

# Potentiale, Risiken und Herausforderungen der modalen Schallemissionsanalyse bei der Quellenidentifikation in dünnwandigen Faserkunststoffverbunden

Benjamin KELKEL<sup>1</sup>, Johannes WOLL<sup>1</sup>, Julia VOGTMANN<sup>1</sup>, Martin GURKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern

Kontakt E-Mail: benjamin.kelkel@ivw.uni-kl.de

**Kurzfassung.** Die modale Schallemissionsanalyse (MSEA) ermöglicht über die selektive Auswertung der symmetrischen und antisymmetrischen Anteile akustischer Emissionen, Rückschlüsse über die Wirkrichtung der Quelle zu ziehen. In Bezug auf Faserkunststoffverbunde (FKV) können dadurch Quellen mit starker „in-plane“ Charakteristik (z.B. Faserbrüche oder Zwischenfaserbrüche) von denen mit dominantem „out-of-plane“ Charakter (z.B. Delaminationen) unterschieden werden. In der Praxis zieht man hierzu das Amplitudenverhältnis der fundamentalen, antisymmetrischen (A0) und symmetrischen Mode (S0) als zusätzliches Feature für die Quellenidentifikation heran.

Die Aussagekraft dieses A0/S0 Verhältnisses wird im Rahmen dieser Arbeit diskutiert. Dazu werden wichtige Einflussgrößen auf das A0/S0 Verhältnis vorgestellt und im speziellen der Einfluss der Wirkrichtung der Quelle, der Quelltiefe und der Sensorapertur anhand von Finite Element Simulationen quantifiziert. Die Aussagekraft der Simulation wird dabei durch begleitende Experimente mit künstlichen Schallquellen und realen Sensoren unterstützt. Für die Untersuchungen wurde repräsentativ eine unidirektionale Platte aus carbonfaserverstärktem Kunststoff ausgewählt.

Aus der Diskussion der Einflussfaktoren wird deutlich, dass eine Quellenidentifikation anhand eines absoluten A0/S0 Verhältnisses mit Risiken verbunden ist. Dennoch steckt in dem Verhältnis wertvoller Informationsgehalt bzgl. der Wirkrichtung der Quelle, der unter Berücksichtigung der Einflussgrößen abrufbar ist.

## 1. Einführung

Faserkunststoffverbunde (FKV) zeigen aufgrund ihrer heterogenen Struktur und der damit verbundenen anisotropen Eigenschaften komplexe Schädigungsmechanismen auf, deren Entstehung und Interaktion immer noch Teil der Forschung sind. Für ein besseres Verständnis für diesen Werkstoff sind tieferegehende Methoden der Materialcharakterisierung notwendig, welche einen Einblick in das fortschreitende Versagen während mechanischer Belastung gewähren. Die Schallemissionsanalyse bietet als zerstörungsfreies Prüfverfahren das Potential für eine solche Methode. Sie ermöglicht eine inline Identifikation von Schädigungsereignissen über die Detektion der damit verbundenen akustischen Emissionen. Die Schadensklassifizierung erfolgt dabei durch Extraktion charakteristischer Merkmale der akustischen Signale im Zeit- und Frequenzbereich sowie der Korrelation dieser mit parallel



erfassten Schadensbildern aus bildgebenden Prüfverfahren wie der Thermographie, digitalen Bildkorrelation oder Röntgentomographie [1]. In der Vergangenheit konnten über diese Vorgehensweise bereits Merkmale zur Differenzierung von Faser- und Matrixbrüchen in FKV gefunden werden. Hier haben sich Parameter aus dem Frequenzbereich wie die „Peak Frequenz“ und die „gewichtete Peak Frequenz“ als aussagekräftige Merkmale etabliert [2,3]. Diese Parameter spiegeln jedoch nur die Dynamik des Schädigungsereignisses wieder und erfassen damit nur ein Teil des akustischen Fingerabdrucks, den das Schädigungsereignis hinterlässt.

### *1.1.Potentiale der modalen Schallemissionsanalyse*

Zusätzlichen Informationsgehalt bietet die modale Schallemissionsanalyse (MSEA), die bei dünnwandigen Strukturen zum Einsatz kommen kann. Durch die selektive Detektion der fundamentalen symmetrischen (S0) und antisymmetrischen (A0) Lamb Wellen Moden lassen sich durch die MSEA Aussagen über die Wirkrichtung der Quelle ziehen. Dazu wurde das Amplitudenverhältnis von A0/S0 (engl. MAR – „Measured Amplitude Ratio“) als zusätzliches Merkmal für die Quellenklassifizierung vorgeschlagen [4]. Durch die starke „out-of-plane“ (OOP) Charakteristik der A0 Mode (Biegewelle) gegenüber der „in-plane“ (IP) Charakteristik der S0 Mode (Quasi-Kompressionswelle) bietet das Verhältnis der beiden Moden eine Aussage über die Wirkrichtung der Quelle. Die Methode wurde erstmals in den 90er Jahren von Gorman et al. [5] auf Platten aus Aluminium und Verbundwerkstoff mittels Hsu-Nielsen Quelle validiert und fand ab dem Ende der 90er bereits Anwendung bei der Quellenidentifikation in FKV [6-8]. Die MSEA ermöglichte hier Faser- und Zwischenfaserbrüche, welche vorzugsweise zu einer IP Verschiebung führen, von Delaminationen mit starkem OOP Charakter zu unterscheiden. Diese Erkenntnisse wurden in späteren Untersuchungen validiert [9,10].

Neben dem zusätzlichen Informationsgehalt für die Quellenidentifikation bietet die MSEA ebenso Potentiale für die Quellenlokalisierung. Durch die respektive Trennung von der A0 und S0 Mode, kann die zur Schwellwertüberschreitung führende Mode identifiziert werden und deren Gruppengeschwindigkeit für die Berechnung der Quellenposition berücksichtigt werden. Bei unidirektionalen FKV kann bei Ausbreitung in Faserrichtung das Verhältnis der Gruppengeschwindigkeiten von S0 zu A0 aufgrund der Anisotropie bei einem Faktor von 5 liegen [1,11]. Eine falsch angenommene Gruppengeschwindigkeit kann daher zu großen Fehlern bei der Quellenlokalisierung führen. Neben einer Erhöhung der Ortungsgenauigkeit kann mit der MSEA auch die Anzahl der dafür notwendigen Sensoren reduziert werden. Bei Kenntnis der Gruppengeschwindigkeiten von A0 und S0 kann über einen einzigen Sensor, mit dem gemessenen Ankunftszeitunterschied der beiden Moden, bereits die Entfernung zum Sensor abgeschätzt werden [12,13]. Darüber hinaus kann in FKV über den Laufzeitunterschied der beider Moden das Lokalisierungsergebnis über den Winkel der Ausbreitungsrichtung eingegrenzt werden.

