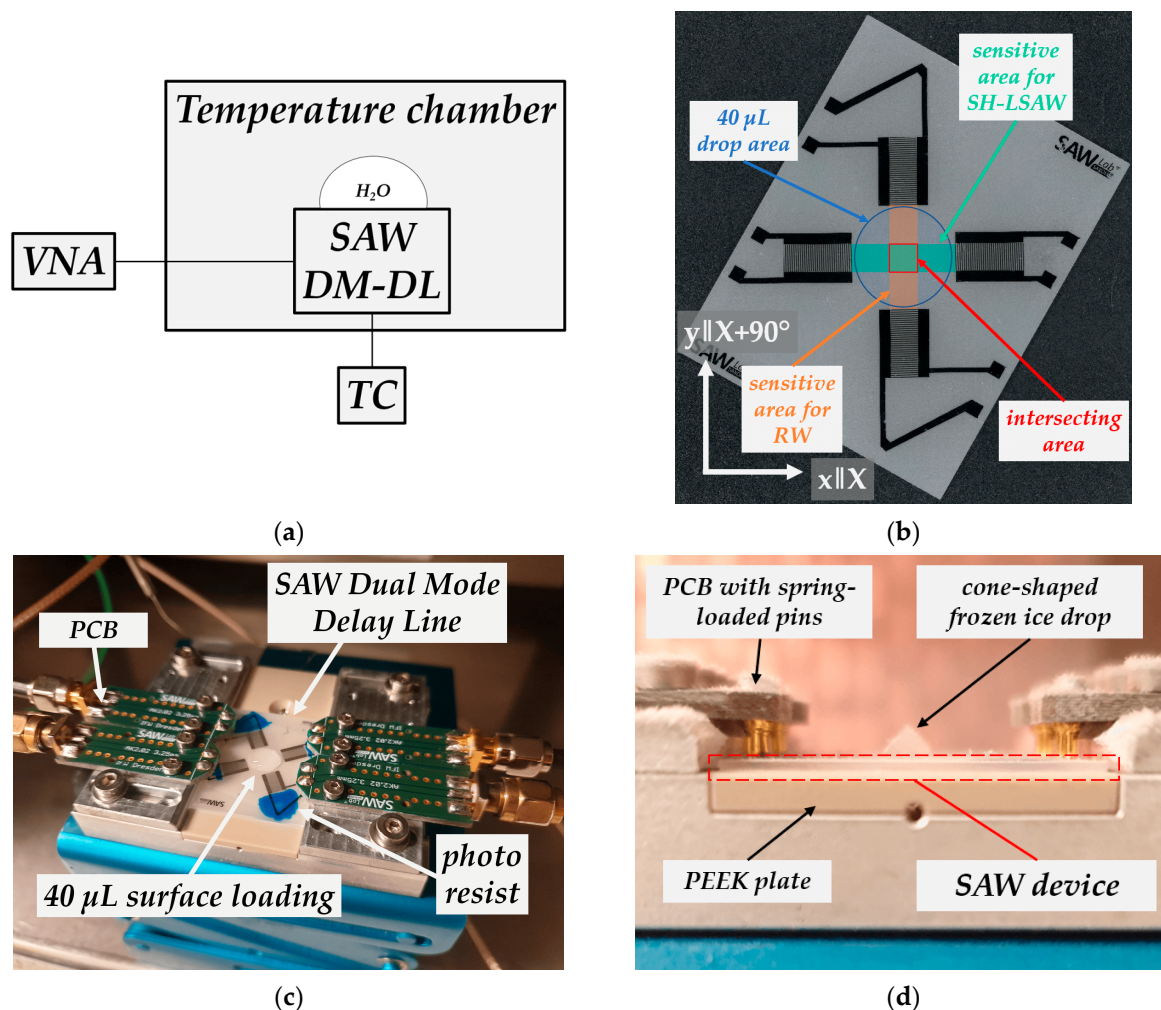


Figure 7. (a) Scheme of experimental setup; (b) dual-mode delay line device with acoustic area and loaded area; (c) device setup inside temperature chamber; (d) frozen drop on device.

