

Charakterisierung von Lamb-Wellen-Schadensinteraktionen für die Entwicklung von Pseudo-Schäden

Tim BEHRENS¹, Maria MOIX-BONET², Daniel SCHMIDT³, Peter WIERACH⁴

¹ DLR, Brunswick, Germany, Tim.Behrens@dlr.de,

² DLR, Bremen, Germany, Maria.Moix-Bonet@dlr.de,

³ DLR, Brunswick, Germany, Daniel.Schmidt@dlr.de,

⁴ DLR, Brunswick, Germany, Peter.Wierach@dlr.de

Kurzfassung. In der Luftfahrt sind Delaminationsschäden in Verbundwerkstoffstrukturen ein entscheidender Faktor für die Taktung von Wartungszyklen. Strukturüberwachungssysteme (eng.: Structural Health Monitoring Systems, SHM-Systeme), die auf ultraschallgeführten Wellen basieren, haben das Potenzial, diese Schäden schnell zu finden und somit den Fluggesellschaften Kosten zu sparen. Für die Entwicklung eines solchen Systems sind entfernbare Pseudoschäden eine kostengünstige Möglichkeit, um die erforderliche Anzahl von Tests zu ermöglichen. Jedoch ist für die Entwicklung eines entfernbaren Pseudoschadens eine Strategie erforderlich, mit der die Welleninteraktionen von Delaminationen so charakterisiert werden können, dass sie auch für die Charakterisierung entferbarer Pseudoschäden geeignet sind.

Daher wird in diesem Beitrag eine Methode zur Charakterisierung der durch Delaminationen verursachten Lamb-Wellen-Reflexion, Transmission und S0 zu A0 Modenumwandlungen vorgestellt. Dazu wird ein B-Scan mit einem luftgekoppelten Ultraschallscanner durchgeführt, der am Aktuator beginnt und hinter dem Schaden endet. Die vorgesetzte Methode ist in der Lage, die Welleninteraktionen der Delaminationen sowie möglicher Pseudoschäden zu erfassen. Daher kann diese Charakterisierung als Werkzeug verwendet werden, um verschiedene Ideen für Pseudoschäden zu testen und sie mit dem Ziel zu vergleichen, den Interaktionen einer Delamination so nahe wie möglich zu kommen. Damit ist der erste Schritt erfolgt, um SHM-Systemtests in großer Anzahl zu ermöglichen.

Keywords: artificial damage, air coupled ultrasonic scanner, composite structures, damage detection, delamination, guided wave, lamb wave, wave characterisation

Einführung

In der Luftfahrtindustrie stellen Delaminationsschäden in Verbundwerkstoffstrukturen einen entscheidenden Faktor für die Planung von Wartungszyklen und die Gewährleistung der



strukturellen Integrität von Flugzeugen dar. Die frühzeitige und präzise Detektion dieser Delaminationen ist von wesentlicher Bedeutung, um teure Reparaturen und längere Ausfallzeiten zu vermeiden und die Sicherheit der Flugzeuge zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang spielen Strukturüberwachungssysteme (eng. *Structural Health Monitoring Systems*, SHM-Systeme), die auf der Verwendung von geführten Ultraschallwellen basieren, eine immer größere Rolle. Sie bieten die Möglichkeit, Schäden innerhalb weniger Minuten zu erkennen und ermöglichen so eine effizientere Wartung und somit eine Reduktion der Betriebskosten. [1]

Die Herausforderung bei der Entwicklung und dem Testen solcher SHM-Systeme liegt in der Notwendigkeit, die Systeme unter realistischen Bedingungen zu überprüfen, ohne dabei die zu überwachenden Strukturen zu beschädigen. Hier kommen sogenannte Pseudoschäden ins Spiel – künstlich erzeugte Schäden, die als Replikas für reale Schäden dienen, um die Leistungsfähigkeit des Überwachungssystems in einer kontrollierten Umgebung zu testen. Dies ermöglicht eine wiederholte Nutzung der gleichen, meist teuren Teststrukturen, was insbesondere für die Durchführung einer großen Anzahl von Messungen hilfreich ist. Pseudoschäden sind somit ein kostengünstiges und praktisches Mittel, um die Testmethoden zu validieren und eine hohe Zuverlässigkeit der SHM-Systeme zu gewährleisten.

