

Robuste Befestigung von Ultraschallwandlern: Prüfstrategien für kryogene Einsatzbedingungen

Daniel Pollmann¹, Alexander Backer¹, Klaus Stefan Drese¹

*¹Institut für Sensor und Aktortechnik (ISAT), Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg
Am Hofbräuhaus 1b, 96450 Coburg, Deutschland*

Daniel.Pollmann@hs-coburg.de, Alexander.Backer@hs-coburg.de, Klaus.Drese@hs-coburg.de

Zusammenfassung

Für ultraschallbasierte Sensoren in kryogenen Anwendungen ist eine stabile akustische Ankopplung der piezoelektrischen Wandler an metallische Strukturen entscheidend. Temperaturänderungen zwischen Raumtemperatur und kryogenen Bedingungen führen jedoch zu erheblichen thermomechanischen Spannungen, die das Schwingungs- und Übertragungsverhalten der Wandler beeinflussen können, ohne dass es zu einem vollständigen Versagen der Verbindung kommt. In diesem Beitrag werden zwei komplementäre Messmethoden zur Bewertung der Temperaturänderungsbeständigkeit von Ultraschallankopplungen vorgestellt: die elektrische Impedanzmessung und die temperaturabhängige Ultraschallamplitudenmessung. Der Schwerpunkt liegt auf der Ultraschallamplitudenmessung als funktionsnaher Prüfmethode. Es wird gezeigt, dass Änderungen der Ankopplung anhand charakteristischer Amplitudenverläufe während Abkühl- und Aufwärmzyklen detektiert werden können. Unterschiede in den Materialeigenschaften der Koppelschichten sowie fertigungstechnische Einflüsse spiegeln sich deutlich in frequenz- und temperaturabhängigen Amplitudenverläufen wider. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Vergleiche bei einzelnen Frequenzen nicht ausreichend sind und eine breitbandige Betrachtung erforderlich ist, um belastbare Aussagen über die Stabilität der Ankopplung zu treffen.

Keywords: Kryosensorik, Ultraschallankopplung, elektrische Impedanz, Ultraschallamplitude, Prüfmethoden

Einleitung

Ultraschallbasierte Messverfahren gelten als vielversprechender Ansatz für die Sensorik in kryogenen Anwendungen, etwa zur Durchflussmessung verflüssigter Gase. Ihr Einsatz unter diesen Randbedingungen ist jedoch weiterhin Gegenstand aktueller Forschung, da die tiefen Temperaturen hohe Anforderungen an Wandler, Ankopplung und Signalstabilität stellen [1,2]. Ein wesentlicher Bestandteil solcher Sensoren ist die akustische Ankopplung piezoelektrischer Ultraschallwandler an metallische Strukturen, beispielsweise Edelstahlrohre. Die Zuverlässigkeit der Messung hängt dabei maßgeblich von der Stabilität dieser Ankopplung ab.

Bei Temperaturänderungen von Raumtemperatur bis hin zu kryogenen Bedingungen treten aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien hohe mechanische Spannungen auf. [3] Diese können zu Veränderungen der Kopplungsschicht führen, die sich unmittelbar auf das

Schwingungsverhalten des Wandlers und damit auf die akustische Signalübertragung auswirken. Für die Bewertung der Eignung von Ankoppelverfahren sind daher Messmethoden erforderlich, die solche Änderungen sensitiv und möglichst funktionsnah erfassen.

Ziel dieses Beitrags ist die Vorstellung und Einordnung zweier Messmethoden zur Bewertung der Temperaturänderungsbeständigkeit von Ultraschallankopplungen. Während die elektrische Impedanzmessung einen Überblick über Änderungen des gekoppelten Schwingungsverhaltens liefert, steht die Ultraschallamplitudenmessung während thermischer Zyklen im Fokus als zentrale Prüfmethode mit direktem Bezug zur sensorischen Funktion.

Versuchsaufbau

Für die Entwicklung der Prüfmethoden wurden Prüflinge mit geklebten oder gelöteten Piezokeramiken, wie in Abbildung 1 dargestellt, verwendet.