A waiting time of 20 min after water drop application is held to ensure stable S-parameter until the heating to room temperature is initialized. The increase in air temperature inside the chamber leads to dew formation on all surfaces which include the DM-DL device transducers, leading to additional attenuation while the water droplet is still mostly frozen. As soon as the device temperature reaches 15 °C, the dew vaporized again clearing the IDTs from any liquid. After the heating period to room temperature (23 °C) of approximately 30 min, the device sensitive area is loaded with melted water only. A final S-parameter measurement is performed after completely removing the liquid water to ensure same transmission values before and after the experiment.

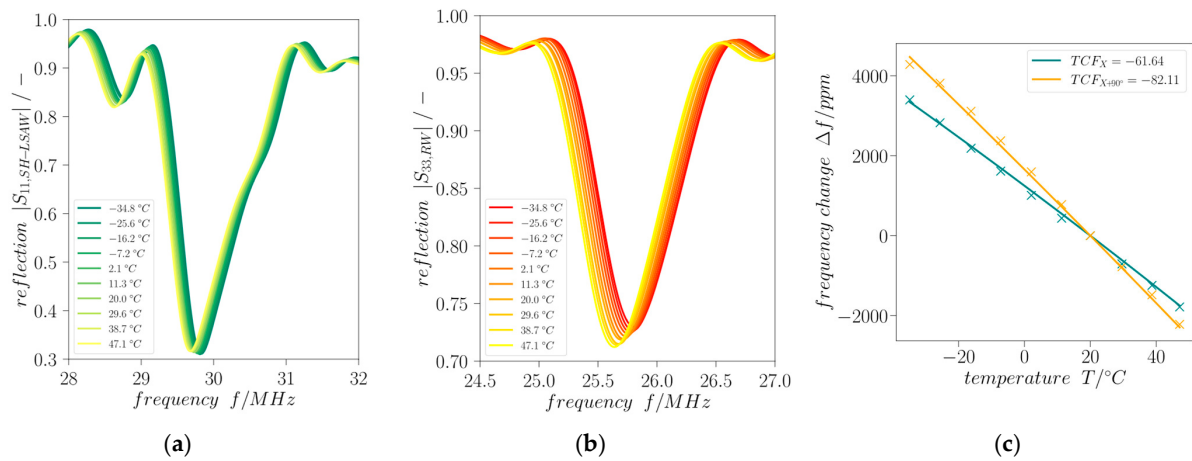


Figure 8. Temperature dependence of time-gated (a) $|S_{11,SH-LSAW}|$ and (b) $|S_{33,RW}|$ within the range -30°C to 50°C . (c) Derived temperature coefficients of frequency (TCF) for X and X+90° direction.

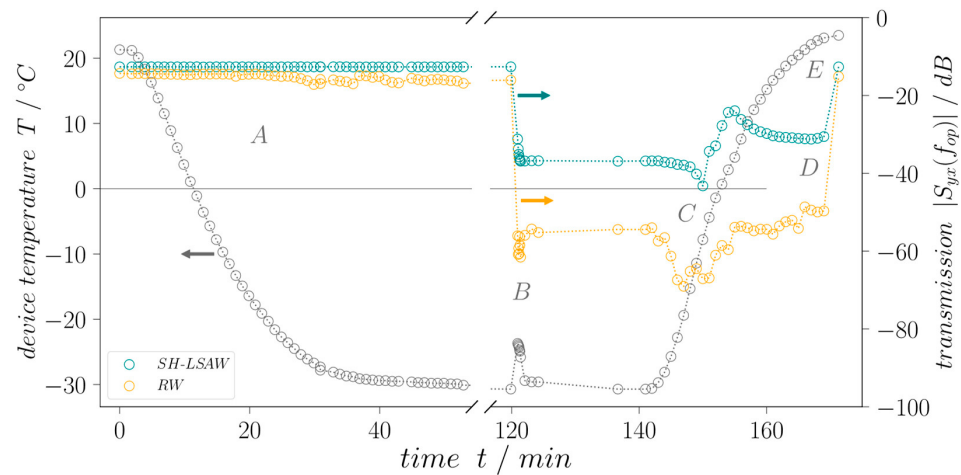


Figure 9. DM-DL device temperature (grey) and time-gated transmission behavior over time for SH-LSAW (green) and RW (yellow) propagation paths. (A): cooling in dry conditions, (B): water drop application and freezing, (C): heating with dew formation and melting, (D): water drop completely liquid, and (E): dry surface. Dotted lines are for eye guidance only.