Lamb-Wellen sind eine Art von körpergeführten Ultraschallwellen, die sich in plattenartigen Strukturen ausbreiten. Besonders hervorzuheben ist ihre Eigenschaft, sich über große Entfernung auszubreiten, während sie gleichzeitig durch Modenkonversion und unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten sensitiv auf strukturelle Schäden sind. Durch diese Eigenschaften eignen sie sich gut für die Verwendung in SHM-Systemen. [2]

Die Entwicklung von Pseudoschäden für die Lamb-Wellen-Technik stellt eine Herausforderung dar, da deren Interaktionen mit Ultraschallwellen sich von denen realer Schäden unterscheiden können, was dazu führen kann, dass ein SHM-System zwar Pseudoschäden erkennt, aber echte Schäden nicht. Aufgrund der Komplexität realer Strukturen und bei fehlenden realistischen Modellen zur Wellenausbreitung in diesen ist es entscheidend, dass mithilfe von Pseudoschäden eine Vielzahl an Testmessungen durchgeführt werden kann. Nur so kann ein Schadenserkennungssystem korrekt trainiert bzw. kalibriert werden, um tatsächlich auch Impact-Schäden zu detektieren. Eine präzise Analyse dieser Welleninteraktionen ist daher notwendig, um sicherzustellen, dass Pseudoschäden die echten Schäden möglichst genau nachbilden und als verlässliche Testobjekte verwendet werden können. [3]

Ein zentrales Ziel dieses Beitrags ist es, eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht, die Welleninteraktionen von Delaminationen und Pseudoschäden zu charakterisieren. Insbesondere sollen die Wechselwirkungen der Lamb-Wellen, in Bezug auf die Reflexion, Transmission und Modenkonversion untersucht werden.

In dem Kapitel 1. Akquise der Experimentaldaten wird die physischen Aspekte des Versuches und die Datenerfassung erläutert, im Kapitel 2. Analyse der Charakteristischen Merkmale wird die Berechnung der Charakteristika erklärt und im folgenden Kapitel kritisch bewertet. Schließlich gibt es eine Zusammenfassung mit Ausblick.

1. Akquise der Experimentaldaten

Die Untersuchung der Welleninteraktionen mit der A_0 und der S_0 Mode erfordert einen experimentellen Aufbau in dem die Transmission durch den Schaden, die Reflexion am Schaden sowie die Modenkonversion der S_0 Mode zur A_0 Mode messbar sind. Im Folgenden wird beschrieben, warum eine Plattengröße von 50 x 66 cm, zwei separate Anregungen und die Messung als B-Scan durchgeführt wird.

Die hier betrachteten Wellen sind sogenannte Lamb-Wellen, körpergeführte Ultraschallwellen mit disperseren Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Es bilden sich Moden, vor allem die Fundamentalmoden A_0 und S_0 . Je nach angeregtem Frequenzbereich variieren die Amplituden der einzelnen Moden und eine Mode ist dominant gegenüber den anderen ([2]). Um eine gute Charakterisierung der Welleninteraktionen zu ermöglichen, werden für die Interaktionen der A_0 und der S_0 Mode jeweils eine einzelne Messung durchgeführt. Um die Transmission und die Reflexion der Welle zu messen, also die Welleninteraktionen vor und nach einem Schaden, wird ein B-Scan aufgenommen. Dies wird mit einer luftgekoppelten Ultraschallanlage umgesetzt.

Bei der A_0 Mode ist eine möglichst hohe Frequenz angestrebt, bei der noch keine störenden Wellen der S_0 Mode auftreten. Dabei ist eine hohe Frequenz zu wählen, da eine höhere Frequenz eine kürzere Wellenlänge und Periodendauer aufweist (siehe Abb. 1). Dieses ist bevorzugt, da im später genauer erläuterten B-Scan auf diese Weise die Wellenpakete schmäler sind. Das Anregungsfrequenz für die A_0 Mode ist 90 kHz.

