

EISERKENNUNG DURCH KÖRPERSCHALLWELLEN

C. Mendig¹, M. Endres², Hannah Sommerwerk², J. Riemenschneider¹, H.P. Monner¹,
¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig,
²Technische Universität Braunschweig, 38106 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Im Projekt Supercooled Large Droplet Icing (SuLaDI) wird durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Technische Universität Braunschweig auf dem Gebiet der Flugzeugvereisung geforscht. Der Fokus liegt hierbei auf der Vereisung durch große, unterkühlte Wassertropfen.

Innerhalb des Projekts werden neue Konzepte zur Eiserkennung untersucht. Vorteil der neuen Konzepte gegenüber den bestehenden Systemen sind die Detektion der Vereisung am Ort der Vereisung, die Erweiterung des Erfassungsbereich über die sensoreigene Fläche hinaus und die strukturkonforme Einbindung bei gleichzeitig ausbleibender Änderung der Strömungsbedingungen am Tragflügel und einer Widerstandserhöhung durch den Sensor.

Die Veröffentlichung stellt Möglichkeiten der Eiserkennung durch den Einsatz mechanischer Wellen vor. Grundlage hierfür sind der Einsatz von Lambwellen und die Anregung eines Gleitsinus. Es werden Versuche an flächigen, als auch gekrümmten Strukturen durchgeführt. Diese werden in einer Tiefkühlkammer durch aufgefrorenes Wasser, als auch in einem Eiswindkanal durch unterkühlte Wassertropfen vereist. Die zu überwachenden Strukturen sind dabei eine CFK-Platte und zwei Flügelvorderkanten eines NACA 0012-Profiles. Die Einflussparameter Temperatur und die Zyklenzahl (Anzahl der Perioden) bei der Anregung werden zunächst betrachtet und anhand von Messungen bewertet. Anhand der Versuche wird der Einfluss von Eisschichten mit variierenden Dicken auf die einfach zu bestimmenden Parameter Mittelwert der Absolutwerte, Maximum der Absolutwerte und die Laufzeit dargestellt.

1. EINLEITUNG

Flugzeuge sind aus Gründen der Sicherheit mit Systemen zur Vermeidung von Eisbildung (Anti-Icing facility) oder zur Entfernung (De-Icing facility) eines vorhandenen Eisansatzes ausgestattet. Zu den am häufigsten eingesetzten Systemen zählen Systeme, an denen sich ein Eisansatz bildet und die den Zustand der eigenen Vereisung dem Piloten melden (z.B. UTC Aerospace Systems ice detector, TAMDAR) oder solche, die vom Piloten per Sichtkontrolle auf Eisansatz hin kontrolliert werden können (z.B. Visual Ice Indicator). Nachteile der Systeme sind, neben der Erzeugung von zusätzlichem aerodynamischen Widerstand, die Unkenntnis über das Vorhandensein eines Eisansatzes an relevanten Flugzeugstrukturen. Eine beginnende Vereisung bleibt evtl. unbemerkt. Ein effektiver Einsatz eines bspw. thermischen und somit kostenintensiven Enteisungssystems kann hiermit nicht kosteneffizient ausgeführt werden. Durch die direkte Messung der Vereisung an der zu überwachenden Struktur kann ein Eisansatz erkannt und nach Aktivierung des verwendeten Enteisungssystems die erfolgreiche Enteisung dem Piloten gemeldet werden. Wird die Messung von einem innenliegenden Sensor durchgeführt, entfällt die zusätzliche Erhöhung des aerodynamischen Widerstandes. Lassen sich die Systeme nicht nur zur punktuellen, sondern zur flächigen Messung einsetzen, wird der Informationsgewinn zusätzlich erhöht und eine gezieltere Aktivierung des Enteisungssystems ist durch die Segmentierung von Eiserkennung und Enteisung in mehrere überwachte Bereiche möglich. Bedenkt man die Dauerfestigkeit zyklisch beanspruchter Materialien, so kann bei Anwendung von mechanischen Enteisungssystemen (z.B. Electro Impuls Deicing System (EIDI), Low Frequency Deicing System (LFDS) [1]) deren Lebensdauer erhöht werden. Weiterhin entfällt die

Bohrung, durch welche konventionelle Systeme, die sich unterhalb der Tragfläche befinden, montiert werden. In der Gesamtheit bietet ein innenliegender Sensor mit direkter Messung am Ort der Vereisung und der Erfassung des Eisansatzes über eine große Fläche im Vergleich zu konventionellen Eiserkennungssystemen daher eine erhöhte Sicherheit und die Möglichkeit des kostenreduzierten Einsatzes von thermischen Enteisungssystemen bei gleichzeitig reduzierten Betriebskosten des Sensors (die Betriebskosten in Folge der Masse des Eiserkennungssystems sind gesondert zu betrachten).

Eine Möglichkeit zur Realisierung der genannten Strukturüberwachung hinsichtlich eines Eisansatzes eines solchen Eiserkennungssystems, bildet die Verwendung von Ultraschallwellen. Neben der Möglichkeit der flächigen Überwachung dem Vorteil der Erfassung von Eisansatz über eine große Fläche, bietet sie die Möglichkeit der Implementierung innerhalb der zu überwachenden Struktur (z.B. im Flügelkasten). Der Einsatz von Ultraschallwellen zur Eiserkennung wurde in einigen Veröffentlichungen bereits untersucht [2][3][4][5].

In [2] wird ein Modell für die Berechnung von Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten der einzelnen Moden bei Ausbildung von Lambwellen präsentiert. Dieses gilt für einen zweischichtigen Aufbau, welcher in der Veröffentlichung aus einer 2 mm dicken Aluminiumplatte und einer darauf haftenden, homogenen Eisschicht besteht. Das Modell liefert für die charakteristischen Eisarten Klar-, Rau- und Mischeis, anhand der aufgestellten Dispersionsdiagramme und der Abhängigkeit der Lambwellenfrequenz von der Eisdicke, Informationen zur Erkennung der Eisarten und zur Bestimmung der Eisdicke. Hierfür werden mehrere Methoden vorgestellt und diskutiert. Eine experimentelle Validierung findet für

eine der vorgestellten Methoden zur Eisdickenbestimmung statt, wobei eine sehr gute Übereinstimmungen zwischen der gemessenen und der berechneten Gruppengeschwindigkeit der ersten beiden Moden über der Eisdicke erzielt wird. Die Versuche in dieser Arbeit untersuchen dabei die Änderung der Gruppengeschwindigkeit und der Frequenz der ersten beiden Moden bei zunehmender Eisdicke.

Der praxisrelevante Eis Aufbau, an bspw. einer Flügelvorderkante, folgt allerdings nicht der in [2] angenommenen, homogenen Verteilung der Eisdicke. Vielmehr können sich in der Praxis deutliche Unterschiede in Dicke, Fläche und Form des problematischen Eisansatzes zeigen. Aus diesem Grund werden die Versuche in dieser Veröffentlichung an einem NACA0012-Profil in einem Eiswindkanal durchgeführt, um die Eiserkennung an einem realistischeren Aufbau des Eisansatzes zu untersuchen. In [3] kann ebenfalls die Abnahme der Gruppengeschwindigkeit bei steigender Eisdicke für eine Glasfaserplatte mit den Maßen 0,02 m x 0,2 m x 8 m gezeigt werden. Hierbei wird ein 1 m langer Bereich mit einer homogenen Eisdicke versehen. Es wird weiterhin eine Reflektion der Wellen an der Eisschicht beobachtet, deren Amplitude mit der Eisdicke steigt. Eine Untersuchung des Temperatureinflusses ergibt eine Verringerung der Amplitude der angeregten Welle und eine Erhöhung der Gruppengeschwindigkeit.

Die vorliegende Veröffentlichung untersucht die Anwendbarkeit der Eiserkennung an einem NACA0012-Profil mit einer Profiltiefe von einem Meter und zwei Vorderkanten aus einem Kohlefaserkunststoffverbund (CFK), sowie weitere Einflussfaktoren anhand von Versuchen, mit ebenfalls aus einem CFK bestehenden Platten. Die Grundlage der Eiserkennung bilden hierbei die gezielte Anregung von Lambwellen bei konstanter Anregungsfrequenz und der Amplitudenverlauf eines Zeitsignals, welches mit einem Gleitsinus (Sweep) durch variierende Frequenzbereiche ausgeführt wird. Wegen der Definition des Ultraschalls hinsichtlich eines Frequenzbereiches von 16 kHz bis 1 MHz und der Unterschreitung dieser Frequenzgrenze bei einigen der hier dargestellten Untersuchungen, wird in dieser Veröffentlichung allgemein von Körperschallwellen gesprochen. Die Vereisung der Flügelvorderkanten erfolgt im Mehrphasenwindkanal des Instituts für Strömungsmechanik der Technischen Universität Braunschweig. Der Versuchsaufbau und die gewählten Versuchsparameter werden im folgenden Kapitel beschrieben.