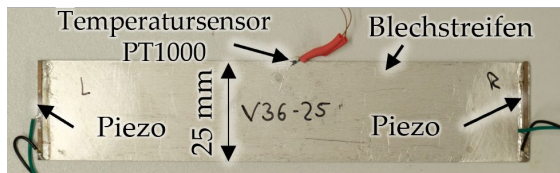


Abb. 1: Aufbau einer 125 mm langen Laufstrecke für Ultraschall-amplitudenmessungen mit 2 Piezos (Sender und Empfänger) und einem Temperatursensor Pt1000 auf einem Edelstahlblech vom Typ 1.4571 mit einer Dicke von 2 mm.

In Abbildung 2 ist die Vorrichtung für die Durchführung der Abkühlung mittels LN_2 dargestellt. Mit der Kranvorrichtung wurden die Prüflinge in der Gasphase über flüssigem Stickstoff (LN_2) auf bis zu -196°C abgekühlt. Vor, während und nach dem Abkühlvorgang wurden die Messungen für die Prüfmethode durchgeführt.

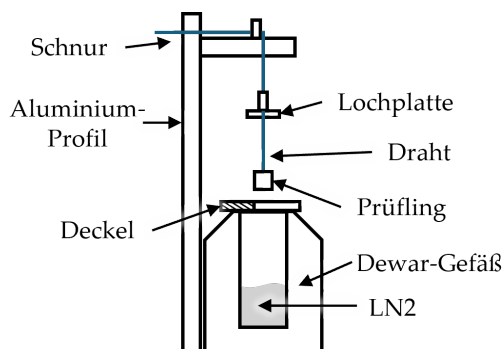


Abb. 2: Versuchsaufbau für Abkühl- und Eintauchversuche mit LN_2

Elektrische Impedanzmessung zur Bewertung der Ankopplung

Die elektrische Impedanz eines piezoelektrischen Ultraschallwandlers ist eng mit dessen mechanischem Schwingungsverhalten gekoppelt [4]. Änderungen der Randbedingungen, insbesondere der akustischen Ankopplung an ein Substrat, führen zu charakteristischen Veränderungen im Impedanzverlauf über der Frequenz.

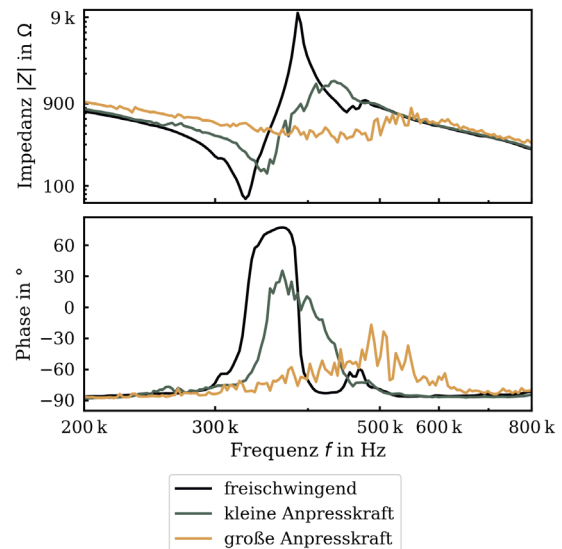


Abb. 3: Bode-Diagramm der Impedanzmessung einer Piezokeramik in freischwingendem und angepresstem Zustand.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Einfluss unterschiedlicher Ankoppelzustände auf den Impedanzverlauf eines Ultraschallwandlers. Eine feste und homogene Ankopplung führt zu einer deutlichen Verschiebung und Dämpfung der Resonanzstrukturen im Vergleich zu einem nur losen oder unvollständig angekoppelten Wandler. Diese Veränderungen betreffen nicht nur einzelne Resonanzfrequenzen, sondern den gesamten betrachteten Frequenzbereich. Damit eignet sich der Impedanzverlauf als empfindlicher Indikator für Änderungen der Ankopplung, insbesondere auf Ebene einzelner Ultraschallwandler.

Einen Überblick über die Auswirkungen thermischer Zyklen auf unterschiedliche Ankoppelverfahren liefert Abbildung 4. Dargestellt sind Impedanzverläufe vor und nach dem Abkühlen auf kryogene Temperaturen für verschiedene herstellungsbedingte Ausprägungen der Ankopplung.

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich Änderungen der Ankopplung nicht in jedem Fall als vollständiges Versagen äußern. Vielmehr treten häufig subtile, aber reproduzierbare Veränderungen der Resonanzlagen, der Resonanzstärken oder der Dämpfung auf. Diese Effekte unterscheiden sich deutlich in Abhängigkeit vom verwendeten Ankoppelverfahren und den damit verbundenen Materialeigenschaften der Koppelschicht. Die Impedanzmessung erlaubt somit eine qualitative Bewertung der Stabilität der Ankopplung über einen größeren Frequenzbereich und eignet sich insbesondere

zur Analyse einzelner Wandler sowie zum Vergleich verschiedener Ankoppelkonzepte.