Für die S_0 Mode ist eine höhere Frequenz anzustreben, da hier die Wellenlängen weiter abnehmen, und die Amplitude S_0 Mode dominanter wird. Allerdings kann diese Frequenz nicht beliebig hoch gewählt werden, da der Ultraschallauflnehmer diese detektieren müssen. Klassische Ultraschallauflnehmer arbeiten in ihrer Resonanzfrequenz (AirTech200), weshalb sie deutlich Nachschwingen. Dieses Nachschwingen ist ungeeignet, um schmale Wellenpakete zu messen. Daher wird ein Mikrofon verwendet, welche die maximale Anregungsfrequenz auf 150 kHz festlegt (DeltaTron Free-field $\frac{1}{4}$ " Microphone Type 4954A). Aus dem gleichen Grund, dem schmalen Wellenpaket, ist das Anregungssignal ein 3-zyklischer Sinusburst. Es wird ein DuraAct P-879K025 und ein Verstärker (WMA 300, Falco Systems) für die Anregung verwendet.

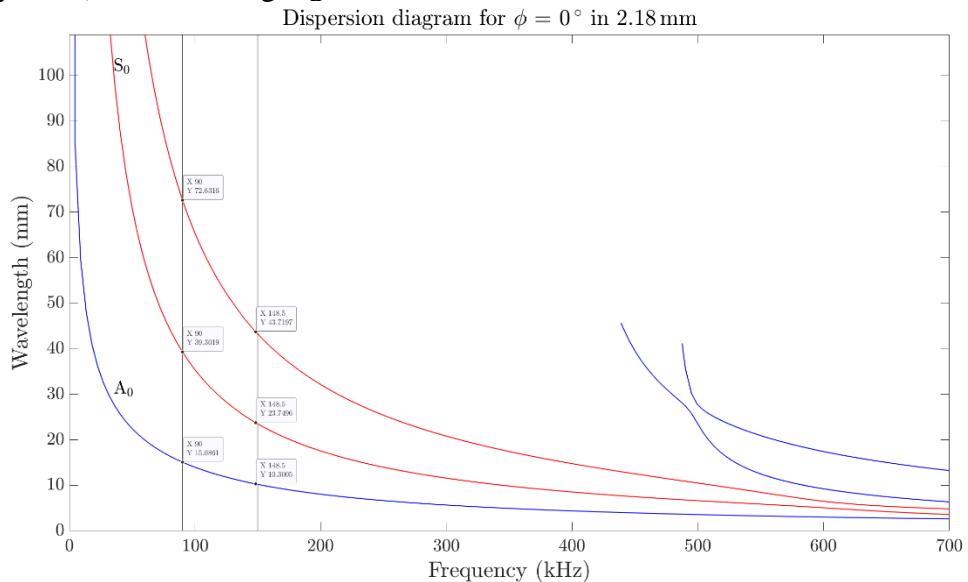


Abb. 1 Dispersionsdiagramm der verwendeten Platte in Observationsorientierung [4]

Als Ausbreitungsmedium ist eine schlichte Platte gewählt. Für die Vergleichbarkeit mit Platten aus Voruntersuchungen wird eine quasiisotrope Platte mit einem Lagenaufbau von $[0/+45/-45/90/-45/+45/0]$ und einer Dicke von 2,2 mm untersucht.