Figure 10 illustrates the measured transmission curves at the beginning ($t = 0$) of the experiment without surface load (dry), at approximately 137 min with ice loading and at end just before drying the surface with liquid water loading. Both acoustic modes propagating in perpendicular directions on the DM-DL device experience a different degree of attenuation in response to surface loading by liquid water which leads to a decrease in the corresponding transmission curves. Moreover, for both modes freezing of the liquid leads to a further decrease in the transmission. Important to mention, an ideal SAW attenuation is indicated by a nearly constant decrease in transmission over the whole frequency range whereas here also (changing) dielectric properties of the water drop loading will influence the characteristics [21]. As expected, the shear-horizontal polarized wave shows a lower attenuation compared to the Rayleigh-type wave. This is due to the neglectable out-of-plane displacement of an ideal SH-LSAW at the substrate surface, where the Rayleigh wave has its maximum surface-normal particle displacement, leading to strong acoustic leakage by radiation of longitudinal BAW into the surface load for the latter case. Moreover, an SH-LSAW shows only weak shear coupling to liquid loads like water with a low dynamic viscosity of approximately 1 mPas at room temperature [22]. Nevertheless, in the device under test the SH-LSAW experiences acoustic leakage as the real wavefield shows also minor particle displacement in surface-normal direction as revealed by LDV measurement

(Figure 6b). This non-ideal behavior leads to a mechanical coupling to the liquid water load, which results in the decrease in $|S_{21,SH-LSAW}|$. With increasing viscosity during the freezing process also the applied shear forces lead to shear stress at the interface between load and substrate surface what results in a further decrease in the transmission coefficient. The sagittal polarized Rayleigh-type wave with its major particle displacement in surface-normal direction witnesses a high attenuation $|S_{43,RW}|$ under liquid water loading right away which even increases during the freezing process. A quantitative view on the load-dependent increase in attenuation for both modes provides Figure 11. At the DM-DL operating frequencies defined by the center frequency between the zeros next to the transmission main lobe a dramatic increase in almost 36 dB in Rayleigh-mode attenuation is present for water loading, further increasing by 5.5 dB when the water freezes. In contrast, SH-LSAW experiences generally a much lower increase in attenuation due to surface loading with differences of ~ 18 dB for liquid water and ~ 23 dB when it freezes.