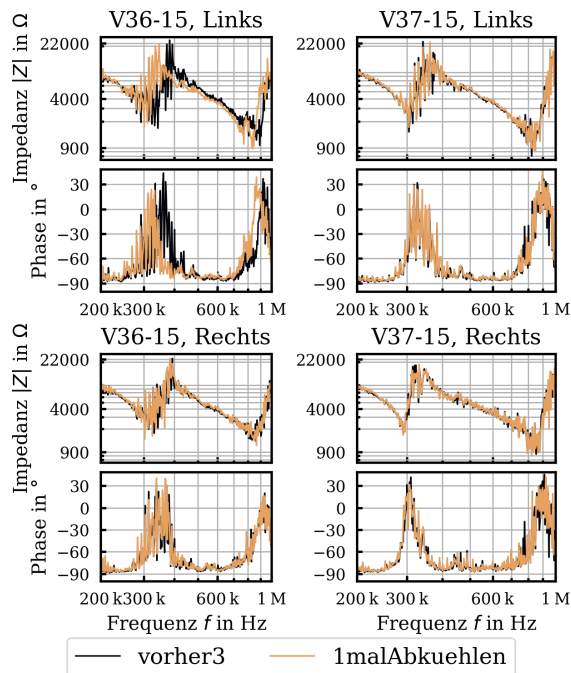


Abb. 4: V36-löten, V37-kleben Bode-Diagramm der elektrischen Impedanzverläufe der Piezokeramiken auf den Laufstreifen V36-15 und V37-15. Die Verläufe wurden vor und nach dem ersten Abkühlen gemessen.

Ultraschallamplitudenmessung als funktionale Prüfmethode

Zur Bewertung der akustischen Übertragung wird die Ultraschallamplitude als zentrales Maß herangezogen. Als Amplitudenkennwert wird $U(t_{A0})$ verwendet, definiert als der Wert der Einhüllenden des empfangenen Ultraschallsignals zum Zeitpunkt t_{A0} . Der Zeitpunkt t_{A0} entspricht der erwarteten Ankunftszeit des Nutzsignals und wird aus der bekannten Laufstrecke und der Schallausbreitung bestimmt.

Die Bestimmung von $U(t_{A0})$ erfolgt, indem das empfangene zeitabhängige Signal zunächst bandpassgefiltert und anschließend mittels Hüllkurvenbildung ausgewertet wird. Abbildung 5 zeigt die so bestimmten Auswertepunkte einiger Beispielsignale bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen. Der so gewonnene Amplitudenwert stellt ein robustes Maß für die akustische Kopplung zwischen Sender und Empfänger dar und ist direkt mit der Effizienz der Schallübertragung verknüpft.

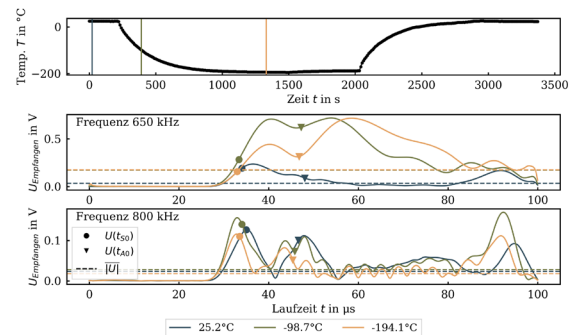


Abb. 5: Hüllkurven der Empfangssignale bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen, sowie Darstellung der Maße für die Amplitude

Ein Beispiel für einen auffälligen Amplitudenverlauf während eines thermischen Zyklus ist in Abbildung 6 dargestellt. Beim Abkühlen und anschließenden Aufwärmen zeigt sich ein deutlicher Sprung im Amplitudenverlauf. Zudem unterscheiden sich die Amplitudenwerte vor und nach dem thermischen Zyklus signifikant. Beide Beobachtungen sprechen für eine bleibende Änderung der Ankopplung.