2 VERSUCHSAUFBAU/ VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Untersuchungen zum Eisansatz werden an einem symmetrischen Flügelprofil (NACA0012) mit modularem Aufbau durchgeführt (BILD 1). Modular bedeutet in diesem Fall, dass die Flügelvorderkante durch einen Hilfs- und einen Hauptholm mit der Flügelhinterkante durch Schraubverbindungen verbunden ist und für die Untersuchung von unterschiedlichen Systemen zur Eiserkennung und Enteisung gewechselt werden kann. Die Flügelvorderkante weist eine Breite von 500 mm auf, erstreckt sich auf 300 mm in Profiltiefenrichtung und besteht aus einer Haut aus einem Kohlefaserkunststoffverbund der Dicke 1 mm und einer metallischen Unterkonstruktion, welche aus einem

Hilfsholm und zwei daran angeschraubten Spanten zur seitlichen Stabilisierung besteht. Die metallische Unterkonstruktion ist an die CFK-Haut geklebt. Die Haut setzt sich aus vier Lagen des Prepregs HexTow@IMA/HexPly@M21 der Orientierung 90°, 0°, 0°, 90° zusammen. 0° ist in Spannweitenrichtung definiert. Der Hilfs- und Hauptholm, die Spante, sowie die Flügelhinterkante bestehen aus Aluminium und sind ebenfalls miteinander über Schraubverbindungen verbunden. Die Flügelvorderkante kann somit bündig über den Hilfsholm mit sechs Schrauben an die Flügelhinterkante montiert werden, so dass sich eine Gesamtprofiltiefe von 1 m ergibt. Weiterhin wird eine Platte aus CFK-Prepreg (M21, IMA-12k) mit den Maßen 880 mm x 580 mm x 1 mm und dem Lagenaufbau 0°, 90°, 90°, 0° verwendet. 0° ist dabei in Plattenlängsrichtung definiert.

Die Versuchsdurchführung erfolgt an der genannten CFK-Platte und an zwei identischen Flügelvorderkanten, an welchen die Piezokeramiken aus TAB 1 an den in BILD 2 dargestellten Positionen befestigt sind. Die Positionen der Flächenkeramiken Nr. 3 und Nr. 4 auf der CFK-Platte liegen bündig und mittig an den kürzeren Kanten. Die jeweils längeren Seiten der Piezokeramiken stehen sich gegenüber, um ein möglichst breites Wellenfeld entlang des Übertragungspfadens anzuregen. Für die Versuche werden zwei Typen von Piezokeramiken verwendet. Für die Untersuchung der Lambwellen an der CFK-Platte und der Flügelvorderkante 1 werden jeweils zwei DuraAct Flächenwandler eingesetzt. Für die Versuche zur Resonanzspektroskopie an der Flügelvorderkante 2 acht piezoelektrische Scheibenkeramiken.

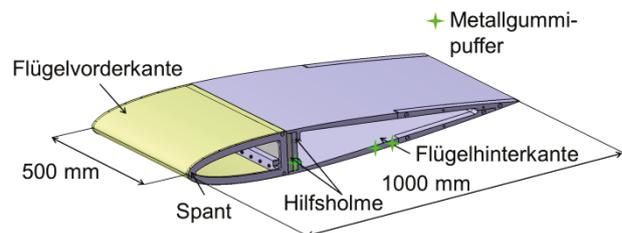


BILD 1: NACA0012-Profil. Die Anbringung in der Messstrecke erfolgte beidseits mit jeweils drei Metallgummipuffern.

Eine elektrisch leitende Verbindung mehrerer Elektroden untereinander konnte zuvor in Plattenversuchen bei kondensierender Feuchtigkeit beobachtet werden. Hierdurch sind keine Messungen mehr möglich, da alle verbundenen Keramiken nun auf demselben elektrischen Potential liegen. In [6] wurden verschiedene Beschichtungen hinsichtlich ihrer Lebensdauer unter zyklischer Belastung und der Wasseraufnahme in einem Wasserbad untersucht. Der geringste Massenzuwachs durch Wasseraufnahme wurde beim Schiffslack (EP817 FlexShield) beobachtet. Daher werden die Scheibenkeramiken mit einer Isolationschicht versehen, um eine Wasseraufnahme zu verhindern. Die Isolierung dient weiterhin der elektrischen Isolation der offenen, innenliegenden Elektrode und der Verbindungsstelle (Lötstelle) zur Messleitung.

Die Verbindungsstellen der DuraAct Flächenwandler werden ebenfalls elektrisch isoliert. Ein, die Keramik umfassender, Schutz vor Luftfeuchtigkeit wird nicht ausgeführt, da die DuraAct Flächenwandler bereits

Piezokeramiknr.	Bezeichnung	Kapazität t_A ¹ [nF] ² [μ F] bei $f = 10$ kHz	Kapazität t_E [μ F] bei $f = 10$ kHz	Abmessungen [mm x mm x mm]	Prüfkörper
DuraAct ¹ – 1	P-876K009	8,363	8,745	51 × 11 × 0,8	Flügelvorderkante 1 - CFK
DuraAct ¹ – 2		8,58	8,500		
Chip ² – 1	PRYY-1126	8,65	8,753	15 x 0,2	Flügelvorderkante 2 - CFK
Chip ² – 2		8,71	8,914		
Chip ² – 3		8,63	8,842		
Chip ² – 4		8,18	8,361		
Chip ² – 5		8,45	8,565		
Chip ² – 6		8,6	8,777		
Chip ² – 7		defekt	defekt		
Chip ² – 8		8,71	8,875		
DuraAct ¹ – 3	P-876K009	8,877	8,792	51 × 11 × 0,8	Platte - CFK
DuraAct ¹ – 4		8,714	8,634		

Verwendetes Harzsystem zur Applizierung: Sikomin SR 1710i mit SD 8824

TAB 1. Merkmale der verwendeten Piezokeramiken

gekapselt sind und keine starke, kontinuierliche Wassereexposition erwartet wird. Weiterhin treten, wie Kapitel 3 zeigt, bereits Verluste in der Signalamplitude durch die Kapselung auf, welche nach Möglichkeit zu vermeiden ist. Die vorhandene Kapselung wird daher als ausreichend angenommen. Da in Vorversuchen mit DuraAct Flächenwandlern, trotz deren ursprünglicher Kapselung eine Abnahme der Signalamplitude bei intensiver Benetzung durch darauf kondensiertem Wasser beobachtet und in Form von Kapazitätsmessungen dokumentiert wurde, werden die Kapazitäten der eingesetzten Piezokeramiken vor und nach den Versuchen gemessen (Zeitpunkte t_A und t_E in TAB 1). Die Kapazitätsschwankungen liegen innerhalb des vorhandenen Temperatureinflusses, so dass eine Veränderung der untersuchten Kenngrößen zur Eiserkennung allein aus den untersuchten Einflussgrößen hervorgeht und nicht durch eine Abnahme der Anregungsamplitude bzw. der Sensitivität des Empfängers. Die Isolationschicht wird nach der Applizierung der Piezokeramiken den Versuchsträgern ausgeführt. Die Messungen werden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0 m/s jeweils vor und nach dem Vereisungsprozess durchgeführt, um betriebsbedingte Störgrößen zu minimieren. Untersucht werden, neben dem Eisansatz, die Einflussgröße Temperatur und die elektrische Isolierung der Piezokeramiken. Der verwendete Funktionsgenerator hat eine maximale Ausgangsleistung von 1 W. Alle Versuche zur Erkennung des Eisansatzes werden bei einer Temperatur von -10° C im Eiswindkanal durchgeführt. Die Messungen zur Sensitivität der Lambwellen gegenüber dem Eisansatz werden bei einer Anregungsfrequenz von 218 kHz ausgeführt. Diese hat im Vorfeld zur größten Signalamplitude bei den zu untersuchenden Wellenpaketen geführt, wodurch ein größtmögliches Signal-Rausch-Verhältnis erzielt wird. Die Versuchsbedingungen sind im Anhang in TAB 4 aufgelistet.