### *1.2.Herausforderungen der modalen Schallemissionsanalyse*

Um dieses Potential abrufen zu können, wird der Anwender der MSEA vor Herausforderungen gestellt. Eine der größten Herausforderungen liegt in der selektiven Detektion der fundamentalen A0 und S0 Mode. Während bei unendlich ausgedehnten Körpern eine Trennung über die Laufzeit realisiert werden kann, erschweren Dickensprünge, Anisotropie und Reflektionen in realen FKV Strukturen die Identifikation der primären Wellenpakete beider Moden. Werden Moden höherer Ordnung durch höhere Frequenzen oder Strukturicken ebenfalls angeregt, erscheint eine Trennung gar unmöglich. In der Vergangenheit hat man neben einer zeitlichen Trennung daher zwei weitere Ansätze verfolgt,

die auf dem unterschiedlichen Verschiebungsfeld beider Moden basieren. Da das Verschiebungsfeld der S0 Mode erst mit zunehmender Frequenz transversale Anteile hinzuzugewinnt, wird die S0 Mode bei der klassischen Detektion der OOP Komponente an der Oberfläche nur in den höheren Frequenzen wahrgenommen [11]. Die A0 Mode hingegen ist mit ihrer stark ausgeprägten OOP Charakteristik bereits im niedrigen Frequenzbereich an der Oberfläche messbar. Mit der Kenntnis über die Vorzugsfrequenzen lassen sich über entsprechende Bandpassfilter die A0 bzw. S0 Anteile der Wellenmoden abschätzen [10,14]. Da hier nur bestimmte Frequenzanteile der jeweiligen Moden betrachtet werden und die Amplituden von A0 und S0 zu unterschiedlichen Frequenzen ausgewertet werden, ist das resultierende Verhältnis nur ein Ausschnitt aus der realen Verteilung der A0 und S0 Anteile im Signal. Die zweite Methode beruht auf der Ausnutzung der Symmetrie bzw. Antisymmetrie im Verschiebungsfeld beider Moden. Werden zwei Sensoren an gegenüberliegenden Oberflächen der Struktur konzentrisch zueinander platziert, lassen sich die symmetrischen bzw. antisymmetrischen Wellenanteile über eine Addition bzw. Subtraktion der Sensorsignale berechnen [10,14,15]. Sofern keine Moden höherer Ordnung vorhanden sind, lassen sich damit über die Bandbreite der Sensoren alle Frequenzanteile von A0 und S0 bestimmen und zuverlässige Abschätzungen für die Quellenidentifikation in FKV treffen.

### *1.3.Risiken der modalen Schallemissionsanalyse*

Aussagen über die Wirkrichtung von Schädigungsereignissen in FKV anhand von S0 zu A0 Verhältnissen sind jedoch mit zusätzlichen Risiken verbunden, da das Verhältnis neben der Wirkrichtung der Quelle von weiteren Faktoren abhängt.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Dämpfung von A0 und S0 Mode ist ihr Verhältnis vom Sensor-Quelle-Abstand abhängig. Für ein 12 lagiges, unidirektionales CFK Laminat mit RTM6 Matrix (Wandstärke von 3,4 mm) hat M. Calomfirescu bei einer Frequenz von 300 kHz Dämpfungsfaktoren von 0,025 dB/mm für S0 bzw. 0,15 dB/mm für A0, bei Ausbreitung in Faserrichtung, bestimmt [11]. Bei einem Laufweg von nur 50 mm in Faserrichtung würde sich das Verhältnis von A0/S0 durch die unterschiedliche Dämpfung entsprechend halbieren. Da die Dämpfung in FKV richtungsabhängig ist, wirkt sich neben dem Sensor-Quelle-Abstand auch die Ausbreitungsrichtung auf das A0/S0 Verhältnis aus. Senkrecht zur Faserrichtung ergeben sich für das gleiche Laminat Abschwächungsfaktoren von 0,049 bzw. 0,1075 dB/mm für S0 bzw. A0 [11]. Damit würde sich das A0/S0 Verhältnis in dieser Richtung nur um 30 anstelle von 50% reduzieren. Eine Berücksichtigung des Sensor-Quelle-Abstandes sowie der Ausbreitungsrichtung ist beim Vergleich absoluter MAR Werte daher notwendig, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Eine weitere Einflussgröße stellt die Tiefe der Quelle dar. Hamstad et al. konnten durch die Simulation von IP Verschiebungen in unterschiedlichen Tiefen in einer Aluminiumplatte zeigen, dass das A0/S0 Verhältnis über die Tiefe bis hin zur Symmetrieebene abnimmt [16]. Bei einer idealisierten IP Dipol Anregung fiel das Verhältnis von einem Faktor 10, bei einer oberflächennahen Anregung an der Plattenkante unter einen Wert von 0,01 bei Anregung in der Symmetrieebene der Platte. Ein Unterschied von drei Größenordnungen, trotz gleicher Orientierung der Kraftwirkung der Quelle. Die Ursache liegt in dem Verschiebungsfeld der Moden begründet. Eine IP Anregung nahe der Plattenoberfläche führt aufgrund der asymmetrischen Belastung bevorzugt zur Ausbildung einer Biegewelle und somit einer antisymmetrischen Mode. Eine symmetrische IP Anregung in der Plattenmitte führt zu einer Kompressionswelle und damit zu einer S0 Mode. Baker et al. und Oz et al. konnten dieses Verhalten bei Zugversuchen von bi-axialen (0°/90°) Laminaten bestätigen [17,18]. Die Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen in 90° Lagen

unterschiedlicher Tiefe, lieferte stark unterschiedliche Peak Frequenzen, die auf eine Änderung im Modenspektrum zurückzuführen waren.

Die Sensorapertur ist als eine weitere Einflussgröße zu nennen. Bei geführten Wellen kann es zur Auslöschung von Signalanteilen kommen, wenn die Wellenlänge der akustischen Welle in die Größenordnung der lateralen Abmessungen des Sensors fällt. Dieser sogenannte Apertureffekt resultiert aus der Integrierung der Verschiebungskomponenten über die aktive Sensorfläche [19]. Aufgrund der niedrigeren Phasengeschwindigkeiten der A0 Mode gegenüber der S0 Mode, wirkt sich der Apertureffekt verstärkt auf die kurzwelligere A0 Mode aus und führt absolut betrachtet zu einem kleineren A0/S0 Verhältnis. Durch die komplette Auslöschung von A0 bzw. S0 Mode zu bestimmten Frequenzen können sich zudem lokale Minima bzw. Maxima im A0/S0 Verhältnis ausbilden.

#### 1.4. Zielsetzung und Struktur der Arbeit

In dieser Arbeit sollen die Quelltiefe und die Sensorapertur als Einflussgrößen auf das A0/S0 Verhältnis in FKV näher untersucht werden. Bzgl. der Quelltiefe soll überprüft werden, ob sich die Erkenntnisse von Hamstad et al. auf FKV übertragen lassen. Dazu werden Hsu-Nielsen Quellen in unterschiedlichen Tiefen an der Kante einer repräsentativen CFK Platte experimentell erzeugt und simulativ nachgebildet. Neben IP Quellen werden hier ebenso OOP Quellen untersucht. Durch Variation der Sensorapertur in der Simulation soll der Einfluss des Apertureffektes bei der Bestimmung des A0/S0 Verhältnisses für eine beispielhafte IP Anregung abgeschätzt werden.

Im Folgenden wird zunächst das Probenmaterial für die Untersuchungen vorgestellt, sowie der Aufbau der Simulation und Experimente beschrieben. Im Anschluss an die Erläuterung der Auswertemethodik zur Berechnung der A0/S0 Verhältnisse, werden zuerst die Einflüsse von Quelltiefe und Sensorapertur ausgehend von den Simulationsergebnissen bewertet. Zum Schluss folgen die experimentellen Untersuchungen zum Quelltiefeinfluss und der direkte Vergleich mit den Simulationen.