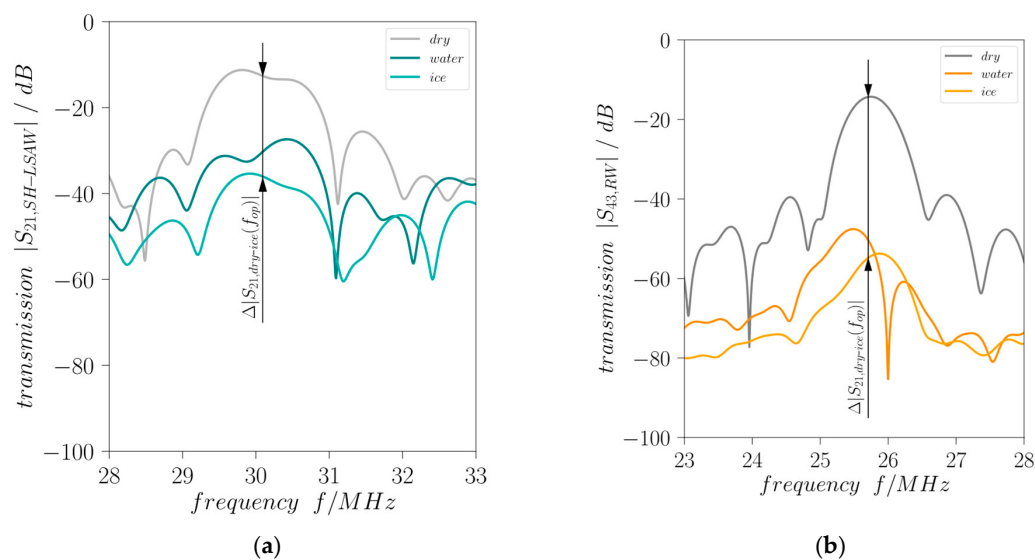


Figure 10. Effect of surface loading on DM-DL transmission characteristics (a) $|S_{21,SH-LSAW}|$ and (b) $|S_{43,RW}|$ (dry: no surface load, water: 40 μ L water with complete wetting (both at 23 $^{\circ}$ C); ice: 40 μ L ice (-30 $^{\circ}$ C); all curves are time-gated).

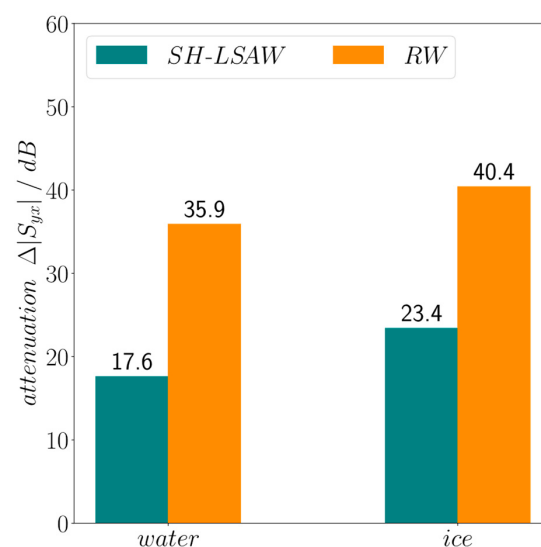


Figure 11. Increase in SAW attenuation $\Delta|S_{21,mode}|$ dependent on mode and surface loading for the DM-DL operating frequencies indicated in Figure 10 w.r.t. unloaded surface as reference.

5. Conclusions

The discussed results show that it is possible to electrically excite Rayleigh-type waves on 64°-rotated Y-cut lithium niobate, additionally to the commonly used shear-horizontal polarized wave, at a propagation angle of 90° relative to the X direction. These findings allow the fabrication of a 4-port dual-mode delay line device. A waffle-weave patterned cut on the device backside to minimize leaking bulk wave interferences as well as the application of photoresist as an acoustic absorber removed noise from the measured S-parameters and eased the evaluations. The 4-port arrangement allowed the determination of reflection coefficients as well as transmission coefficients. While the IDT reflection coefficient $|S_{xx}|$ remain unaffected by surface loading of the sensitive area within the propagation path), it delivers important information on the real device temperature. Additionally, the different change in transmission characteristics $|S_{yx}|$ for both acoustic modes in response on surface loading allow the precise differentiation of liquid water and ice load. In combining both effects, the presented DM-DL device demonstrates its potential for a sensor to simultaneously determine surface load condition and temperature for reliable ice detection on industrial surfaces.

Author Contributions: Conceptualization, P.S. and H.S.; methodology, P.S. and H.S.; investigation, all authors; writing—original draft preparation, all authors; writing—review and editing, all authors. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Supported by funds from Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU grant 38120/01-24/0).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: P.S. and H.S. thank Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) for financial support, A. Büst and D. Bieberstein for device manufacturing, SAWLab and MST Lab at IFW Dresden as well as cp.max Rotortechnik for technical advice.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. Author M.W. was with company innoXacs. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Appendix A

Table A1. Material constants for LiNbO₃ at room temperature (T = 26 °C) from [16].