2.1 Anmerkungen zu den Versuchen

Der Eiswindkanal am ISM-TUBS ist nach der Göttinger Bauart (geschlossener Umlauf) mit geschlossener Messstrecke ausgeführt. Die Kühlung erfolgt daher innenliegend. Da der Prüfling durch seitliche Befestigungen an der Kanalwand gelagert ist und bündig mit dieser abschließt, kommt es zum Wärmestrom von der Versuchshalle durch die Wand der Messstrecke hinein in den Prüfling. Die Temperaturen liegen kurz nach Abschalten der Strömung an Messpunkt 1 (BILD 2) daher um ca. 2 °C und an Messpunkt 2 um ca. 4 °C höher als die Lufttemperatur im Eiswindkanal. Die angegebene Temperatur von -10 °C gilt daher für die Lufttemperatur. Eine genaue Aussage über die Temperaturverteilung in der Flügelvorderkante und speziell an den Positionen der Piezokeramiken und entlang des Signalübertragungspfad kann nicht getroffen werden. Nach Abschluss der Messungen befindet sich eine deutlich sichtbare Ansammlung an kondensiertem Wasser innerhalb der Flügelvorderkante. Die Ursache wird im nicht vollständig abgedichteten Durchlass für die Messleitungen gesehen, durch welchen warme Luft in den Prüfling gesaugt wurde (Unterdruck durch niedrigere Temperaturen und höhere Strömungsgeschwindigkeit während des Betriebs im Eiswindkanal) und an den Innenseiten von Flügelvorderkante und Hilfsholm kondensierte. Diese Beobachtung und die zuvor beschriebene Befestigungsmethode mittels Schraubverbindungen über die Holme wird in der Versuchsauswertung noch eine Rolle spielen, da sie einen wichtigen Hinweis zur Auslegung eines der hier vorgestellten Eiserkennungssysteme gibt. Nach Beenden des Vereisungsprozesses hat sich die Flügelvorderkante durch die freiwerdende Wärme beim Phasenübergang erwärmt. Die Strömung wird daher wieder eingeschaltet, bis an den Messpunkten 1 und 2 die Lufttemperatur von -10 °C vorliegt. Eine evtl. vorhandene Temperaturabhängigkeit hat somit nur einen geringen Einfluss auf die Messergebnisse.

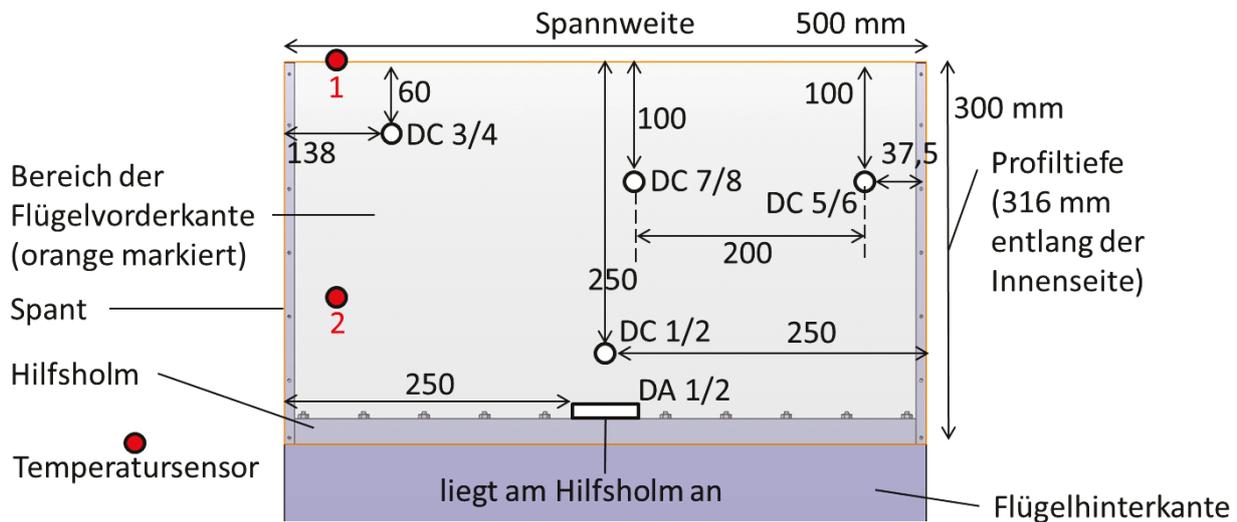


BILD 2: Draufsicht. Strömungsrichtung von oben nach unten. Position der Scheibenkeramiken (Flügelvorderkante 1) und DuraAct Flächenwandler (Flügelvorderkante 2). Die ungeraden Zahlen bezeichnen die Keramik auf der Unterseite, die geraden Zahlen jene auf der Oberseite. Alle Zahlenwerte sind in der Einheit mm dargestellt. Alle Maße sind entlang der Innenkontur gemessen, mit Ausnahme der Profiltiefe. Die Temperatursensoren weisen einen Abstand von 50 mm zur Seite auf. Sensor Nr. 1 ist in der Staulinie befestigt, Sensor Nr. 2 in einem Abstand von 200 mm zur dieser.

3. EINFLUSS DER ELEKTRISCHEN ISOLIERUNG AUF DIE SIGNALAMPLITUDE

Die elektrische Isolierung stellt eine Steifigkeitserhöhung dar, gegen welche die Keramik arbeiten muss. Die erzielbaren Dehnungen fallen geringer aus, was sich in einer Abnahme der Amplitude des ausgesendeten und empfangenen Signals widerspiegelt. Um diesen Einfluss näher zu betrachten, werden zunächst zwei Materialien hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Signalübertragung und ihrer Handhabbarkeit untersucht. Die Basis bilden zwei aus vier Lagen CFK-Prepreg (0°, 90°, 90° 0°) gefertigte Platten mit den Maßen 300 mm x 300 mm x 1 mm. Die Anordnung der verwendeten Chipkeramiken auf diesen Platten zeigt BILD 3. Aus den Positionen resultieren Abstände von 10 cm, 20 cm und 28 cm zwischen den Keramikmittelpunkten. Zur elektrischen Isolierung werden ein konventioneller Heißklebstoff mit einem Schmelzpunkt unterhalb des verwendeten Harzsystems und Lots, und ein Schiffslack (EP817 FlexShield) eingesetzt. BILD 6 zeigt die Mittelwerte der absoluten Spannungswerte $\overline{|\dot{A}|}$ aus dem empfangenen Zeitsignal. Angeregt wird mit einem Gleitsinus im Frequenzbereich von 1 kHz bis 500 kHz über eine Dauer von 500 ms mit einer Amplitude von 10 Vpp. Zu erkennen ist eine Abnahme des Wertes bei steigender Lauflänge und nach Applizierung der elektrischen Isolierungen. Die Verringerung der Amplituden fällt in beiden Varianten ungefähr gleich hoch aus, so dass für die weiteren Versuche der Heißklebstoff verwendet wird, da sich dieser einfacher applizieren lässt und die Keramiken und Lötstelle ohne Nacharbeiten vollständig umschließt. Weiterhin fällt auf, dass trotz identischem Aufbau bereits Abweichungen im Zeitsignal auftreten (vgl. Platten 1 und 2, jeweils ohne Isolierung). Die Ursache liegt in den Toleranzen bei der Fertigung der Platten, der Applizierung der Keramiken und den Keramiken selbst. Abweichungen bei mathematisch berechneten Amplitudenverläufen sind für einen handgefertigten Aufbau somit zu erwarten.

Die Messungen werden mit den an den Flügelvorderkanten applizierten Piezokeramiken ebenfalls vor und nach der Applizierung des Heißklebstoffes durchgeführt. Die Anregung findet über denselben Übertragungspfad mit denselben Betriebsparametern, wie auch zur Eiserkennung statt. Die Abnahme der Mittelwerte und Maxima $\overline{|\dot{A}|}$ aus den Absolutwerten aller Übertragungspfade ist in BILD 4 dargestellt. Bei den Scheibenkeramiken findet eine Reduktion um ca. 30 - 40 % (Mittelwerte) und ca. 45 - 65 % (Spitzenwerte) statt. Der Einfluss des Heißklebstoffes auf die Mittelwerte und Spitzenwerte bei den DuraAct Flächenwandlern fällt minimal aus. Ursachen sind der geringe Flächenanteil auf den Flächenwandlern, welcher mit Heißklebstoff überzogen ist, da nur die Lötstelle isoliert ist und die zwischen Piezokeramik und Heißklebstoff liegende Kapselung, welche in Verbindung mit dem Heißklebstoff zwei Steifigkeiten in Reihenschaltung bildet, wodurch die Gesamtsteifigkeit verringert wird. Die Änderungen in Folge des Heißklebstoffes auf der verwendeten CFK-Platte mit DuraAct Flächenwandlern sind ebenfalls marginal und hier nicht aufgeführt. Zwei beispielhafte Zeitverläufe für die Anregung mit einem Gleitsinus und mit konstanter Frequenz, sowie der Einfluss der elektrischen Isolierung sind in BILD 5 und 7 zu sehen.

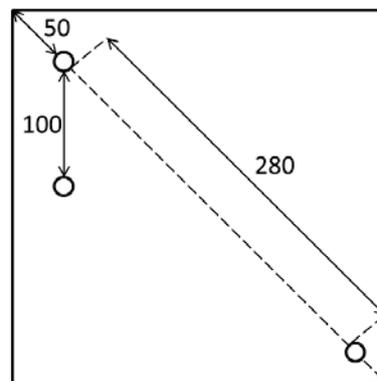


BILD 3: Position der Scheibenkeramiken auf den CFK-Platten. Die Maße enden jeweils in den Mittelpunkten der Keramiken.