## 2. Probenmaterial

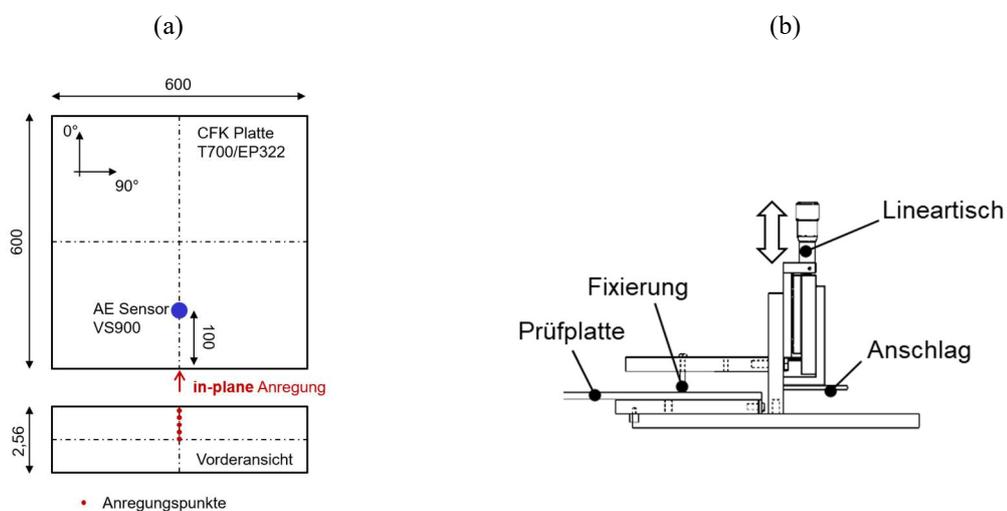
Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine 600 x 600 mm große Platte aus 12 unidirektionalen Prepreglagen der Fa. SGL (Faser: T700 12K 50C, Matrix: EP322) zu einem unidirektionalen Laminat  $(0^\circ)_{6s}$  aufgebaut und im Autoklav nach den Herstellerangaben (125°C, 8 bar, 1h) ausgehärtet. Die Platte weist eine Dicke von 2.56 mm und einen theoretischen Faservolumengehalt von 53 % auf. Da für das Faser/Matrix System von SGL die elastischen Konstanten nicht zur Verfügung standen, wurden die Kennwerte des Systems AS4/3501-6 mit 60% Faservolumengehalt aus Tabelle 1 als repräsentative Kennwerte für die FEM Simulationen ausgewählt.

**Tabelle 1:** Repräsentative elastische Kenngrößen einer AS4/3501-6 Einzelschicht mit 60% Faservolumengehalt [20]

Parameter	Bezeichnung	Wert
Elastizitätsmodul	$E_1$	126 GPa
	$E_2 = E_3$	11 GPa
Schubmodul	$G_{12} = G_{13}$	6,6 GPa
	$G_{23}$	3,9 GPa
Querkontraktionszahlen	$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,28
	$\nu_{23}$	0,4
Dichte	$\rho$	1570 kg/m <sup>3</sup>

### 3. Experimenteller Aufbau

Die nach ASTM E976 standardisierte Hsu-Nielsen Quelle wurde als repräsentative Quelle für die Erzeugung akustischer Emissionen ausgewählt. Die Bleistiftmine wurde mithilfe einer Vorrichtung (siehe Abbildung 1b) an der Plattenkante in vier unterschiedlichen Tiefen (0,42 mm, 0,8 mm, 0,99 mm und 1,28 mm) gebrochen, um den Einfluss der Quelltiefe auf das akustische Signal einer künstlichen IP Quelle zu untersuchen. Die resultierende Welle in Faserrichtung wurde mit einem VS900 Sensor im Abstand von 100 mm zur Quelle erfasst und nach Vorverstärkung mit einem AEP4 Vorverstärker über ein Vallen AMSY 5 System digitalisiert und mit einer Aufnahmerate von 10 MHz aufgezeichnet (Aufbau siehe Abbildung 1a). In jeder Tiefe wurden für eine statistische Auswertung je 7 Bleistiftminenbrüche durchgeführt. Die Signale wurden für die weitere Analyse mithilfe eines Bandpassfilters auf den sensitiven Bereich des Sensors von 95 bis 850 kHz beschränkt.

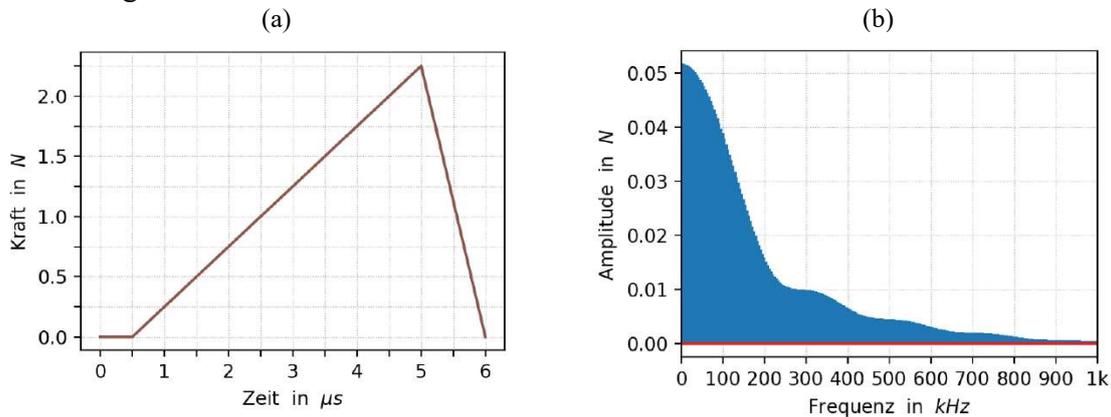


**Abbildung 1:** Experimenteller Aufbau (a) und Vorrichtung (b) zur reproduzierbaren Erzeugung von IP Hsu-Nielsen Quellen mittels Bleistiftminenbruch an der Plattenkante

### 4. Simulativer Aufbau

Die Simulationen wurden in 2D mithilfe der FEM Software Abaqus 2017 durchgeführt. Dazu wurde eine 1000 mm lange Platte mit einer Dicke von 2,56 mm an einem Ende fest eingespannt und mittels quadratischer CPE4R Elemente (C: Kontinuum, PE: Ebener Dehnungszustand, 4: Anzahl Knotenpunkte pro Element, R: Reduziert integriert) diskretisiert. Die Kantenlänge der Elemente betrug 0,32 mm, so dass sich 8 Elemente und 9 Knoten in Dickenrichtung der Platte ergaben. Zur Anregung wurde ein definierter Kraftverlauf, in Anlehnung an die HSU-Nielsen-Quelle, in jeweils einzelne Knoten am freien Ende der Platte eingeleitet. Somit ergaben sich für die Simulation der Wellenausbreitung 5 verschiedene Anregungstiefen (0,00 mm; 0,32 mm; 0,64 mm; 0,96 mm und 1,28 mm). Die Simulationen wurden sowohl mit IP Anregung (Krafteinleitung in x-Richtung), als auch mit OOP Anregung (Krafteinleitung in y-Richtung) durchgeführt. Als repräsentatives Anregungssignal wurde der dreieckförmige Kraftverlauf in Abbildung 2 angenommen, der den simulativen Ergebnissen aus [21] nachempfunden ist (Anstiegszeit 4,5  $\mu$ s, Abklingzeit 1  $\mu$ s). Auf der Platte wurden symmetrisch um den Abstand von 100 mm zur Plattenkante 57 Punkte im Abstand von 0,32 mm zueinander für die Erfassung der IP und OOP Verschiebungskomponenten  $u_x$  bzw.  $u_y$  der Welle festgelegt. Die feine Diskretisierung der Messpunkte wurde zur Berücksichtigung der aktiven Apertur des Sensors gewählt. Dazu wurde aus den 57 Signalen der Mittelwert berechnet, der über die lokale Sensorbreite

gewichtet wurde. Das Zeitinkrement für die Simulationen (explizites Lösungsverfahren) betrug konstant  $10^{-8}$  s. Eine modenselektive Dämpfung wurde für die Simulationen nicht berücksichtigt.