Elastic Constants in 10 ¹⁰ N/m ²	
c_{11}^E	19.839 ± 0.089
c_{12}^E	5.472 ± 0.097
c_{13}^E	6.513 ± 0.193
c_{14}^E	0.788 ± 0.004
c_{33}^E	22.790 ± 0.324
c_{44}^E	5.965 ± 0.008
Piezoelectric constants in C/m ²	
e_{15}	3.69 ± 0.06
e_{22}	2.42 ± 0.04
e_{31}	0.30 ± 0.08
e_{33}	1.77 ± 0.12
Dielectric constants in ϵ_0	
ϵ_{11}^S	45.6 ± 1.5
ϵ_{33}^S	26.3 ± 1.6
Mass density in kg/m ³	
ρ	4628

References

1. Bruckner, G.; Bardong, J.; Binder, A.; Nicolay, P. SAW Delay Lines as Wireless Sensors for Industrial Applications. In Proceedings of the 8th Conference on Smart Structures and Materials, SMART 2017, Madrid, Spain, 5–8 June 2017.
2. Huang, Y.; Das, P.K.; Bhethanabotla, V.R. Surface acoustic waves in biosensing applications. *Sens. Actuators Rep.* **2021**, *3*, 100041. [\[CrossRef\]](#)
3. Varadan, V.V.; Varadan, V.K.; Bao, X.-Q. IDT sensors for detection of ice on rotorcraft. *Proc. SPIE* **1998**, *3328*, 49–58. [\[CrossRef\]](#)
4. Gangadaran, S.; Varadan, V.V.; Varadan, V.K.; Jose, K.A.; Atashbar, M.Z. Love-wave-based ice sensor. *Proc. Smart Struct. Mater.* **1999**, *3673*, 354279. [\[CrossRef\]](#)
5. Vellekoop, M.J.; Jakoby, B.H.; Bastemeijer, J. A Love-wave ice detector. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* **1999**, *1*, 453–456. [\[CrossRef\]](#)
6. Yin, Y.; Wang, W.; Jia, Y.; Liang, Y. Development of a novel wireless and passive Love wave based ice sensor. In Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, UK, 6–9 October 2019; pp. 2553–2556.
7. Anisimkin, V.; Kolesov, V.; Kuznetsova, A.; Shamsutdinova, E.; Kuznetsova, I. An Analysis of the Water-to-Ice Phase Transition Using Acoustic Plate Waves. *Sensors* **2021**, *21*, 919. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Karimzadeh, A.; Weissker, U.; del Moral, J.; Winkler, A.; Borrás, A.; González-Elipé, A.R.; Jacob, S. Harnessing a Vibroacoustic Mode for Enabling Smart Functions on Surface Acoustic Wave Devices—Application to Icing Monitoring and Deicing. *Adv. Mater. Technol.* **2024**, 2301749. [\[CrossRef\]](#)
9. Nicolay, P.; Sarry, F.; Le Brizoual, L.; Bouvot, L.; Elmazria, O.; Beyssen, D. P4K-4 Novel Layered SAW Structure for Droplet Multidirectional Actuating and Sensing. In Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, New York, NY, USA, 28–31 October 2007.
10. Nomura, T.; Uchiyama, U.; Saitoh, A.; Furukawa, S. Surface acoustic wave liquid sensor using dual mode delay line. In Proceedings of the Eleventh IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Montreux, Switzerland, 24–27 August 1998; pp. 289–292.
11. Jeng, M.-J.; Li, Y.-C.; Sharma, M.; Chen, C.-W.; Tsai, C.-L.; Lin, Y.-H.; Huang, S.-F.; Chang, L.-B.; Lai, C.-S. A Surface Acoustic Wave Sensor with a Microfluidic Channel for Detecting C-Reactive Protein. *Chemosensors* **2021**, *9*, 106. [\[CrossRef\]](#)
12. Asad, M.; Sheikhi, M.H. Surface acoustic wave based H₂S gas sensors incorporating sensitive layers of single wall carbon nanotubes decorated with Cu nanoparticles. *Sens. Actuators B Chem.* **2014**, *198*, 134–141. [\[CrossRef\]](#)
13. Atashbar, M.Z.; Sadek, A.Z.; Wlodarski, W.; Sriram, S.; Bhaskaran, M.; Cheng, C.J.; Kaner, R.B.; Kalantar-zadeh, K. Layered SAW gas sensor based on CSA synthesized polyaniline nanofiber on AlN on 64° YX LiNbO₃ for H₂ sensing. *Sens. Actuators B Chem.* **2009**, *138*, 85–89. [\[CrossRef\]](#)
14. Weser, R.; Darinskii, A.N.; Schmidt, H. Polarization manipulation of surface acoustic waves by metallization patterns on a piezoelectric substrate. *Appl. Phys. Lett.* **2020**, *117*, 143502. [\[CrossRef\]](#)
15. Darinskii, A.N.; Weihnacht, M. Acoustic waves in bounded anisotropic media: Theorems, estimations, and computations. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **2005**, *52*, 702–801. [\[CrossRef\]](#)
16. Kovacs, G.; Anhorn, M.; Engan, H.E.; Visintini, G.; Ruppel, C.C.W. Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃. In Proceedings of the IEEE Symposium on Ultrasonics, Honolulu, HI, USA, 4–7 December 1990; pp. 435–438.
17. Farnell, G.W. Types and properties of surface waves. In *Acoustic Surface Waves*; Topics in Applied Physics; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; New York, NY, USA, 1978; Volume 24.
18. Wobst, R. The generalized eigenvalue problem and acoustic surface wave computations. *Computing* **1987**, *39*, 57–69. [\[CrossRef\]](#)
19. Morgan, D.; Paige, E.G.S. *Surface Acoustic Wave Filters*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2007.
20. Mozhaev, V.G.; Weihnacht, M. Incredible negative values of effective electromechanical coupling coefficient for surface acoustic waves in piezoelectrics. *Ultrasonics* **2000**, *37*, 687–691. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
21. Leidl, A.; Oberlack, I.; Schaber, U.; Mader, B.; Drost, S. Surface acoustic wave devices and applications in liquid sensing. *Smart Mater. Struct.* **1997**, *6*, 680–688. [\[CrossRef\]](#)
22. Haynes, W.M.; Lide, D.R.; Bruno, T.J. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 95th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