Für die Versuche der Impactschaden und Pseudo Schaden Charakterisierung sind mehrere Platten vorgesehen. Damit sie ein möglichst ähnliches Wellenausbreitungsverhalten haben, sollen sie aus einer Charge kommen. Daher ist die Geometrie der Werkzeugform mit einem Maß von 2 mal 2 m x 1 m als Vorgabe gesetzt. Eine Separation der Moden bei dem S_0 B-Scan ist in einem Maße notwendig, sodass die verschiedenen Modeninteraktionen voneinander trennbar sind. In Abb. 2 a) ist ein S_0 B-Scan aus Vorversuchen mit Platte vergleichbarer Struktur und Maßen entsprechend Abb. 2 b) dargestellt. Im B-Scan sind die

unterschiedlichen Wellenpakete beschriftet. Die dabei zu betrachtenden Wellenpakete sind in Abb. 2 c) eingezeichnet. Im B-Scan ist zu erkennen, dass die einzelnen charakteristischen Merkmale, die Transmission S_0 und A_0 , Reflexion A_0 (entsprechen Modenkonversion), identifizierbar sind. Allerdings liegt in den Bereichen der zu A_0 umgewandelten Mode Interferenz vor. Ein interferenz-ärmeren Reflexionsbereich A_0 ist durch einen größeren Abstand zwischen Aktuator und Schaden realisierbar. Ein interferenz-ärmeren Transmissionsbereich A_0 ist entweder durch eine viel später eintreffende Hinterkanten Reflexion, oder durch ein späteres Eintreffen der Reflexion der Seitenkanten.

Als Kompromiss aus minimal größerer Separation der Moden durch eine leichte Verschiebung des Aktuators, sowie der Vergrößerung des Transmissionsbereichs A_0 durch die Verschiebung der Seitenkantenreflexionen aufgrund einer größeren Platte und auf der Gegenseite die Anzahl an Platten einer Charge, wurde ein Plattenmaß von 50x66cm entschieden. Der Aufbau ist in Abb. 2 d) dargestellt.