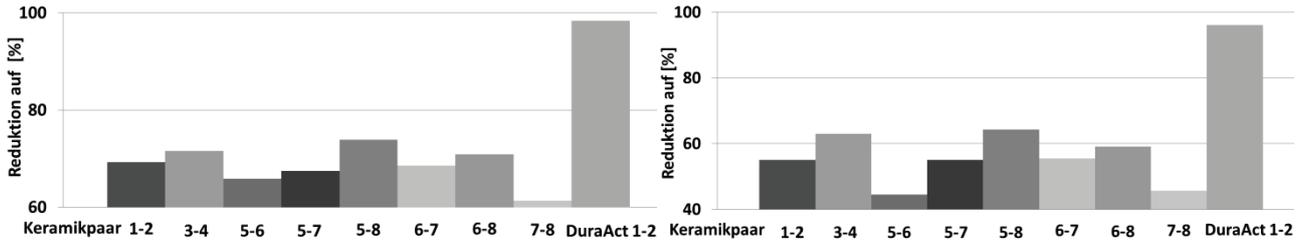


BILD 4: Flügelvorderkante 1 und 2: Mittelwerte (li) und Spitzenwerte (re) der Absolutwerte der empfangenen Zeitsignale an den Piezokeramiken nach dem Applizieren der elektrischen Isolierung bezogen auf den Wert ohne elektrische Isolierung.

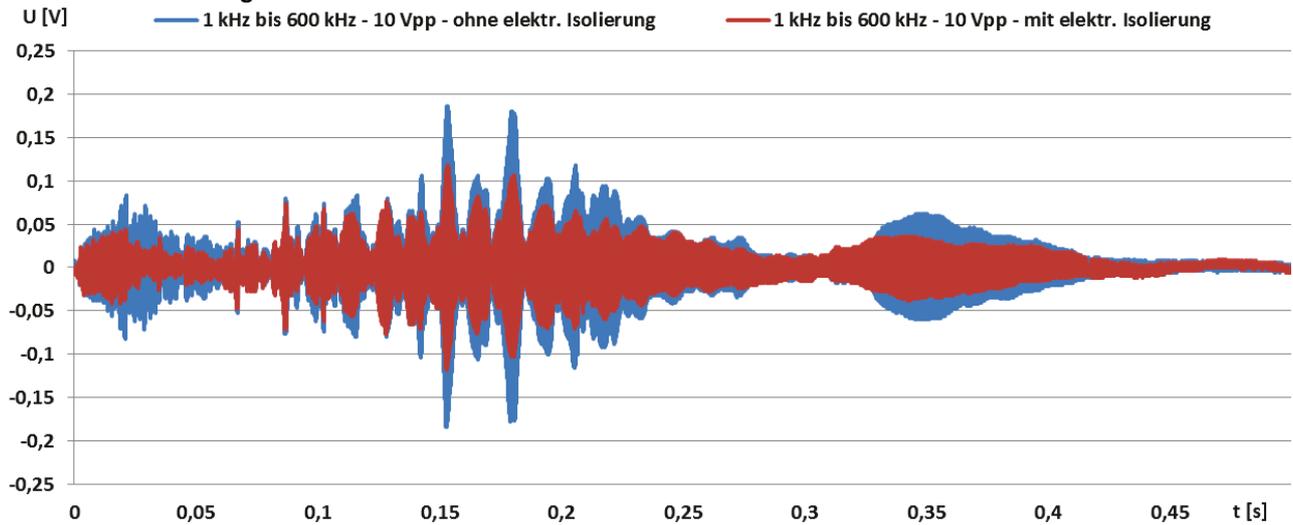


BILD 5: Flügelvorderkante 2: Einfluss der elektrischen Isolierung - Zeitsignal vom Übertragungspfad 3-4. Deutliche Abnahme der Amplitude.

Die strukturspezifischen Resonanzen sind in BILD 5 zu erkennen. Der Amplitudenverlauf hängt unter anderem von der Platzierung der Aktoren an der Flügelvorderkante, dem Abstand des Keramikpaares und der Richtung des Übertragungspfad bezogen auf die Faserorientierung ab. Daher liefern die Zeitsignale der verschiedenen Übertragungspfade unterschiedliche Zeitverläufe. Wegen der symmetrischen Platzierung der Piezokeramiken sind die Unterschiede bei umgekehrter Übertragungsrichtung marginal. Daher wird in allen Abbildungen nur eine Übertragungsrichtung dargestellt.

Flügelhinterkante vor. Diese führt zu einer weiteren Abnahme der Amplituden.

4. EINFLUSS DER ZYKLENZAHL

Bei der Anregung von Lambwellen kommt es zur Ausbreitung verschiedener Moden, deren Gruppengeschwindigkeit dispersiv, daher von der Frequenz abhängig ist. Bei ausreichender Lauflänge separieren sich die Wellenpakete daher und die Laufzeiten/Gruppengeschwindigkeiten der Wellenpakete können bestimmt werden. Da diese Abhängigkeit innerhalb der einzelnen Moden wiederum unterschiedlich ausgeprägt ist, können die Wellenpakete je nach gewählter Frequenz auch erst nach sehr langen Lauflängen unterschieden werden. Das in [2] erstellte Modell zeigt auch, dass für eine gewählte Anregungsfrequenz bei bestimmten Eisdicken die Gruppengeschwindigkeiten einzelner Wellenpakete identisch sind bzw. sich kaum unterscheiden. Die Wellenpakete überlagern sich daher während der Ausbreitung und können nicht oder erst nach großer Lauflänge unterschieden werden.

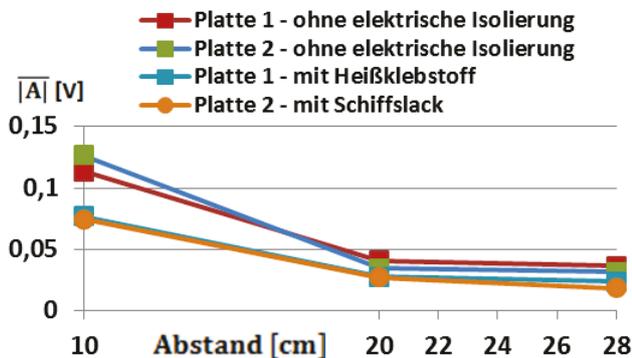


BILD 6: Einfluss von Übertragungslänge und elektrischer Isolierung auf $\overline{|A|}$.

Eine erneute Änderung der Randbedingungen liegt nach dem Anbringen der Flügelvorderkante an die

Eine Erhöhung der Zyklenzahl des Anregungssignals führt zu einer höheren Amplitude der ausgesendeten Wellenpakete. Eine hohe Amplitude ermöglicht ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis. Gleichzeitig werden die Wellenpakete breiter, wodurch diese wiederum mehr Lauflänge benötigen, um unterschieden zu werden. Für die Ermittlung der Laufzeit/Gruppengeschwindigkeit und

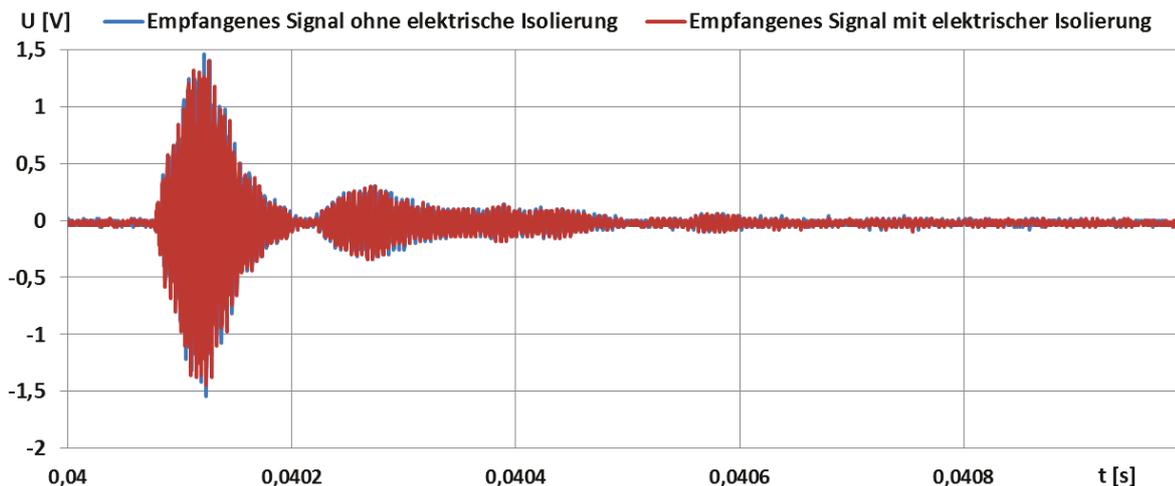


BILD 7: Einfluss der elektrischen Isolierung - Antwortsignale vom Übertragungspfad 1-2 bei Anregung mit 10 Zyklen und 218 kHz. Kein Einfluss auf die Amplitude bei Verwendung der DuraAct Flächenwandler. Die Kurven liegen übereinander.

deren Auswertung zur Eiserkennung ist die Zyklenzahl daher auslegungsrelevant. Die Versuche zum Einfluss der Zyklenzahl an der Platte und an der Flügelvorderkante 1 führen zu den folgenden Ergebnissen.