A3

Konferenzbeitrag auf
Acoustofluidics Conference
14. – 16. August 2024, Uppsala, Schweden

Towards Love Wave-based in-situ Measurement of ice
Layer Thickness on Wind Turbine Rotor Blades

Philipp Schulmeyer, Manfred Weihnacht und Hagen
Schmidt

Towards Love Wave-based in-situ Measurement of Ice Layer Thickness on Wind Turbine Rotor Blades

Philipp Schulmeyer^{1,*} and Hagen Schmidt¹

¹Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Dresden, Germany

*E-mail: p.schulmeyer@ifw-dresden.de



Introduction

Cold regions are particularly interesting for the construction of wind farms, as higher wind speeds and wind energy densities can be expected, but there is also a higher risk of atmospheric ice formation. Icing on the rotor blades of wind turbines poses a safety risk to people, nature and infrastructure due to ice throw. It also reduces the performance of the turbines and increases the imbalance of the rotor, which leads to additional wear of the mechanical components. Detecting the icing of rotor blades is crucial to minimise the risk of structural failure and to be able to initiate a de-icing procedure. To date, there is no ice detection system that can be considered an industry standard. Surface acoustic wave (SAW) sensors offer promising features [1] that enable an innovative approach to surface icing detection in harsh industrial environments due to their small and thin design, passive and wireless operation, and retrofittability. While recent investigations focus on the development of ice onset sensors using SAW devices [2-4] the following approach aims towards the development of a wireless SAW reflective delay line sensor making use of Love waves on a 41°-rotated Y-cut lithium niobate crystal with an SiO₂-waveguide layer enabling the measurement of ice layer thicknesses. The ice layer thickness measurement is realised by adapting the principles deployed in wireless interrogated SAW identification tags. Reflector gratings serve as ice thickness indicators. Love waves with their shear-horizontal polarised particle displacement confined to the waveguide, hardly get damped by liquid loads like water drops. They mainly experience damping when water on the sensitive surface freezes increasing the surface load's viscosity and shear coupling. The reflection coefficient characteristics S_{11} in time-domain reveal peaks corresponding to reflector gratings placed in known distances from the interdigital transducer. These peaks can be evaluated when in dry or wet surface condition but will be damped by frozen surface loads enabling statements on the degree of ice-coverage of the device. Furthermore, the shift of S_{11} characteristics in frequency-domain provides additional information about the device temperature helping to even predict icing conditions.