**Abbildung 2:** Angenommener Kraftverlauf (a) und resultierendes Amplitudenspektrum (b) für die Hsu-Nielsen Anregung nach [21]

## 5. Auswertemethodik

### 5.1 Experiment

Für die Bestimmung des A0/S0 Verhältnisses in Abhängigkeit der Frequenz wurden die resultierenden Signale aus den Experimenten mithilfe der kontinuierlichen Wavelet-Transformation in den Zeit-Frequenzbereich überführt. Dazu wurde als Mutter-Wavelet das komplexe Morlet-Wavelet mit einer Mittenfrequenz und einer Bandbreite von 1 Hz ausgewählt. Durch die unterschiedlichen Gruppengeschwindigkeiten von S0 und A0 Mode und den gewählten Sensor-Quelle-Abstand von 100 mm, konnten die beiden Moden über eine zeitliche Grenze getrennt voneinander ausgewertet werden. Dazu wurde für jede Frequenz der maximale Betrag der Waveletkoeffizienten in dem jeweiligen Zeitfenster bestimmt und als repräsentative Amplitude für A0 bzw. S0 Mode herangezogen.

### 5.2 Simulation

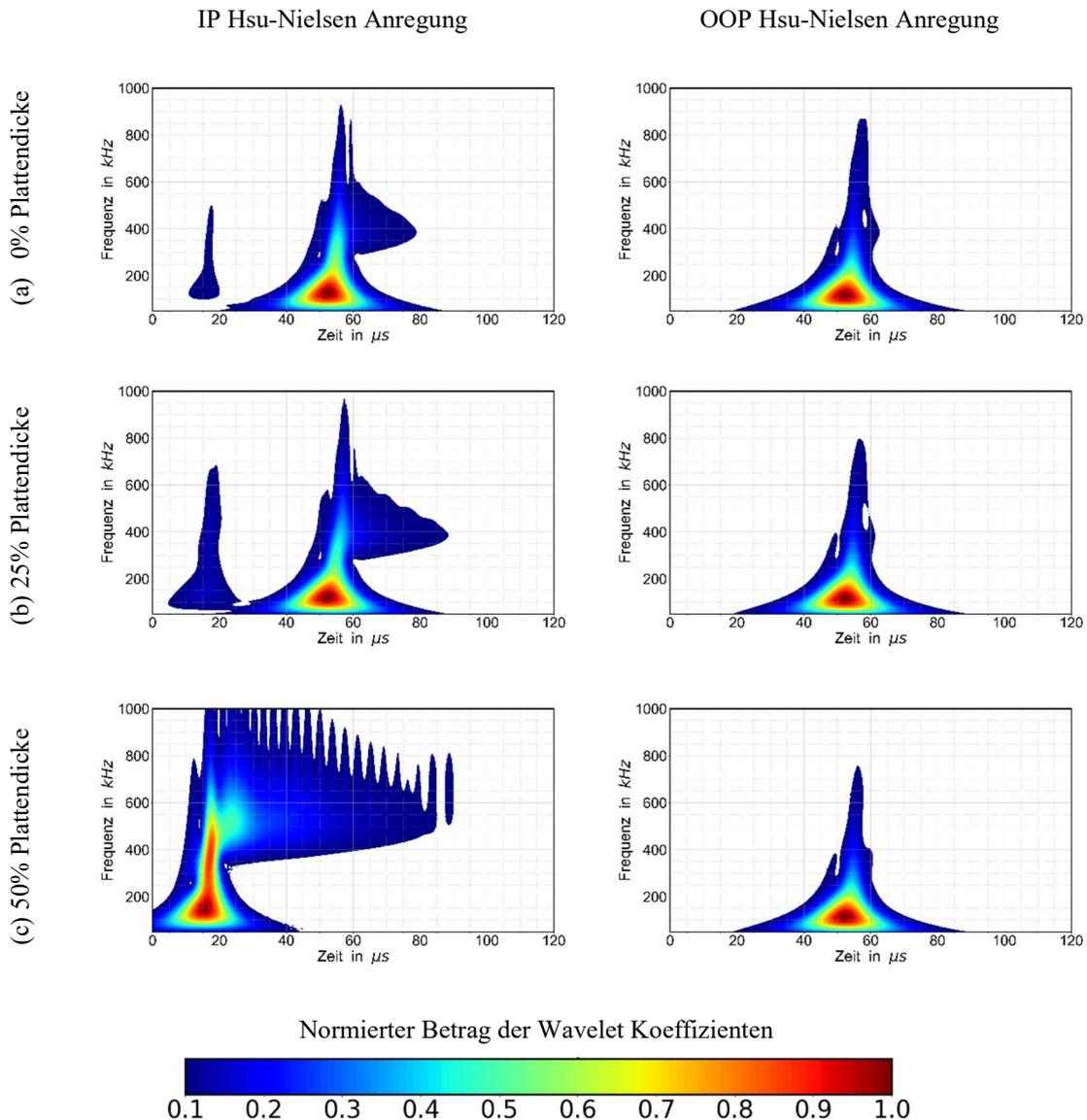
Bei der Simulation konnten die A0 und S0 Signalanteile direkt über eine Addition bzw. Subtraktion der OOP Verschiebungen an der Ober- bzw. Unterseite der Prüfplatte extrahiert werden. Durch Abschneiden der Signale vor Eintreffen der ersten Reflektion und Überführung in den Frequenzraum mittels FFT, konnten die Amplituden von S0 und A0 frequenzabhängig bestimmt werden. Für die Vergleichbarkeit mit den experimentellen Ergebnissen wurden die  $u_y$  Verschiebungskomponenten vor der Weiterverarbeitung mit einem Butterworth Bandpassfilter 4. Ordnung zwischen 95 und 850 kHz gefiltert. Aufgrund der Anwesenheit höherer Moden, war eine quantitative Auswertung der A0/S0 Verhältnisse nach der beschriebenen Methodik nur bis zu einer Frequenz von 350 kHz möglich

## 6. Ergebnisse & Diskussion

### 6.1. Simulation: Einfluss der Quelltiefe und Quellencharakteristik

Der Einfluss der Quelltiefe bei IP und OOP Hsu-Nielsen Anregung ist in Abbildung 3 anhand der Simulationsergebnisse einzusehen. Dazu sind die auf das Maximum normierten Waveletspektren in drei relativ zur Plattendicke (0%, 25%, 50%) bezogenen Anregungstiefen dargestellt. Als Signal wurde die OOP Verschiebungskomponente  $u_y$  in einem Punkt in 100

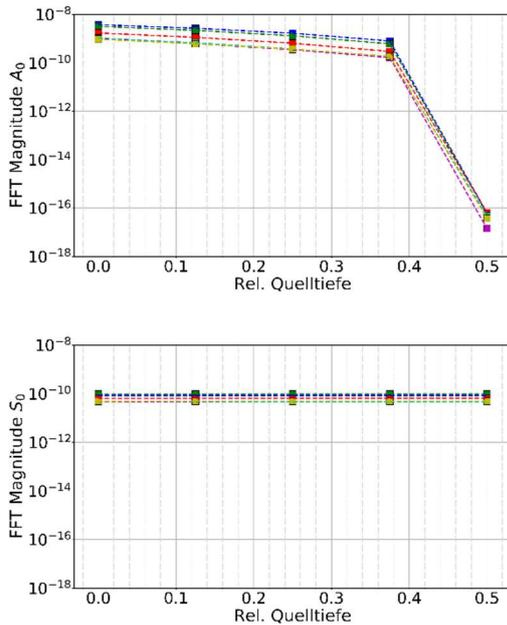
mm Abstand zur Quelle an der Plattenoberfläche herangezogen. Bei der IP Anregung wird ein deutlicher Einfluss der Quelltiefe auf das resultierende akustische Signal sichtbar. Während bei oberflächennaher Anregung die A0 Mode das Waveletspektrum dominiert, gewinnt die S0 Mode mit steigender Anregungstiefe, bis hin zur Symmetrieebene der Platte, mehr an Bedeutung. Bei Betrachtung der S0 und A0 Amplituden in Abbildung 4 wird dieser Sachverhalt nochmals deutlich. Die A0 Amplitude fällt ausgehend von der oberflächennahen Anregung um acht Größenordnungen mit steigender Quelltiefe bis zur Symmetrieebene, während die S0 Amplitude konstant bleibt. Da die A0 Mode in der Symmetrieebene keine IP Komponente aufweist, wird sie über eine IP Anregung in der Symmetrieebene auch nicht angeregt.