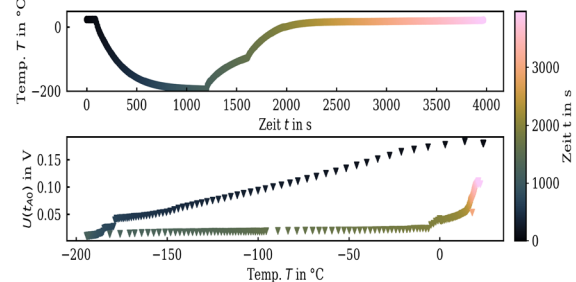


Abb. 6: Amplitudenverlauf in Abhängigkeit der Temperatur von V36-15-löten 1. mal Abkühlen bei 380kHz

Wesentlich ist, dass solche Änderungen auch dann erkannt werden können, wenn die Amplitude vor und nach dem Zyklus auf ähnlichem Niveau liegt. Ein sprunghafter Verlauf während des Abkühlens oder Aufwärmens weist auf eine Änderung der Schwingungs- und Kopplungseigenschaften hin, die allein durch einen Vorher-Nachher-Vergleich nicht zuverlässig erfasst werden. Die Betrachtung des vollständigen Temperaturverlaufs liefert daher einen entscheidenden Erkenntnisgewinn.

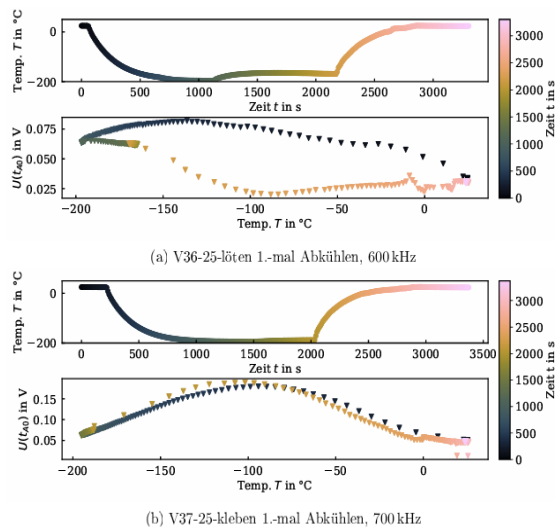


Abb. 7: Vergleich der Amplitudenverläufe von V36-25-löten und V37-25-kleben beim Abkühlen und Aufwärmen.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Amplitudenverläufe für unterschiedliche Ankoppelverfahren während eines thermischen Zyklus. Dabei wird deutlich, dass sich geklebte und gelötete Ankopplungen in ihrem temperaturabhängigen Verhalten unterscheiden. Diese Unterschiede äußern sich in der Form der Amplitudenverläufe des Abkühlens und Aufwärmens, die bei den gelöteten Verbindungen voneinander abweichen.

Die beobachteten Effekte lassen sich auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Koppelschichten zurückführen, etwa auf deren Elastizität, Dämpfung und Fähigkeit, thermisch induzierte Relativdehnungen auszugleichen. Die Ultraschallamplitudenmessung ermöglicht es somit, materialbedingte Unterschiede der Ankopplung direkt sichtbar zu machen.

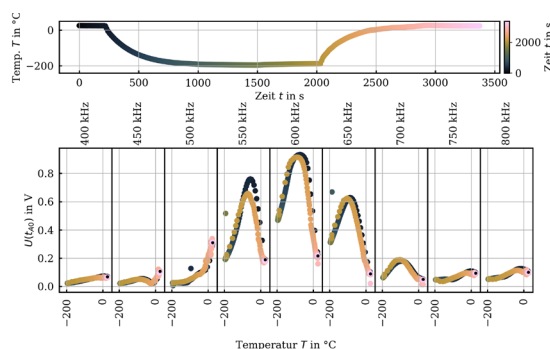


Abb. 8: Gesamtübersicht der Amplitudenverläufe in Abhängigkeit der Temperatur bei den gemessenen Frequenzen von V37-25-kleben.