4.1 CFK-Platte mit Flächenwandlern

Messreihe 1 bis 3: Das dritte Wellenpaket ist bei der gewählten Anregungsfrequenz noch nicht klar vom zweiten Wellenpaket getrennt (BILD 8). Es werden für die Betrachtung der Laufzeit daher nur die ersten beiden Wellenpakete gewählt.

Ohne Eisschicht können bei einer Zyklenzahl von 1, 4 und 10 die ersten beiden Wellenpakete unterschieden werden.

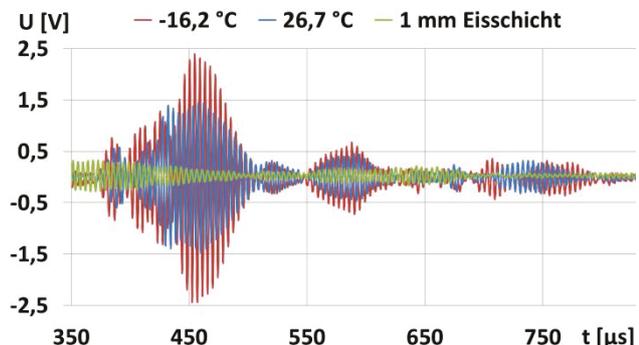
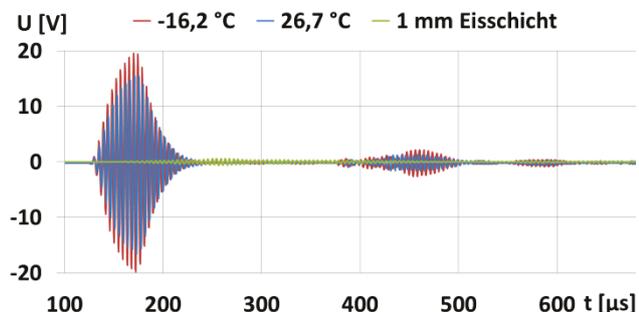


BILD 8: Zeitsignal mit Wellenpaketen (oben ab erstem Wellenpaket, unten ab zweitem Wellenpaket). Eine Unterteilung der einzelnen Wellenpakete ist nach Aufbringen der Eisschicht nicht mehr möglich.

Bei vorhandener Eisschicht und bei Anregung mit einem Zyklus können die Wellenpakete wegen der geringen Amplitude nicht mehr unterschieden werden. Die Zyklenzahl von vier ermöglicht gerade noch die Unterscheidung der einzelnen Wellenpakete, bei 10 Zyklen können die Wellenpakete auf Grund ihrer Breite nicht mehr getrennt untersucht werden. Die Wahl von vier Zyklen ermöglicht bei der CFK-Platte, der gewählten Anregungsfrequenz und der erzeugten Eisschicht daher eine Ermittlung der einzelnen Laufzeiten. BILD 8 (oben) zeigt das Ineinanderlaufen der Wellenpakete für eine Zyklenzahl von 10 ab dem ersten Wellenpaket. In BILD 8 (unten) ist der Signalverlauf mit einer höheren Zeit- und Amplitudenauflösung ab dem zweiten Wellenpaket dargestellt.

Da die DuraAct Flächenkeramiken an der Flügelvorderkante eine andere Lauflänge zu überbrücken haben und eine inhomogenere Eisdickenverteilung erwartet wird, ist die Auswahl einer geeigneten Zyklenzahl erneut zu treffen. Wegen der kürzeren Lauflänge ist ein Überlagern der Wellenpakete bei einer Zyklenzahl von 10 und Eisansatz zu erwarten.

4.2 Flügelvorderkante 1 mit DuraAct Flächenwandlern

Messreihe 11 bis 15: Die Flügelvorderkante wird für 30 s, 60 s und 90 s vereist. Wegen der kürzeren Lauflänge lassen sich die einzelnen Wellenpakete nicht klar voneinander trennen. Der Beginn des ersten Wellenpakets ist jedoch klar erkennbar, so dass eine Auswertung der Laufzeit möglich ist. Bei der Verwendung von einem Zyklus in der Anregung tritt wie bei der CFK-Platte eine so starke Amplitudenabnahme bei Eisansatz auf, dass eine Identifizierung des ersten Wellenpaketes nicht möglich ist. Bei der Verwendung von 10 Zyklen laufen die ersten beiden Wellenpakete so stark ineinander, dass die Amplitude nicht mehr ausgewertet werden kann. Für die Auswertung von Laufzeit, \overline{A} und \overline{A} werden daher die Messungen für eine Anregung von vier Zyklen betrachtet.

5. EINFLUSS DER TEMPERATUR

Um den Einfluss der Temperatur auf die Amplituden der Zeitsignale und die Laufzeiten zu dokumentieren, werden die Zeitsignale für alle drei Versuchsträger vor dem Vereisen bei Raumtemperatur unter den Bedingungen gemessen, wie sie auch bei der Messung mit Eisansatz vorliegen. Der Vorgang wird für die Temperatur wiederholt, bei welcher auch die Vereisung stattfindet.

5.1 CFK-Platte mit DuraAct Flächenwandlern

Messreihen 1 bis 3: Die Anregung erfolgt mit vier Zyklen. Die Temperaturverringerung führt zu einer höheren Amplitude der Wellenpakete (BILD 8). Sowohl die Maxima, als auch die Mittelwerte der Absolutwerte steigen. Normiert auf den maximalen Wert bei -16,2 °C sind die Werte in TAB 2 aufgeführt. Dabei wird der Zeitbereich ab dem zweiten Wellenbereich zum Zeitpunkt ohne Eisschicht zusätzlich betrachtet. Da sich die Laufzeiten der Wellenpakete durch den Eisansatz erhöhen, sind die letzten Schwingungen des ersten Wellenpaketes in der Auswertung der Messung ab dem 2.ten Wellenpaket enthalten (rot markiert).

Messung	$\overline{ \hat{A} }$ [V]	$\overline{ \bar{A} }$ [V]	$\frac{\overline{ \hat{A} }}{\overline{ \bar{A} }}$	Vergleich gegenüber -16,2 °C [%]		
1 (-16,2 °C)	12,6	0,46	27,3	100	100	100
2 (26,7 °C)	10,8	0,40	26,6	85,7	88,0	97,3
3 (1mm Eis)	0,31	0,04	7,14	2,47	9,46	26,1
ab 2. Wellenpaket						
4 (-16,2 °C)	1,62	0,18	8,86	100	100	100
5 (26,7 °C)	1,00	0,12	8,20	61,7	66,7	92,5
6 (1mm Eis)	0,15	0,02	5,29	9,50	15,9	59,7

TAB 2. Einfluss von Temperatur und Eis auf die Mittelwerte und Maxima der Absolutwerte für das gesamte Zeitsignal und ab dem zweiten Wellenpaket.

Bei abnehmender Temperatur steigen $\overline{|\hat{A}|}$ und $\overline{|\bar{A}|}$ an. Beim zweiten Wellenpaket ist diese Abhängigkeit stärker ausgeprägt. Der Quotient aus Maximum und Mittelwert zeigt eine geringere Temperaturabhängigkeit. Beim ersten Wellenpaket beträgt diese Änderung unter 3 %. Beim zweiten Wellenpaket unter 8 %. Eine Temperaturabhängigkeit der Laufzeit des ersten Wellenpakets fällt mit 0,4 bis 0,6 μ s gering aus (vgl. BILD 11).

5.2 Flügelvorderkante mit Scheibenkeramiken

Messreihen 4 und 5: Stellvertretend für alle untersuchten Übertragungswege wird der Einfluss der Temperatur auf $\overline{|\hat{A}|}$ und $\overline{|\bar{A}|}$ für den Übertragungsweg 4 - 3 in BILD 9 dargestellt. Der Zeitpunkt $t = 0$ s zeigt die beiden Werte für 19 °C und bei $t = 5$ s sind diese für -10 °C dargestellt. Eine Abnahme der beiden Werte bei Temperaturabsenkung trat bei allen 16 gemessenen Übertragungswegen auf. Das Maximum der Absolutwerte sank auf 53 % bis 98 %, der Mittelwert der Absolutwerte auf 75 % bis 95 %. Die dabei auftretende Varianz verdeutlicht einmal mehr die Abhängigkeit von Position und Fertigungstoleranzen.

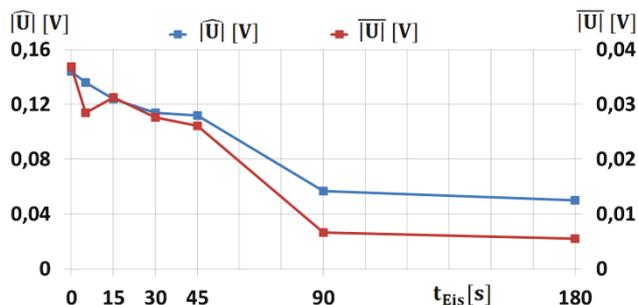


BILD 9: Abnahme von $\overline{|\hat{A}|}$ und $\overline{|\bar{A}|}$ bei Temperaturänderung und zunehmender Vereisungsdauer für den Übertragungsweg 4-3.