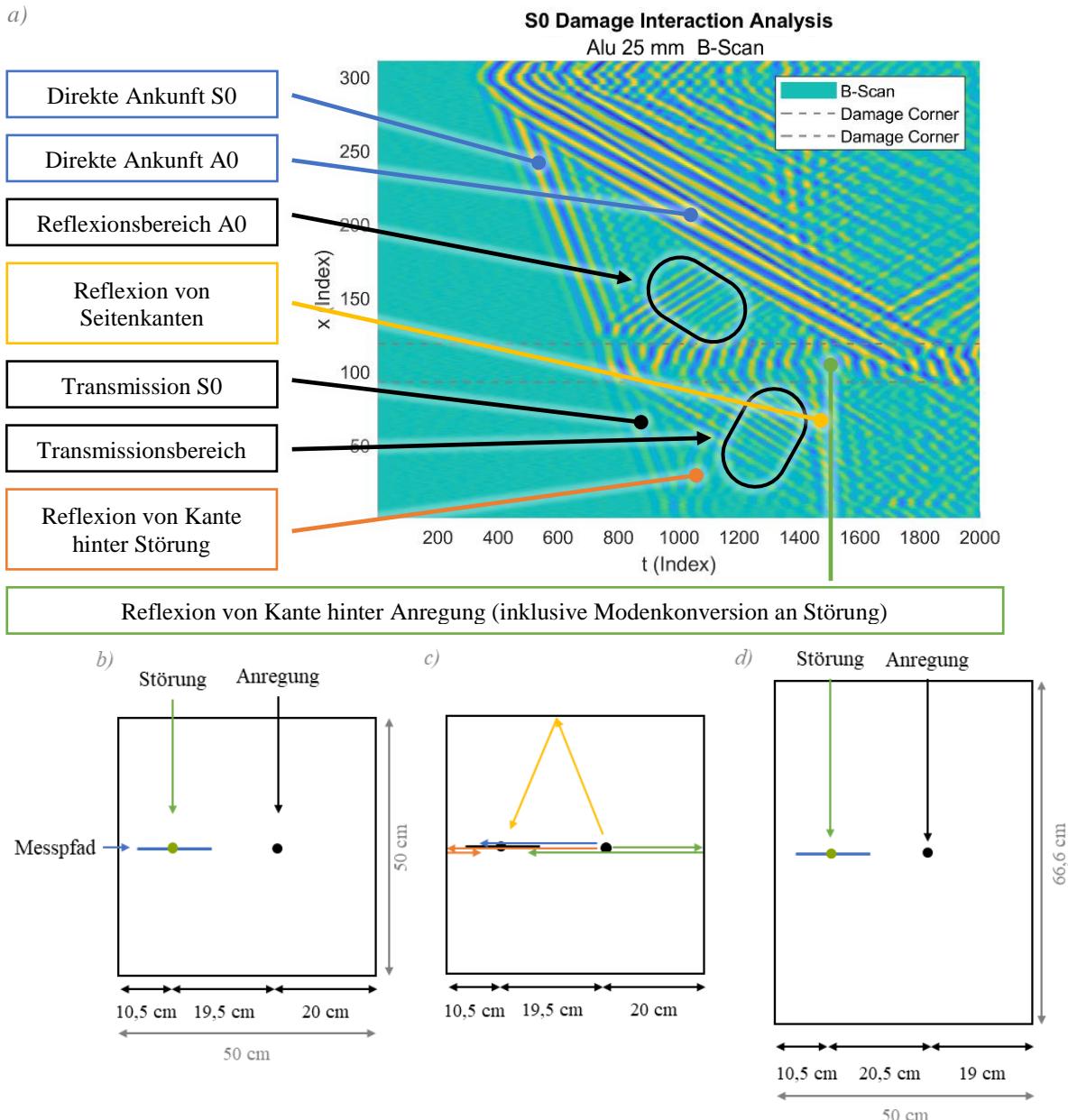


Abb. 2 a) B-Scan mit S_0 Anregung aus Vorversuchen mit beschrifteten Wellenpaketen, **b)** Messaufbau Vorversuch, **c)** betrachtete Wellenpakete aus a), **d)** Messaufbau der vorgestellten Methodik

2. Analyse der Charakteristischen Merkmale

Die Interaktion der Lamb-Wellen, die bei Schadenslokalisationsystem typischerweise verwendete Wellenart, sollen in diesem Manuskript charakterisiert werden. Die zu beobachtenden Phänomene sind für die A_0 Anregung die Transmission und die Reflexion, für die S_0 Anregung zusätzlich auch die Modenkonversion von S_0 zu A_0 . Für diese beiden Anregungsfrequenzen (A_0 und S_0) werden jeweils einzelne B-Scan Messungen durchgeführt und einzeln ausgewertet. In diesem Kapitel wird die Quantifizierung erläutert.

Ziel ist es charakteristische Kennwerte zu berechnen, die zwischen verschiedenen Schäden vergleichbar sind. Um diese umzusetzen, nutzt das hier vorgestellte Verfahren die Amplitude der Wellenpakete. Aufgrund der Interferenz von ausklingenden Wellenpaketen und stochastischer Variation sind zum Ausgleich im B-Scan Bereiche definiert, in denen der Mittelwert der maximalen Amplitude gebildet wird. Dafür wird, im B-Scan im Schnitt des Wellenpaketes, entsprechend der Kante der jeweiligen Zone (siehe Abb. 3) jeweils die maximale Amplitude bestimmt und anschließend der Mittelwert aus jedem Schnitt in dieser Zone gebildet.

Die Zonen sind relativ zur Vorder- und Hinterkante des Schadens positioniert. Um die Amplituden der von S_0 zu A_0 umgewandelten Wellenpakete zu bestimmen, sind Bereiche mit geringen Störschwingungen gewählt. Unten in Abb. 3 ist zu sehen, dass in mehrere Zonen für diese A_0 -Moden nach der Interaktion mit Schäden differenziert wird. In verschiedenen Untersuchungen ist zu sehen, dass die Welle im Bereich des Schadens „gefangen ist“, also jeweils an der Hinter- und Vorderkante des Schadens reflektiert. Sodass sich die A_0 -Mode zeitlich verteilt vor und hinter dem Schaden ausbreitet. (Beispiele sind Abb. 3 (unten), als auch eine Simulationen [5]) Um diesen Effekt abzubilden und erfassen zu können sind hier jeweils drei Zonen festgelegt. Die Lage der Zonen zur Berechnung der Charakteristika ist aus der Abb. 3 zu entnehmen.