Der Gesamtzusammenhang zwischen Frequenz, Temperatur und Ankoppelverfahren ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Amplitudenverläufe stark frequenzabhängig sind. Ursache hierfür sind Änderungen der Schwingeeigenschaften des Gesamtsystems aus Wandler, Koppelschicht und Substrat, die sowohl durch die Materialeigenschaften als auch durch Fertigungstoleranzen beeinflusst werden. Diese ausgeprägte Frequenzabhängigkeit hat eine wichtige methodische Konsequenz: Vergleiche von Ultraschallamplituden bei nur einer einzelnen Frequenz sind nicht aussagekräftig. Eine belastbare Bewertung der Temperaturänderungsbeständigkeit von Ankoppelverfahren erfordert vielmehr die Betrachtung eines breiten Frequenzbereichs. Erst dadurch lassen sich systematische Unterschiede zwischen verschiedenen Ankoppelkonzepten identifizieren und zufällige Effekte durch lokale Resonanzverschiebungen erkennen.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ultraschallamplitudenmessung eine besonders geeignete Prüfmethode zur Bewertung der Temperaturänderungsbeständigkeit von Ultraschallankopplungen darstellt. Sie erlaubt die Detektion von Änderungen der Ankopplung sowohl durch Sprünge im Amplitudenverlauf während thermischer Zyklen als auch durch Unterschiede zwischen Zuständen vor und nach der Beanspruchung. Dabei ist hervorzuheben, dass selbst dann Änderungen erkannt werden können, wenn die Amplitudenwerte vor und nach dem Zyklus ähnlich sind.

Die elektrische Impedanzmessung ergänzt diesen Ansatz sinnvoll, indem sie einen Überblick über Änderungen des gekoppelten Schwingungsverhaltens über einen großen Frequenzbereich liefert. Sie eignet sich insbesondere zur Analyse einzelner Ultraschallwandler und zur qualitativen Bewertung unterschiedlicher Ankoppelzustände. Im Vergleich zur Amplitudenmessung ist sie jedoch weniger direkt an die spätere Sensorfunktion gekoppelt. Insgesamt zeigt sich, dass erst die Kombination beider Messmethoden eine umfassende Bewertung der Ankoppelstabilität ermöglicht. Während die Impedanzmessung strukturelle Änderungen des Wandlerverhaltens sichtbar macht, liefert die Amplitudenmessung den funktionsnahen Nachweis ihrer Relevanz für die akustische Signalübertragung.

Fazit

In diesem Beitrag wurden Messmethoden zur Bewertung der Temperaturänderungsbeständigkeit von piezoelektrischen Ultraschallankopplungen unter kryogenen Bedingungen vorgestellt. Der Schwerpunkt lag auf der Ultraschallamplitudenmessung als funktionsnaher Prüfmethode. Es konnte gezeigt werden, dass Änderungen der Ankopplung anhand charakteristischer Amplitudenverläufe während thermischer Zyklen zuverlässig detektiert werden können. Unterschiede in den Materialeigenschaften der Koppelschichten sowie fertigungstechnische Einflüsse spiegeln sich deutlich in der Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der Amplituden wider.

Die Ergebnisse unterstreichen, dass eine breitbandige Betrachtung über Frequenz und Temperatur notwendig ist, um belastbare Aussagen über die Stabilität von Ankoppelverfahren zu treffen. Die vorgestellten Methoden bieten damit ein geeignetes Instrumentarium für die Entwicklung und Qualifikation robuster Ultraschallsensoren für kryogene Anwendungen.

Literaturnachweis

- [1] ISAT - ISAT Institut für Sensor- und Aktortechnik. HydrAmess: Akustische Sensorik zur Durchflussmessung von flüssigem Wasserstoff und anderen Energieträgern. url: <https://www.isat-coburg.de/projekt/hydrames-akustische-sensorik-zur-durchflussmessung-von-fluessigem-wasserstoff-und-anderen-fluessigenergetraegern/> (besucht am 24.08.2025).
- [2] Daniel A. Kiefer. Elastodynamic quasi-guided waves for transit-time ultrasonic flow metering. ISBN: 9783961475506. Diss. Erlangen-Nürnberg: Friedrich Alexander-Universität (FAU), 2022. url: <https://open.fau.de/handle/openfau/19767> (besucht am 25.08.2025).
- [3] Jan Dolkemeyer und Peter Loosen. Aufbau- und Löttechniken für die Montage von Festkörperlasern. Number: RWTH-CONV-124363. Diss. Publikationsserver der RWTHAachenUniversity, 2012. url: <https://publications.rwth-aachen.de/record/62868> (besucht am 08.10.2024)
- [4] Daniel Schmidt. Modenselektive Übertragung von Lambwellen in Faserverbundstrukturen. ISSN: 1434-8454 Publisher: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Berichtreihe. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braun schweig, 2014. url: <https://elib.dlr.de/90214/> (besucht am 15.07.2025)