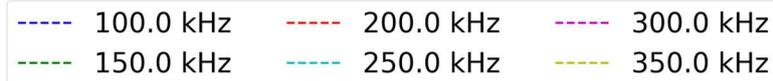
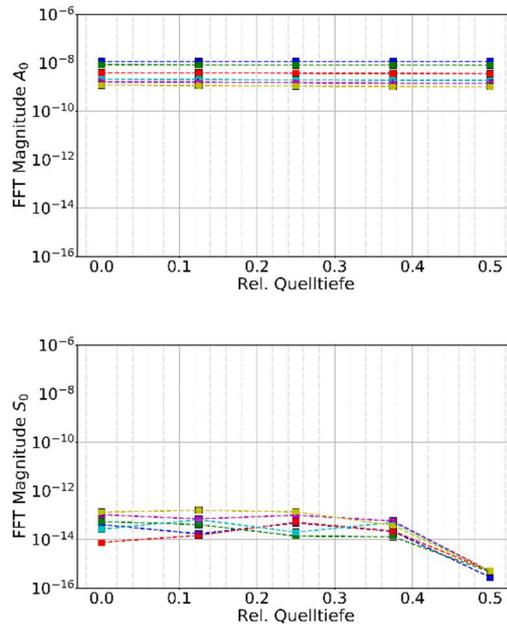
**Abbildung 3:** Einfluss der Quellcharakteristik (links: IP, rechts: OOP) und der rel. Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke ((a): 0%, (b): 25%, (c): 50%) auf die resultierenden akustischen Signale unter Annahme einer künstlichen Anregung durch eine Hsu-Nielsen Quelle.

Bei OOP Anregung hingegen überwiegt der A0 Mode über die betrachteten Quelltiefen und es kommt zu keinem signifikanten Einfluss der Quelltiefe auf die Amplituden von A0 und S0 Mode.

(a) IP Hsu-Nielsen Anregung

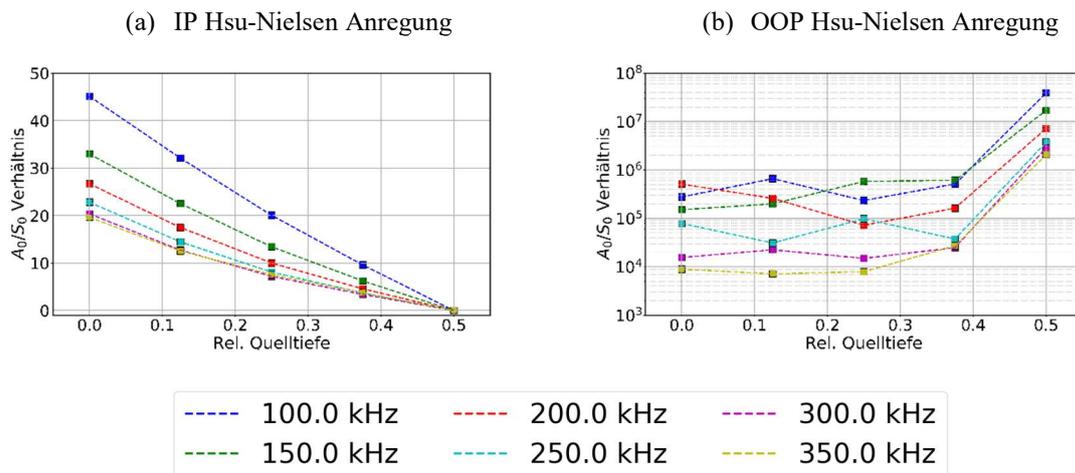


(b) OOP Hsu-Nielsen Anregung



**Abbildung 4:** Fourier Amplituden von  $A_0$  und  $S_0$  Mode in Abhängigkeit der Quellcharakteristik (links: IP, rechts: OOP), der Frequenz und der relativen Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke

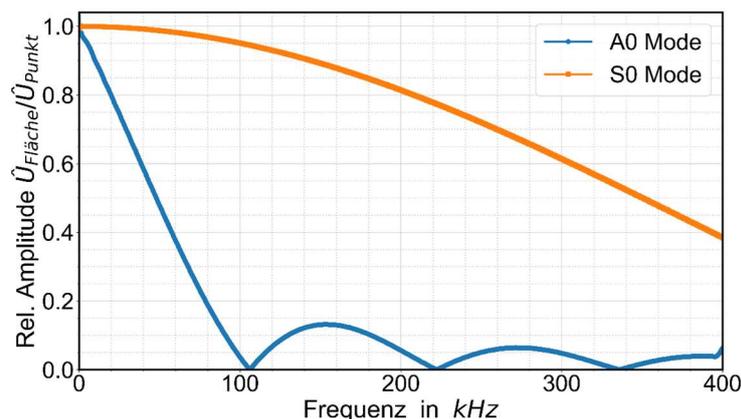
Die resultierenden  $A_0/S_0$  Verhältnisse von IP und OOP Anregung aus Abbildung 5 unterscheiden sich entsprechend deutlich voneinander. Bei IP Anregung zeigt sich ein nahezu linearer Abfall im  $A_0/S_0$  Verhältnis mit steigender Quelltiefe bis zur Symmetrieebene. Bei OOP Anregung ist kein systematischer Zusammenhang zwischen  $A_0/S_0$  Verhältnis und Quelltiefe erkennbar. Hier zeigt sich jedoch bei Anregung in der Symmetrieebene der Platte ein deutlicher Sprung im  $A_0/S_0$  Verhältnis, der auf den Abfall in der  $S_0$  Amplitude zurückzuführen ist. Die absoluten Verhältnisse bei IP und OOP Anregung unterscheiden sich um mehrere Größenordnungen, so dass trotz des starken Tiefeneinflusses bei der IP Anregung eine Zuordnung bzgl. der Quellcharakteristik (IP oder OOP) möglich wäre.