5.3 Flügelvorderkante mit DuraAct Flächenwandlern

Messreihen 11 und 12: Mit Verringerung der Temperatur zeigen $\overline{|\hat{A}|}$ und $\overline{|\bar{A}|}$ keine Änderung (BILD 14, TAB 3). Dementsprechend ändert sich auch der Quotient nicht nennenswert. Bei der Anregung der Lambwellen mit 218 kHz ist ein geringer Temperatureinfluss auf die Amplitude (3 bis 7 %), aber keiner auf die Laufzeit (0 %) erkennbar.

Messung	$\overline{ \hat{A} }$ [V]	$\overline{ \bar{A} }$ [V]	$\frac{\overline{ \hat{A} }}{\overline{ \bar{A} }}$	Vergleich gegenüber -10 °C [%]		
1 (-10 °C)	1,20	0,13	9,20	100	100	100
2 (17 °C)	1,21	0,13	9,21	101	101	100
3 (1mm Eis)	0,51	0,02	19,0	42,6	20,6	206
4 (2mm Eis)	0,08	0,00	10,0	6,83	6,26	108
5 (2,5mm Eis)	0,03	0,00	4,97	2,70	4,99	54,0

TAB 3: Einfluss von Temperatur und Eis auf die Mittelwerte und Maxima der Absolutwerte für das gesamte Zeitsignal und deren prozentuale Änderung gegenüber dem Referenzwert von -10 °C.

6. EINFLUSS DES EISANSATZES

Der erzeugte Eisansatz auf den Flügelvorderkanten zeigt in Profiltiefenrichtung eine wechselnde Eisform und auch Eisart (siehe Anhang BILD 16).

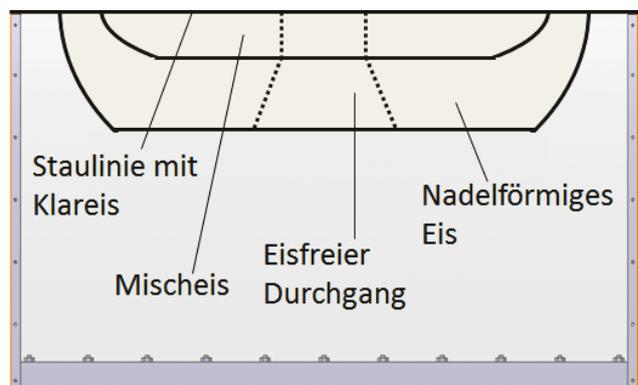


BILD 10: Prinzipskizze der erzeugten Eisarten und des eisfreien Durchgangs.

So bilden sich im hinteren Bereich bspw. einzelne, nadelförmige Eisspitzen aus, welche mit zunehmender Vereisungsdauer weiter wachsen. Eine Bestimmung der

exakten Dicke und der Fläche des generierten Eisansatzes ist daher nicht möglich. Die Prinzipskizze in BILD 10 veranschaulicht diese Tatsache. Die Angaben zur Eisdicke beziehen sich daher auf den Mittelpunkt der Staulinie. Ebenfalls ist bei kurzer Vereisungsdauer eine Eisschicht auf der Flügelvorderkante erkennbar, diese kann allerdings wegen ihrer geringen Dicke nicht erfasst werden. Aus diesem Grund und weil mit zunehmender Vereisungsdauer die Eismasse in jedem Fall zunimmt, ist in manchen Diagrammen die Vereisungsdauer auf der Abszissenachse aufgetragen.

6.1 CFK-Platte mit DuraAct Flächenwandlern

Messreihen 1 bis 3: Maximum, Mittelwert und Quotient sinken nach Aufbringen der Eisschicht deutlich ab (TAB 2, BILD 8). Am stärksten ist dieser Effekt am Maximum des ersten Wellenpaketes zu erkennen. Der Maximalwert fällt hierbei auf ca. 2,5 % des Ursprungswertes ab. Es liegt eine hohe Sensitivität vor.

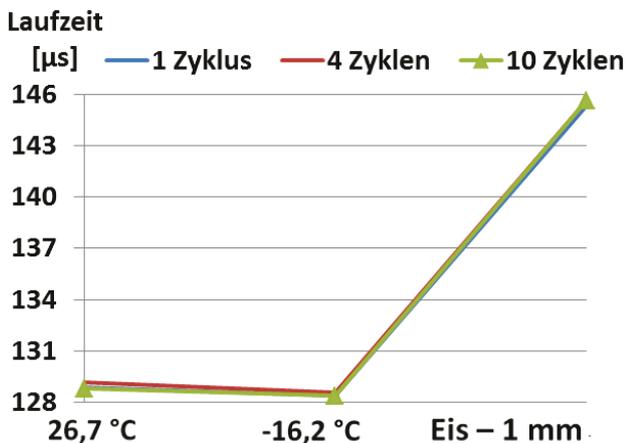


BILD 11: Einfluss von Temperatur und Eisschicht auf die Laufzeit des ersten Wellenpaketes auf der CFK-Platte.

Maximum und Mittelwert werden im Vereisungsfall bei der Auswertung ab dem zweiten Wellenpaket wie beschrieben noch durch das erste, verzögerte Wellenpaket verfälscht, da dieses wegen der Laufzeiterhöhung mit in den ausgewerteten Zeitbereich fällt und eine größere Amplitude als das zweite Wellenpaket erzeugt. Die Laufzeiten können daher nur für das erste Wellenpaket bestimmt werden.

Im Fall der Überlagerung durch mehrere Wellenpakete ist daher eine Methode zu verwenden, welche nicht die Laufzeit auswertet oder die Lauflänge und Anregungsfrequenz sind so zu wählen, dass die Wellenpakete sich auch bei Eisansatz noch differenzieren können. Sind die Lauflänge und Frequenz fix, so kann bereits über die Laufzeit des ersten Wellenpakets oder die Auswertung von $\overline{|\hat{A}|}$ oder $\overline{|\hat{A}|}$ eine dünne Eisschicht erkannt werden. Diese Zusammenhänge verdeutlichen BILD 11 und TAB 2. So kann TAB 2 entnommen werden, dass die Eisschicht zu einer Verringerung von $|\hat{A}|$ auf 2,5 % und von $\overline{|\hat{A}|}$ auf 9,5 % der Werte vor der Vereisung führen. Der Abfall der Werte für die Auswertung ab dem zweiten Wellenpaket führt, wegen der Überlagerung mit dem Ende des ersten Wellenpakets, zu einer noch deutlich erkennbaren, aber verringerten Sensitivität bezüglich der Eisschicht. Auch die weniger temperatursensitiven Quotienten fallen geringer aus.

Die Laufzeit des ersten Wellenpakets nimmt mit sinkender Temperatur leicht ab. Dieser Einfluss (max. 0,6 µs) fällt im Vergleich zur stark steigenden Laufzeit bei einer Eisschichtdicke (min. 16,9 µs) von 1 mm viel geringer aus. Während die Laufzeit des ersten Wellenpakets erwartungsgemäß unabhängig von der Zyklenzahl ist, ist für die Auswertung über $\overline{|\hat{A}|}$ oder $\overline{|\hat{A}|}$ aus dem bereits erläuterten Grund der Überlagerung mehrerer Wellenpakete zuvor eine geeignete Zyklenzahl zu wählen.

6.2 Flügelvorderkante mit Scheibenkeramiken

Messreihen 6 bis 10: Stellvertretend für die 16 Übertragungspfade wird hier der Übertragungspfad 4-3 diskutiert. Wie in BILD 9 zu erkennen ist, führt eine längere Vereisungsdauer und eine damit einhergehende Erhöhung der Eismasse/Eisdicke zu einer Absenkung des Maximums $\overline{|\hat{A}|}$ und Mittelwerts $\overline{|\hat{A}|}$ der Absolutwerte. Es sind Bereiche unterschiedlicher Sensitivität vorhanden. Im ersten Teil ist die Sensitivität gegenüber dem Eisansatz gering, steigt dann stark an und fällt dann wieder deutlich verringert aus. Weiterhin steigt $\overline{|\hat{A}|}$ für eine Vereisungsdauer von 15 s zunächst leicht an. Das nicht eindeutige Verhalten der Werte in Bereichen geringer Sensitivität tritt auch bei anderen Übertragungspfaden auf. Ursachen liegen im Rauschen, geringen Temperaturänderungen, aber auch im Auftreten einzelner hoher Amplituden im Zeitsignal. Ursache hierfür kann die von der Anregungsfrequenz unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit. Diese wird wie der folgende Abschnitt zeigt auch von dem Eisansatz beeinflusst. Einzelne Teile des Gleitsinus können sich somit konstruktiv überlagern, was vereinzelt Maxima hervorbringt.