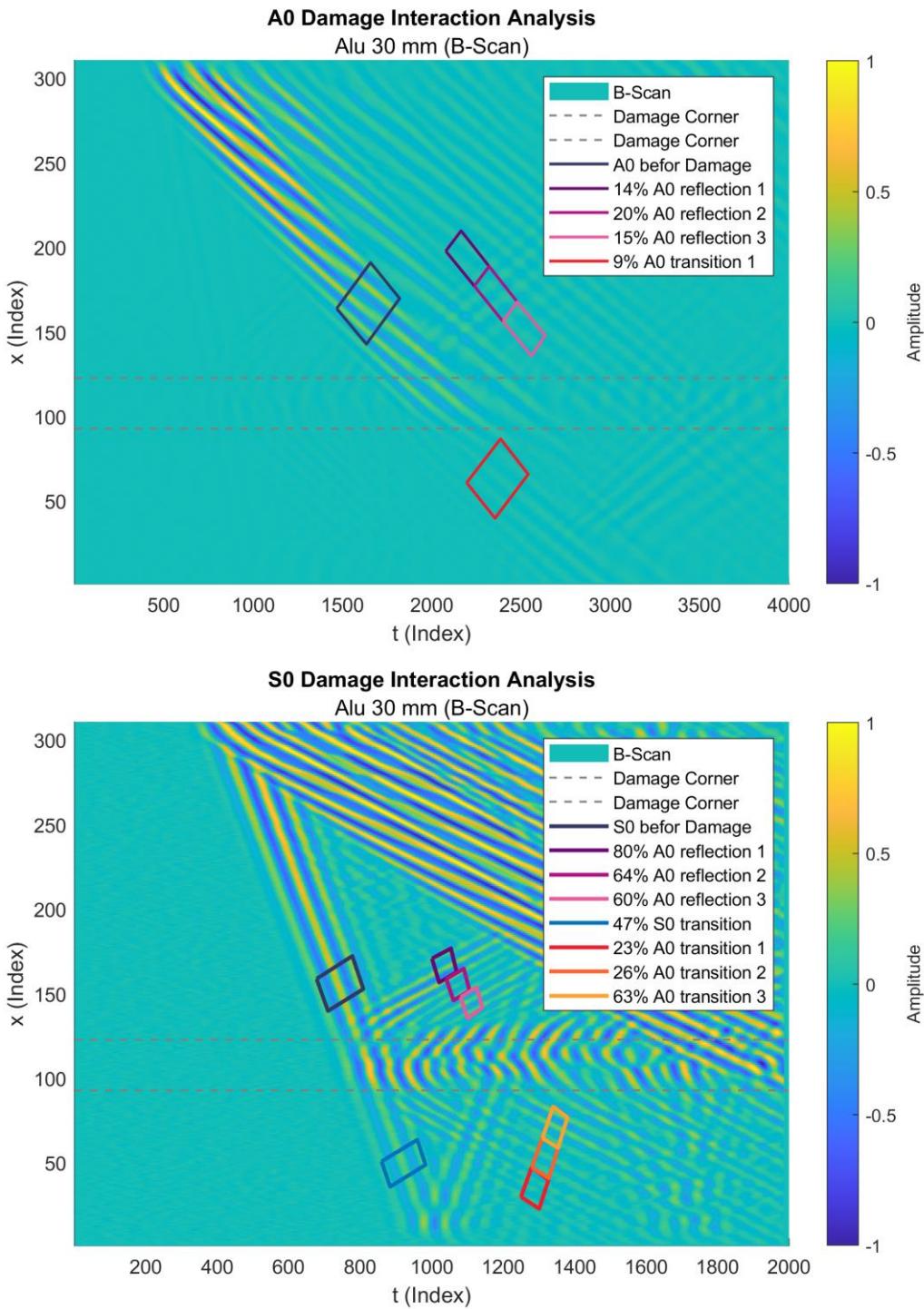


Abb. 3 B-Scan mit eingezeichneten Analysezonen für die Bestimmung der Interaktionscharakteristika (oben: A₀-Anregung, unten: S₀-Anregung)

Da die Amplitude der auftreffenden Welle variiert, je nachdem wie groß der Schaden ist, werden die Zonenamplituden im Verhältnis zur gemittelten Amplitude der auftreffenden Welle erfasst. Die Referenzzone ist als „S₀ bevor Damage“ gekennzeichnet.