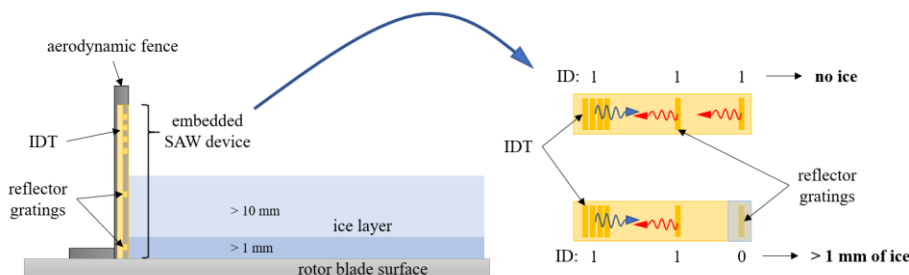


Figure 1: Schematic drawing of ice layer thickness measurement using SAW device on rotor blade surface.

Simulation and experimental results

Finite element analysis performed by using COMSOL Multiphysics 6.2 revealed the existence of Love waves in 41°-rotated Y-cut lithium niobate with a silicon dioxide waveguide layer. The optimal SiO₂ layer height in relation to the SAW wavelength is found to be $h/\lambda = 0.05$. For this waveguide layer height a minimal attenuation coefficient of $\alpha = 0.01$ dB/ λ can be expected for both free and shorted substrate surface with a maximum electromechanical coupling coefficient K^2 of 17.5 %.

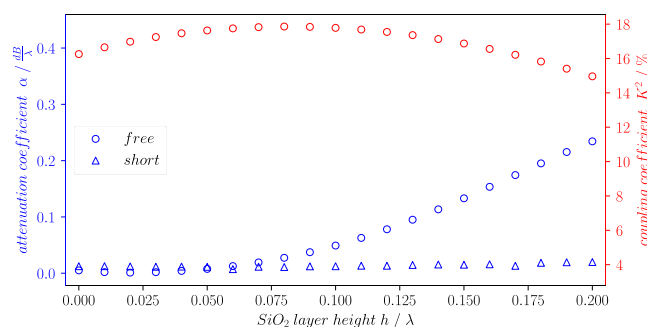


Figure 2: Simulated attenuation coefficient α (blue) for free and shorted substrate surface as well as coupling coefficient K^2 (red) for 41°-rotated Y-cut lithium niobate substrate and SiO₂ waveguide layer.

These simulation results led to the fabrication of a reflective delay line device with an interdigital transducer (IDT) consisting of 31 finger pairs. The solid finger electrode width is 30 μm resulting in an electrode periodicity of 120 μm . The aperture has a width of 2 mm. The single side polished piezoelectric substrate has a thickness of 500 μm and the SiO_2 waveguide layer of 6 μm . The three shorted reflector gratings consist of either three, seven or eleven stripes.

For the experiment the device is mounted onto a chip carrier in a vertical orientation with the IDT and reflector gratings facing downwards. The electrical connection to a vector network analyser (VNA) is realised using gold-plated spring pins soldered to a printed circuit board with conductor-backed coplanar waveguides of 50 Ω characteristic impedance and SMA connectors. This chip carrier is mounted to a height adjustable bracket so that the SAW device can be immersed into a water container underneath. The whole setup is placed inside a temperature chamber to allow the water inside the container to freeze (Figure 3, left).