6.3 Flügelvorderkante mit DuraAct Flächenwandlern

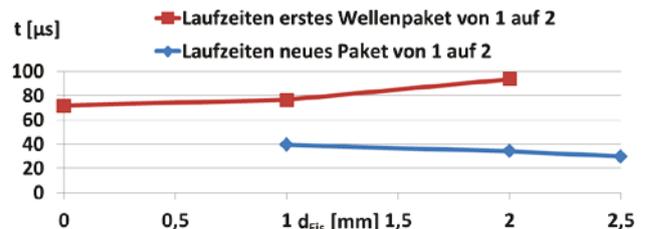


BILD 12: Änderung der Laufzeiten der betrachteten Wellenpakete über der Eisdicke.

Messreihe 13 bis 15: Das BILD 12 zeigt die Änderung der Laufzeit in Folge der Vereisung der Flügelvorderkante im Eiswindkanal. Wegen der starken Überlagerungen der einzelnen Wellenpakete kann die Laufzeit für das erste Wellenpaket ab einer gemessenen Eisdicke von 2,5 mm nicht mehr bestimmt werden. Der erzeugte Eisansatz führt zu einer Erhöhung der Laufzeit des ersten Wellenpakets. Durch weitere Erhöhung der Eisdicke steigt die Laufzeit weiter an. Ab der ersten Messung mit Eisansatz wird ein neues Wellenpaket beobachtet, welches noch vor dem ersten Wellenpaket eintrifft (BILD 13). Eine Abschätzung der Laufzeit über die Schallausbreitungsgeschwindigkeit von Aluminium (4000 m/s bis 6000 m/s für Transversal- und Longitudinalwellen), aus welchem die Holme im Profil

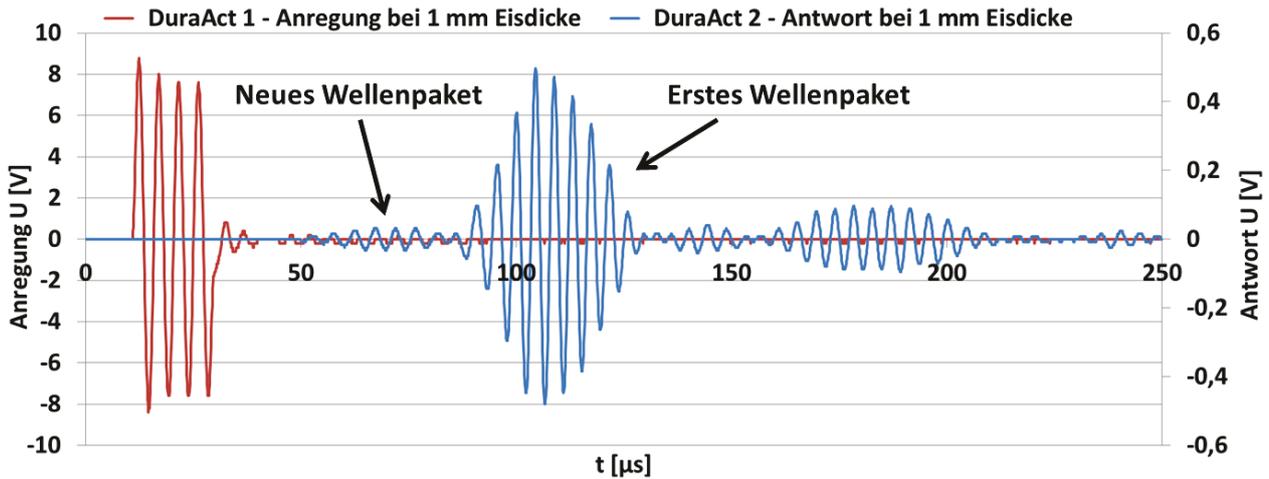


BILD 13: Anregungssignal und die empfangenen Wellenpakete über die beiden Übertragungspfade.

bestehen, und die Lauflänge des Signals über die Holme führt zu einer Laufzeit von 20 μs bis 40 μs . Das neue Wellenpaket läuft daher nicht über den vorgesehenen Übertragungspfad. Die Ursache wird, wie in Kapitel 2.1 genannt, in der starken Wasseransammlung gesehen, welche durch kondensierende Luftfeuchtigkeit entstanden ist. Diese Wasseransammlung ist auch in die Spalte zwischen den Hilfsholmen eingedrungen und dort gefroren. Hierdurch scheint der neue Übertragungspfad ermöglicht worden zu sein. Eine andere weitere Erklärungsmöglichkeit liegt in der Annahme der Modenkonzersion am Übergang zum Eisansatz und das Erzeugen eines Modes mit höherer Gruppengeschwindigkeit. Da das neue Wellenpaket nach dem vollständigen Enteisen weiterhin messbar ist, kommt nur die Variante über den zweiten Übertragungsweg in Betracht. Dessen Laufzeit über die Holme nimmt mit steigender Eisdicke ab (BILD 12).

Die Mittelwerte und Maxima der Absolutwerte $\overline{|A|}$ und $\widehat{|A|}$ fallen mit steigender Eisdicke stark ab (BILD 14, TAB 3). Der Abfall ist beim Mittelwert zunächst stärker ausgeprägt, bei größeren Eisdicken zeigt sich das Maximum empfindlicher. Das Absinken auf zunächst 43 % und 21 % (1 mm Eisdicke) bis hin zu ca. 3 % und 5 % (2,5 mm Eisdicke) zeigt die hohe Sensitivität der ausgewählten Kennwerte gegenüber der Eisschicht. Da der Abfall von $\overline{|A|}$ und $\widehat{|A|}$ mit zunehmender Eisdicke unterschiedlich ausfällt, steigt der Quotient aus beiden Werten erst stark an und fällt dann bei der maximalen Eisdicke von 2,5 mm auf 54 % ab. Im Gegensatz zur CFK-Platte kann dieser an der Flügelvorderkante nicht als Kennwert für eine Eisanlagerung identifiziert werden.

Um die Sensitivität in Spannweitenrichtung zu untersuchen, wird in der Mitte das Eis auf Ober- und Unterseite in Profiltiefenrichtung entfernt. Der direkte Übertragungspfad von einem DuraAct Flächenwandler zum anderen ist somit eisfrei (BILD 10, 17). Die Messungen werden wiederholt und die Breite des eisfreien Bereichs schrittweise erhöht. Die aufgezeichneten Zeitverläufe für den vollständig vereisten Bereich und die eisfreien Bereiche mit einer Breite von 3,5 cm und 7,5 cm sind in BILD 15 abgebildet. Zu erkennen ist eine fast vollständige Regeneration der Amplitude im ersten Mode bei einer Breite des eisfreien Bereichs von 3,5 cm. Der

zweite und dritte Mode weisen eine geringere Amplitudenzunahme auf. Bei weiterer Verbreiterung des eisfreien Bereichs auf 7,5 cm erreicht die Amplitude

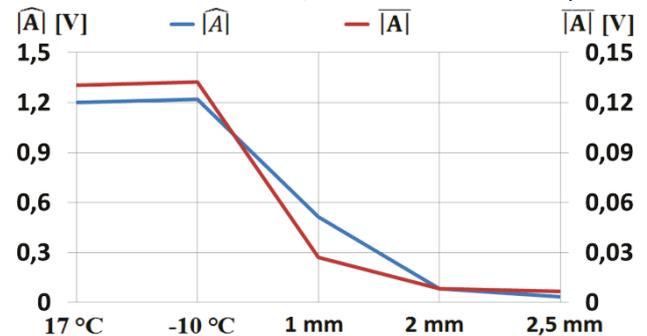


BILD 14: Einfluss von Temperatur und Eisdicke auf $\widehat{|A|}$ und $\overline{|A|}$ bei Verwendung der DuraAct Flächenwandler.

des ersten Modes ihre ursprüngliche Amplitudenhöhe. Die Amplitude des zweiten Modes weist keinen Zuwachs auf, während jene des dritten Modes weiter anwächst. Eine weitere Verbreiterung des eisfreien Bereichs auf zunächst 12 cm bis hin zur vollständigen Enteisung führt zu keiner weiteren Änderung im Signalverlauf.

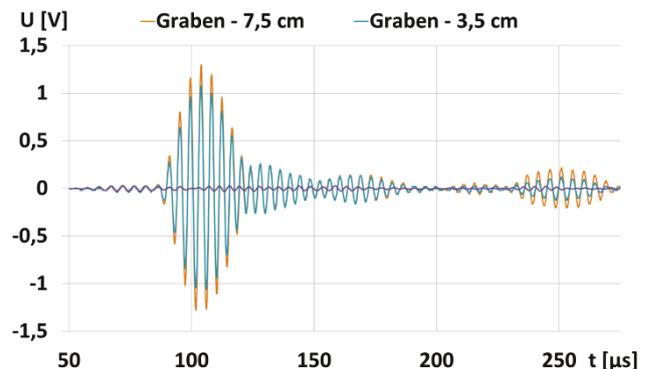


BILD 15: Zunahme der Amplitude mit größer werdendem eisfreien Bereich entlang des direkten Übertragungsweges.