**Abbildung 5:** Verhältnis von A0/S0 Mode in Abhängigkeit der Quellcharakteristik (links: IP, rechts: OOP)), der Frequenz und der relativen Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke

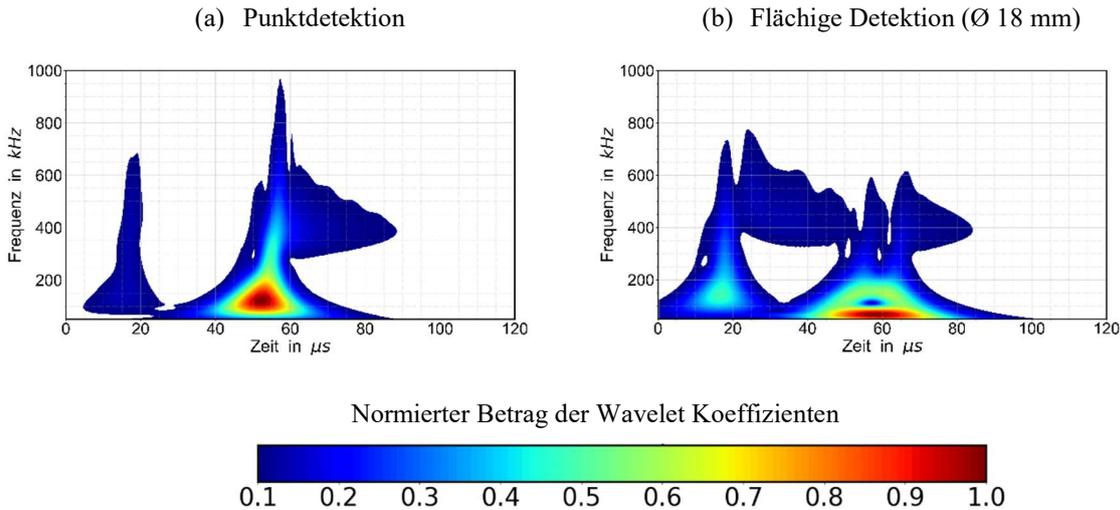
### 6.2. Simulation: Einfluss der Sensorapertur

Im Vergleich zu einer punktförmigen Detektion kommt es bei einer flächigen Detektion aufgrund des Apertureffektes des Sensors zur Auslöschung bestimmter Frequenzanteile. Abbildung 6 macht dies anhand des Verhältnisses der resultierenden OOP Verschiebungskomponenten von flächiger zu punktförmiger Detektion deutlich. Aufgrund der kleineren Phasengeschwindigkeiten wirkt sich der Apertureffekt bereits bei niedrigen Frequenzen deutlich auf die resultierende A0 Amplitude aus, während es für die S0 Mode im betrachteten Frequenzbereich noch zu keiner kompletten Auslöschung gekommen ist.



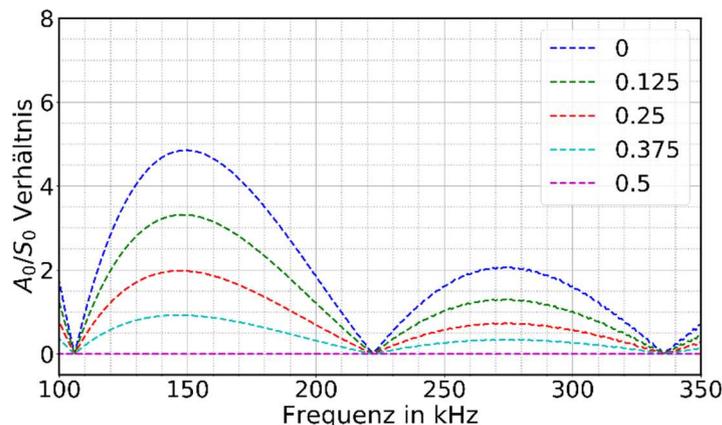
**Abbildung 6:** Verhältnis der resultierenden OOP Verschiebungskomponenten von flächiger zu punktförmiger Detektion in Abhängigkeit der Frequenz für die A0 (blau) und S0 (orange) Mode (Angenommener Sensordurchmesser: 18 mm)

Bei Betrachtung der resultierenden Waveletspektren von punktförmiger und flächiger Detektion in Abbildung 7 sind die Einbrüche im Spektrum des A0 Wellenpaketes und die Verschiebung des Maximums zu niedrigeren Frequenzen deutlich sichtbar.



**Abbildung 7:** Einfluss der Sensorapertur ((a): punktförmige Detektion, (b): flächige Detektion) auf die resultierenden akustischen Signale bei IP Anregung in 25% rel. Quelltiefe unter Annahme eines Sensordurchmessers von 18 mm.

Abbildung 8 stellt das A0/S0 Verhältnis in Abhängigkeit der rel. Quelltiefe und Frequenz bei IP Hsu-Nielsen Anregung für eine flächige Detektion dar. Im Gegensatz zur punktförmigen Detektion ist bei der flächigen Detektion das absolute A0/S0 Verhältnis durch die stärkere Abschwächung des A0 Modes kleiner und kann durch die Auslöschung von A0 bzw. S0 Mode zu bestimmten Frequenzen lokale Minima bzw. Maxima bilden.

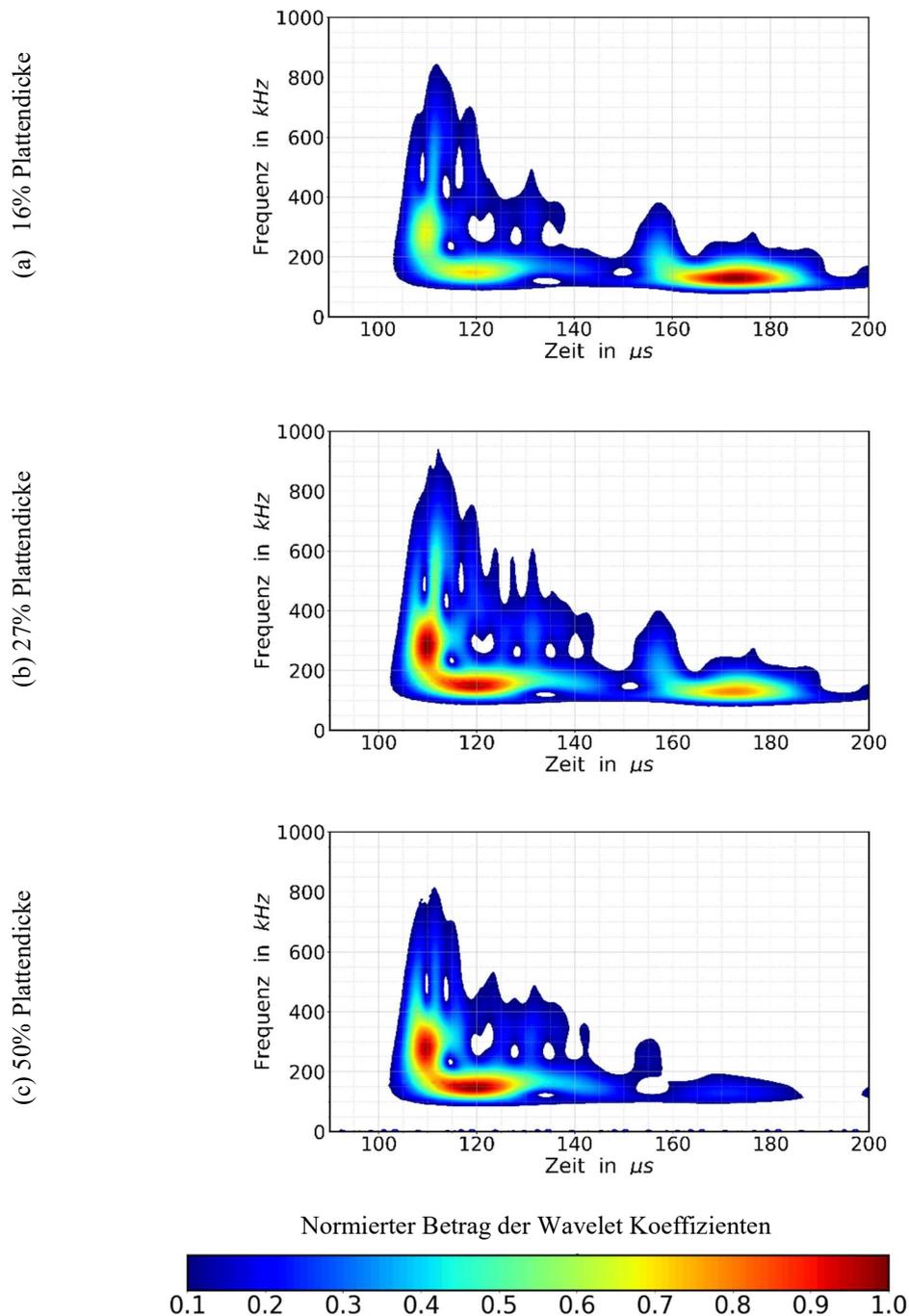


**Abbildung 8:** A0/S0 Verhältnis in Abhängigkeit der Frequenz und der rel. Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke für IP Hsu-Nielsen Anregung und flächige Detektion unter Annahme eines Sensordurchmessers von 18 mm