3. Kritische Betrachtung der Kennwerte

Folgend wird anhand der Charakterisierung verschiedener Platten ohne Schaden diskutiert, wie reproduzierbar die Methodik ist. Anschließend wird die Methode der Charakterisierung von Lamb-Wellen-Schadensinteraktionen anhand einiger Beispiele betrachtet.

Tabelle 1. Charakteristika betrachtet für 7 verschiedene Platten zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit

Prozent der Amplitude vor dem Schaden	A0				S0						
	A0 Reflection 1 %	A0 Reflection 2 %	A0 Reflection 3 %	A0 transition %	A0 reflection 1 %	A0 reflection 2 %	A0 reflection 3 %	S0 transition %	A0 transition 1 %	A0 transition 2 %	A0 transition 3 %
Platte 1	9	8	8	43	17	17	21	81	23	19	16
Platte 2	11	9	9	46	13	12	21	82	15	16	13
Platte 3	7	6	6	43	13	14	20	81	15	16	12
Platte 4	8	7	7	49	17	16	20	81	22	14	16
Platte 5	7	6	6	55	21	19	21	81	15	20	16
Platte 6	8	7	6	59	20	20	23	83	17	22	18
Platte 7	9	8	7	47	15	13	21	86	27	25	17
Standardabweichung	1	1	1	6	3	3	1	2	5	4	2
Standardabweichung (%)	17	15	16	12	19	19	5	2	25	20	14

Tabelle 1 führt die ermittelten Charakteristiken für verschiedene Platten auf und stellt somit eine Grundlage für die Bewertung der Reproduzierbarkeit des Versuches. Unten in der Tabelle ist die Standardabweichung der jeweiligen Spalte dargestellt, darunter die Standardabweichung in Relation zum Mittelwert. Die relative Standardabweichung bleibt bis auf einmal unter 20%. Eine geringere Variation wäre wünschenswert.
Nun wird die Anwendung der Methodik dieses Manuskripts auf eine Auswahl an Schadenskombinationen für die A₀ sowie S₀ Welleninteraktionen dargestellt.

Tabelle 2. Charakteristika der A₀-Welleninteraktion

A0					
Prozent der Amplitude vor dem Schaden	%	%	%	%	%
Leere Platte	-	8	7	6	59
HDPE + Kleber 1	25 mm	13	14	15	31
Stahl + Kleber 1	20 mm	29	11	6	10
Stahl + Kleber 2	30 mm	11	7	5	21
Impact 7,5 J		17	31	17	48

Tabelle 2 führt für verschiedene Schadensarten die ermittelten Charakteristiken auf. Dabei werden Versuche einer Platte ohne Schaden, mit aufgeklebten Plättchen verschiedener Materialien und mit einem Impactschaden verglichen. Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Versuche klar durch die Charakteristiken unterscheidbar sind. Vor allem der Zeitpunkt der Reflexion unterscheidet sich stark zwischen den Pseudoschäden mit Kleber 1 und dem Impact-Schaden. Bei den beiden Klebstoffen ist auch ein stark unterschiedlicher Einfluss detektierbar.