Die Ursache für die nicht vollständige Regeneration wird in der Benetzung durch das Wasser auf der Innenseite gesehen. Eine unterschiedliche Sensitivität der einzelnen Wellenpakete gegenüber der Breite des eisfreien Bereichs

ist dennoch vorhanden. Die sensitive Breite des Übertragungsweges scheint im Bereich der Breite der verwendeten Piezokeramiken zu liegen.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Für die Eiserkennung per Laufzeit bzw. Gruppengeschwindigkeit bei fixer Anregungsfrequenz ist eine vorherige Abschätzung der Laufzeiten in Abhängigkeit der Zyklenzahl und Frequenz im Auslegungsfall zu empfehlen, um das Separieren der einzelnen Wellenpakete zu ermöglichen.

In Anbetracht der geringen Temperaturabhängigkeit der Laufzeit im Plattenversuch und an der Flügelvorderkante 1, im Vergleich zur Änderung der Laufzeit bei Eisansatz, scheint ein Verzicht auf eine zusätzliche Temperaturüberwachung denkbar. Die ermittelten Laufzeiten steigen mit zunehmender Eisdicke an. Eine Eiserkennung ist hiermit möglich.

Kann keine Messung der Laufzeiten durchgeführt werden, so zeigen auch die vergleichsweise einfach zu bestimmenden Werte $|\bar{A}|$ und $|\bar{A}|$ für die Anregung mit fixer Frequenz eine hohe Sensitivität gegenüber dem Eisansatz. Ein Temperatureinfluss konnte hier an der CFK-Platte, nicht aber an der Flügelvorderkante beobachtet werden und ist daher anwendungsspezifisch zu berücksichtigen. Durch die Verwendung des Quotienten aus $|\bar{A}|$ und $|\bar{A}|$ kann an der CFK-Platte wegen der verringerten Temperaturabhängigkeit, insbesondere für das erste Wellenpaket, eine Eiserkennung ohne Temperaturbestimmung erzielt werden. An der Flügelvorderkante ist der Quotient wegen der stark unterschiedlichen Sensitivität von $|\bar{A}|$ und $|\bar{A}|$ über der Eisdicke ungeeignet für die Eiserkennung, da dieser sowohl über als auch unter den Referenzwert (Wert vor dem Eisansatz) fällt. Die Verwendung des Quotienten scheint daher ungeeignet.

Bei der Auswahl geeigneter Positionen der Piezokeramiken und der Auswertung der empfangenen Signale sind die möglichen Übertragungspfade und die zugehörigen Signallaufzeiten zu berücksichtigen. Ein Übertragungspfad über den Holm kann hierbei gezielt ausgenutzt werden, um einen Eisansatz hinter den Eisschutzsystemen (Runback Ice) zu erkennen.

Bei Anregung mit einem Gleitsinus und Auswertung über $|\bar{A}|$ und $|\bar{A}|$ wird eine geringe Sensitivität für dünne Eisschichten festgestellt. Diese steigt mit steigender Eisdicke stark an und flacht ab einer bestimmten Eisdicke wieder deutlich ab. Im Bereich der geringen Sensitivitäten kann, wegen der Überlagerung des Nutzsignals durch Messrauschen und den Temperatureinfluss, keine eindeutige Aussage über eine vorhandene Eisschicht getroffen werden. Auch eine Überlagerung einzelner Signalanteile bei Eiseinfluss führt zu Amplitudenerhöhungen, durch welche die Werte $|\bar{A}|$ und $|\bar{A}|$ erhöht werden und zu einer Fehlinterpretation führen können. Die Auswertung über die genannten Werte bei Anregung mit einem Gleitsinus scheint daher ungeeignet zu sein, um bereits dünne Eisschichten zu detektieren.

Ebenso scheint, wegen der stark unterschiedlichen Abnahme der untersuchten Werte bei Verringerung der Temperatur, eine Kalibrierung hinsichtlich des Temperatureinflusses notwendig.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen zeigen, dass die vorgestellten Methoden zur Eisdetektion grundsätzlich in Frage kommen. Die Verwendung eines Gleitsinus und die Auswertung über den Mittelwert oder das Maximum der Absolutwerte zeigen für dünne Eisschichten eine zunächst geringe Sensitivität. Ab einer bestimmten Eisdicke kommt es zu einem deutlichen Abfall beider Werte, an welchen sich mit weiter zunehmender Eisdicke erneut ein Bereich geringer Sensitivität anschließt. Dieses einfache Verfahren eignet sich daher zur Eisdickenmessung ab einer bestimmten Mindesteisdicke. Die Verwendung einer konstanten Anregungsfrequenz ermöglicht die Generation von Lambwellen. Deren Auswertung über den Mittelwert bzw. das Maximum der Absolutwerte oder die Laufzeit führt zu einer Erkennung des Eisansatzes mit hoher Sensitivität, welche bereits für die kleinste erzeugte Eisdicke von 1 mm eine Eiserkennung zulässt. Mit zunehmender Eisdicke nimmt die Sensitivität wieder ab, so dass anwendungsspezifisch eine bestimmte Eisdicke existiert, ab welcher keine weitere Aussage über die genaue Eisdicke getroffen werden kann.

9 AUSBLICK

Die gewählten Methoden sind von etlichen Einflussparametern abhängig. Weiterführende Untersuchungen konzentrieren sich auf die Einflussparameter Position, Art von Aktor und Sensor, Dicke von Laminat und Laminataufbau, Anregungsfrequenz, Temperatur und die Randbedingungen der Lagerung. Ziel ist die Bestimmung von Eisart, Eisdicke und eine Lokalisation des Eisansatzes.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Endres, H. Sommerwerk, C. Mendig, M. Sinapius, P. Horst, *Experimental study of two mechanical de-icing systems applied on a wing section tested in an icing wind tunnel*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, 2016, 2016, S.1-10
- [2] Huidong Gao, Joseph L. Rose, *Ice Detection and Classification on an Aircraft Wing with Ultrasonic Shear Horizontal Guided Waves*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 56, no. 2, February 2009, S. 334-344.
- [3] S. Shoja, V. Berbyuk, A. Boström, *Investigating the application of guided wave propagation for ice detection on composite materials*, International Conference on Engineering Vibration, 2015, S. 1-12
- [4] R. J. Hansman Jr., M. S. Kirby, *Measurement of Ice Accretion Using Ultrasonic Pulse-Echo Techniques*, Aerodynamic heating and thermal protection systems-v. 59 heat transfer and thermal control systems-v. 60, 1985, S. 530-535
- [5] V. Berbyuk, B. Peterson, J. Möller, *Towards early ice detection on wind turbine blades using acoustic waves*, Proc. of SPIE Vol. 9063, 2014, S. 1-11
- [6] C. Behr, F. Lippmann, P. Wierach, M. Sinapius, *Tailored Multilayer Stack Actuators for Harsh Environment*, 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, 2015, S. 1-10

11 ANHANG

Messreihe Nr.	Temperatur [°C]	Strömungsgeschwindigkeit während der Vereisung [m/s]	LWC [g/m ³]	d _{Tr} [µm]	Bemerkungen
1	26,7	-	-	-	CFK-Platte in Tiefkühlkammer mit 1 mm Eisschicht
2	-16,2	-	-	-	
3	-16,2	-	-	-	
4	19	-	-	-	
5	-10	-	-	-	Flügelvorderkante 2, Scheibenkeramiken, Einfluss der Temperatur
6	-10	40	2	90	Flügelvorderkante 2, Scheibenkeramiken, Vereisung im Eiswindkanal, Vereisungsdauer 15 s, 30 s, 45 s, 90 s und 180 s
7	-10	40	2	90	
8	-10	40	2	90	
9	-10	40	2	90	
10	-10	40	2	90	
11	17	-	-	-	Flügelvorderkante 1, DuraAct Flächenwandler, Einfluss der Temperatur und Zyklenzahl
12	-10	-	-	-	
13	-10	40	2	90	Flügelvorderkante 1, DuraAct Flächenwandler, Zyklenzahl und Vereisung im Eiswindkanal, Vereisungsdauer 30 s, 60 s und 90 s
14	-10	40	2	90	
15	-10	40	2	90	

TAB 4: Versuchsübersicht - Randbedingungen und Betriebsparameter



BILD 16: Typischer Eis Aufbau. Entlang der Staulinie Klareis, in Profiltiefenrichtung dann Mischeis und nadelförmige Spitzen.

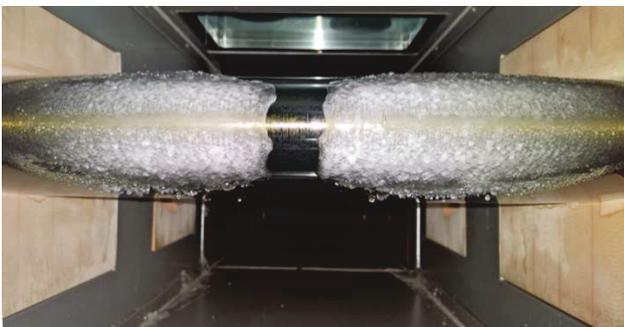


BILD 17: Eisfreier Bereich auf dem direkten Übertragungsweg des Ultraschallsignals.