### 6.3. Experiment: Einfluss der Quelltiefe bei in-plane Anregung

In Abbildung 9 sind exemplarisch die auf das Maximum normierten Waveletspektren aus den resultierenden akustischen Signalen nach IP Hsu-Nielsen Anregung in 16%, 27% und 50% rel. Tiefe dargestellt. Ähnlich zu Abbildung 3 zeigt sich eine Veränderung in den A0 und S0 Signalanteilen in Abhängigkeit der Quelltiefe. Mit zunehmender Tiefe bis zur Plattenmitte nimmt auch hier die S0 gegenüber der A0 Mode qualitativ zu. Im Gegensatz zu den Simulationsergebnissen ist die Bandbreite beider Moden durch Messrauschen, Materialdämpfung und Aperturereffekt deutlich reduziert. Während die S0 Mode

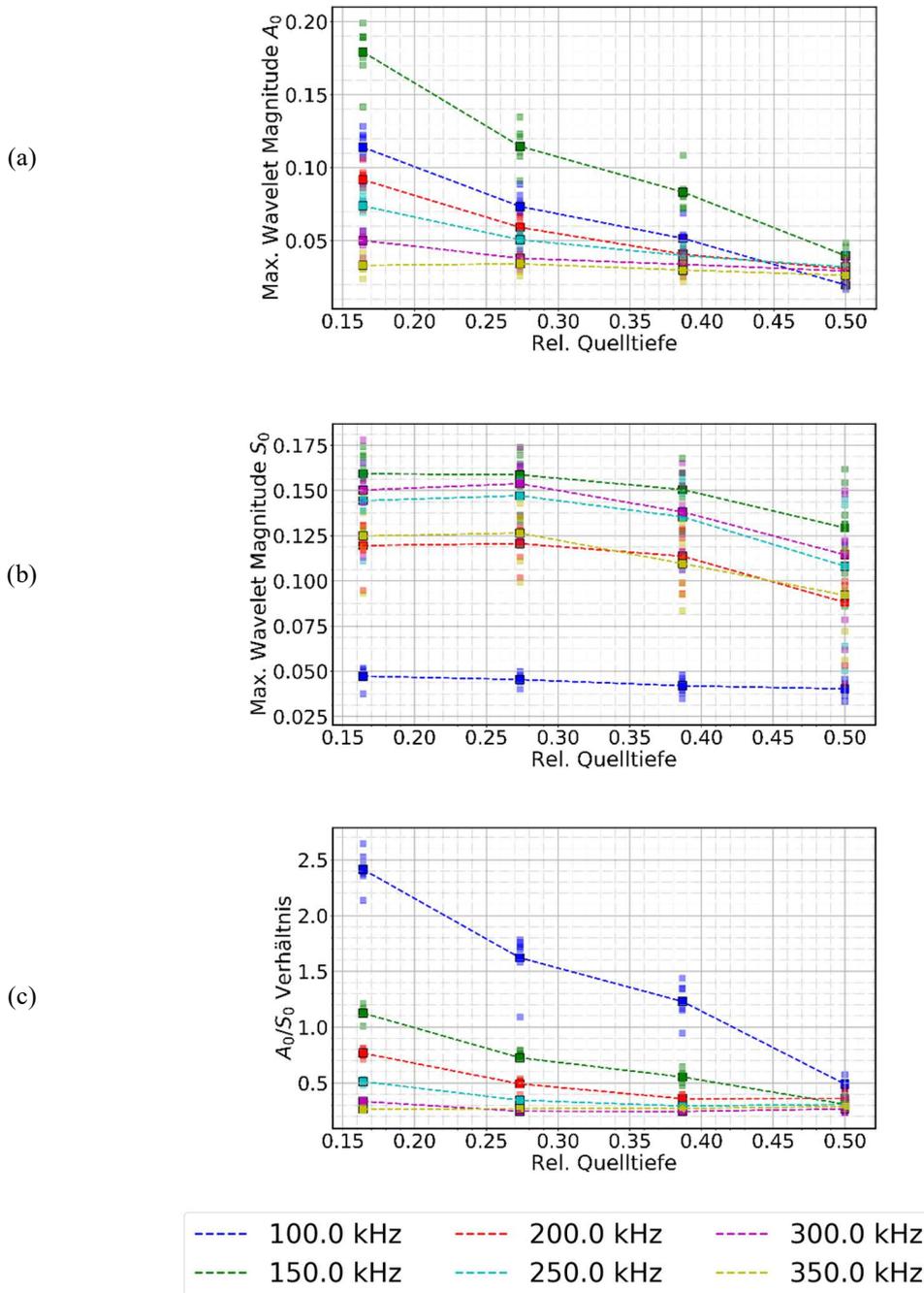
Komponenten bis ca. 800 kHz aufzeigt, ist die A0 Mode aufgrund der stärkeren Dämpfung nur bis ca. 400 kHz messbar. Die Resonanz des Sensors bei ca. 140 kHz wird durch ein deutliches Nachschwingen in den Signalverläufen beider Moden sichtbar.



**Abbildung 9:** Einfluss der rel. Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke ((a): 16%, (b): 27%, (c): 50%) auf die resultierenden akustischen Signale bei IP Anregung durch eine Hsu-Nielsen Quelle. Darstellung der auf das Maximum normierten Waveletkoeffizienten.

Die maximalen S0 und A0 Amplituden, sowie das Verhältnis dieser sind für die 7 Stichproben (hell & klein) inklusive Mittelwert (dunkel & groß) in Abhängigkeit der rel. Quelltiefe in den Abbildungen 10 (a)-(c) dargestellt. Hier zeigt sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf wie bei den Simulationsergebnissen aus Abbildung 4. Die A0 Amplitude nimmt mit

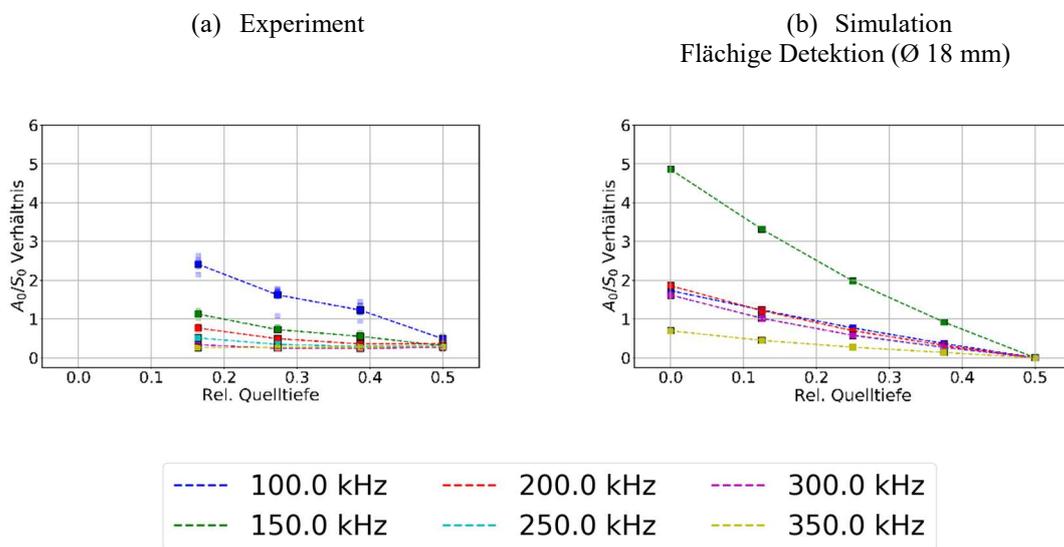
steigender Tiefe bis zur Plattenmitte ab, während die S0 Amplitude nahezu konstant bleibt, so dass sich insgesamt ein fallendes A0/S0 Verhältnis in Abhängigkeit der Quelltiefe ergibt. Auch hier gilt: Je höher die Frequenz, desto flacher verläuft die Kurve des A0/S0 Verhältnisses in Abhängigkeit der Anregungstiefe.