Tabelle 3. Charakteristika der S_0 -Welleninteraktion

S0		A0 reflection 1		A0 reflection 2		A0 reflection 3		S0 transition		A0 transition 1		A0 transition 2		A0 transition 3	
Prozent der Amplitude vor dem Schaden		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Leere Platte	-	20	20	23	83	17	22	18							
Acryl + Kleber 1	25 mm	46	79	89	56	44	100	62							
Aluminium + Kleber 1	25 mm	97	94	74	32	44	71	93							
HDPE + Kleber 1	25 mm	22	21	27	66	26	51	45							
Stahl + Kleber 2	30 mm	25	26	25	69	23	21	23							

Tabelle 3 zeigt die charakteristischen Merkmale der S_0 Modeninteraktion. Auch hier sind zwischen den verschiedenen Kombinationen an Klebstoff und geklebten Material klare Unterschiede in den berechneten Merkmalen zu erkennen.

Schließlich kann gesagt werden, dass trotz der Interferenzen in den Zonen der Analyse der Charakteristika mit dieser vorgestellten Methodik eine aussagekräftige Untersuchung von den Interaktionen der Lamb-Wellen mit Schäden durchgeführt werden kann.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die vorgestellte Analyse der Welleninteraktionen können charakteristische Merkmale von Schäden ermittelt werden, die als Grundlage für die Entwicklung und Verbesserung von Pseudoschäden dienen können. Um diese Wechselwirkungen zu erfassen, wird ein experimenteller Aufbau entwickelt, in dem B-Scans mit einem luftgekoppelten Ultraschallscanner die Welleninteraktionen erfassen. In dieser Arbeit werden die Fundamentalmoden A_0 und S_0 verwendet. Die charakteristischen Merkmale werden anhand ihrer Amplitude vor und nach der Interaktion mit dem Schaden bestimmt. Dabei wird innerhalb definierter Zonen gemittelt, um ungewollte Interferenzen auszugleichen.

Die hier vorgestellte Methodik zur Charakterisierung von Lamb-Wellen-Interaktionen stellt einen wichtigen Schritt in der Weiterentwicklung von Strukturüberwachungssystemen dar. Sie ermöglicht es, die Wechselwirkungen von Lamb-Wellen mit Pseudoschäden zu untersuchen und ist ein Schritt zur qualitativen Validierung von SHM-Systemen. Die Untersuchung der Unterschiede in den Welleninteraktionen von realen Schäden und Pseudoschäden trägt dazu bei, die Grenzen und Möglichkeiten von Pseudoschäden als Testobjekte zu definieren und deren Einsatz im Rahmen der Schadenserkennung zu optimieren. Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Entwicklung und Anwendung dieser Methodik.

In Zukunft kann gegeben falls durch eine Feinabstimmung der Zonen noch eine Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Platten hergestellt werden. Außerdem ist vorgesehen mithilfe dieser Methodik verschiedene Variationen und Kombinationen an Pseudoschäden zu charakterisieren. Somit kann einerseits ein Einblick gegeben werden, welche Interaktionen verbreitete Pseudo-Schäden wie Magnete auf die Wellenausbreitung haben. Und andererseits ist dies ein Startpunkt für das übergeordnete Ziel, dass diese Methodik genutzt werden kann einen Pseudoschaden zu entwickeln, welcher die Welleninteraktionen eines Impact Schadens imitiert.

References

- [1] Groves R. M., 2018, 3.12 Inspection and Monitoring of Composite Aircraft Structures, *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier, pp. 300–311.
- [2] Lammering R., Gabbert U., Sinapius M., Schuster T., and Wierach P., 2017. *Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites*, Springer International Publishing, Cham.
- [3] Moix-Bonet M., Schmidt D., and Wierach P., 2017, Structural Health Monitoring on the SARISTU Full Scale Door Surround Structure, *Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites*, Sinapius M., Moix-Bonet M., Schmidt D., and Wierach P., eds., Springer.
- [4] Huber A., 2018. *Dispersion Calculator*, DLR e.V.
- [5] Wendwoga F. N., Rauter N., and Lammering R., 2023 - 2023, “Finite Element Analysis of Guided Waves in Fiber Metal Laminates with Delaminations,” *10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, Dept. of Mechanical Engineering & Aeronautics University of Patras, Patras, pp. 95–106.