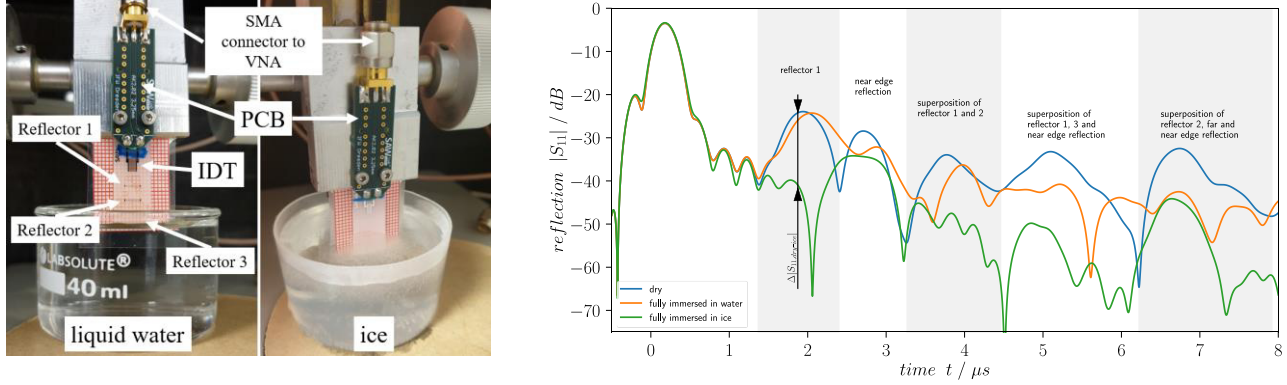


Figure 3: Experimental setup in temperature chamber (left) and reflection characteristics S_{11} in time-domain for device in dry condition, reflector gratings fully immersed in liquid water and in ice (right)

	S_{11} / dB	$\Delta S_{11} = S_{11,\text{dry}} - S_{11,\text{ice}} / \text{dB}$
Dry	-24.2	
Water	-25.9	-1.7
Ice	-41.1	-16.9

Table 1: Attenuation ΔS_{11} at reflector 1 in dry condition and immersed in water and ice

Discussion

The reflection coefficients S_{11} in time-domain revealed from the experiment enable the determination of reflection peaks corresponding to either reflector gratings, substrate edges or reflections due to superpositions of those. The Love wave propagating from the IDT towards reflector 1 and back to the IDT needs about 1.8 μs . In Figure 3 (right) one can see that the immersion of the device up to reflector 1 in liquid water (fully immersed) leads to a minor attenuation of reflection peaks that only correspond to reflector gratings. Reflection peaks corresponding to substrate edges show a comparatively higher attenuation as the reflection properties of the substrate edges change due to a general surface loading. As soon as the water freezes the Love waves are damped and the peaks corresponding to reflector gratings are strongly attenuated. The attenuation of edge reflections does not change dramatically. Table 1 shows exemplarily for reflector 1 the change of attenuation ΔS_{11} which is -1.7 dB when immersed to liquid water and increases significantly to -16.9 dB when immersed to ice.

Conclusion

The discussed results demonstrate that Love waves propagating on 41°-rotated Y-cut lithium niobate with an SiO_2 -waveguide layer enable the distinction between liquid- and ice-covered reflector gratings. This proves the suitability of a reflective delay line device to detect ice layer thicknesses. Ongoing investigations will be presented at the conference to show the device capability for reliable determination of ice layer thickness based on the principles industrially deployed in wireless SAW identification tags.

Acknowledgements

Supported by funds from Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU grant 38120/01-24/0).

References

- [1] M. C. Homola, P. J. Nicklasson, and P. A. Sundsbø, Cold Regions Science and Technology 46, 125 (2006).
- [2] Y. Yin, W. Wang, Y. Jia, and Y. Liang, in IEEE International Ultrasonics Symposium, Glasgow, UK (2019) 2553.
- [3] V. Anisimkin, V. Kolesov, A. Kuznetsova, E. Shamsutdinova, and I. Kuznetsova, Sensors 21 (2021).
- [4] P. Schulmeyer, M. Weihnacht, and H. Schmidt, Sensors 24, 2292 (2024).