**Abbildung 10:** Maximale Wavelet Koeffizienten von A0 (a) und S0 Mode (b) sowie das Verhältnis zwischen A0 und S0 Mode (c) in Abhängigkeit der Frequenz und der relativen Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke

#### 6.4. Vergleich zwischen Simulation und Experiment für in-plane Anregung

Ein direkter Vergleich zwischen Simulation und Experiment bzgl. der resultierenden A0/S0 Verhältnisse nach IP Hsu-Nielsen Anregung ist in Abbildung 11 zu sehen. Hier wurden die Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der Sensorapertur nach der Auswertemethodik der Experimente mittels Wavelet-Transformation ausgewertet. Hierdurch ist eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Der abfallende Trend des A0/S0 Verhältnisses mit steigender Quelltiefe wird in beiden Betrachtungen sichtbar. Das absolute Verhältnis wird in der Simulation gegenüber dem Experiment jedoch noch überschätzt. Dies kann u.a. mit der stärkeren Dämpfung von A0 gegenüber S0 in CFK begründet werden, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Zudem wurden lediglich 2D-Simulationen durchgeführt, welche die Entstehung und Ausbreitung räumlicher Wellen nicht allumfassend abbilden können.



**Abbildung 11:** Experimentell (a) gegenüber simulativ (b) ermitteltem Verhältnis von A0 zu S0 Mode bei einer IP Hsu-Nielsen Anregung in Abhängigkeit der Frequenz und der relativen Quelltiefe bezogen auf die Plattendicke

#### Fazit

Die modale Schallemissionsanalyse bietet wertvollen Informationsgehalt bzgl. der Orientierung der Kraftwirkung von Quellen, die bei der Identifizierung von Schädigungsereignissen in FKV genutzt werden kann, um beispielsweise Delaminationen mit starkem OOP Charakter von Faser- und Zwischenfaserbrüchen mit starkem IP Charakter zu trennen. Herausforderungen und Risiken bestehen bezüglich der modenselektiven Erfassung und Interpretation des A0/S0 Verhältnisses unter Berücksichtigung zahlreicher Einflussgrößen wie dem Sensor-Quelle-Abstand, der Quelltiefe und der Sensorapertur.

Im Hinblick auf den Einfluss der Quelltiefe konnte für eine unidirektionale CFK Platte über Simulationen und Experimente bestätigt werden, dass bei IP Anregung das A0/S0 Verhältnis mit der Quelltiefe sinkt. Bei OOP Anregung dominiert die A0 Mode und es kommt aufgrund des geringen S0 Anteils zu keinen signifikanten Änderungen im A0/S0 Verhältnis über die Quelltiefe. OOP und IP Anregungen konnten beim Vergleich der absoluten A0/S0 Verhältnisse trotz stark ausgeprägtem Tiefeneinfluss bei der IP Anregung voneinander getrennt werden.

Die Sensorapertur wirkt sich im niedrigen Frequenzbereich besonders stark auf die kurzwelligere A0 Mode aus, wodurch das A0 zu S0 Verhältnis im Vergleich zu einer

punktförmigen Detektion reduziert wird. Weiterhin kommt es über das gesamte Spektrum zur Ausbildung von lokalen Minima und Maxima im Modenverhältnis, die bei der Interpretation zu beachten sind.

Die Ergebnisse und Diskussion unterstreichen, dass nur unter Einbezug der Einflussgrößen auf das Modenverhältnis von A0 zu S0 zuverlässige Aussagen über die Wirkrichtung von Quellen in FKV getätigt werden können.

## Referenzen

- [1] Sause, M.G.R., *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites – Theory, Basic Concepts, Methods and Applications*, Springer Series in Materials Science 242, 2016
- [2] Sause, M.G.R., Müller, T., Horoschenkoff, A., Horn, S., *Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis*, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, 2012, pp. 167-174
- [3] Sause, M.G.R., Gribov, A., Unwin, A.R., Horn, S., *Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals*, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 33, 2012, pp. 17-23
- [4] Carter, D., *Acoustic emission techniques for structural integrity monitoring of steel bridges*, PhD Thesis, 2000, Cardiff University
- [5] Gorman, M.R., Prosser, W.H., *AE Source Orientation by Plate Wave Analysis*, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 9, 1991, pp. 283-288
- [6] Surgeon, M., Wevers, M., *Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates*, *NDT&E International*, Vol. 32, 1999, pp.311-322
- [7] Prosser, W.H., Jackson, K.E., Kellas, S., Smith, B.T., McKeon, J., Friedman, A. – *Advanced, Waveform Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites*, *Materials Evaluation*, Vol. 53, 1995, pp. 1052-1058
- [8] Downs, K.S., Hamstad, M.A., *Wave propagation effects relative to AE source distinction of wideband AE signals from a composite pressure vessel*, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 14, 1996, pp. 61-73
- [9] Johnson, M., Gudmundson, P., *Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates*, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 2803-2818
- [10] Martínez-Jequier, J., Gallego, A., Suárez, E., Juanes, F.J., Valea, Á, *Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis*, *Composites: Part B*, Vol. 68, 2015, pp. 317-326
- [11] Calomfirescu, M., *Lamb Waves for Structural Health Monitoring in Viscoelastic Composite Materials*, PhD Thesis, 2008, Universität Bremen
- [12] Jiao, J., He, C., Wu, B., Fei, R. Wang, X., *Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, 2004, pp. 427-431
- [13] Surgeon, M., Wevers, M., *One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories*, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 265, 1999, pp. 254-261
- [14] Dahmene, F., Yaacoubi, S., Mountassir, M. El, Bendaoud, N., Langlois, C., Bardoux, O., *On the modal acoustic emission testing of composite structures*, *Composite Structures*, Vol. 140, 2016, pp. 446-452
- [15] Ono, K., Gallego, A., *Attenuation of Lamb waves in CFRP plates*, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 30, 2012, 109-123

- [16] Hamstad, M.A., O' Gallagher A., Gary J., *A wavelet transform applied to acoustic emissions signals: Part 1 : Source identification*, Journal of Acoustic Emission, Vol. 20, 2002, pp. 39-61
- [17] Baker, C., Morscher, G.N., Pujar, V.V., Lemanski, J.R., *Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis*, Composites Science and Technology, Vol. 116, 2015, pp. 26-32
- [18] Oz, F.E., Ersoy, N., Lomov, S.V., *Do high frequency acoustic emissions events always represent fibre failure in CFRP laminates?*, Composites: Part A, Vol. 103, 2017, pp. 230-235
- [19] Miller, R.K., McIntire, P., *Non-Destructive Testing Handbook – Volume 5 – Acoustic Emission Testing*, American Society for Nondestructive Testing, Second Edition, 1987
- [20] Soden, P.D., Hinton, M.J., Kaddour, A.S., *Lamina Properties, Lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates*, Composites Science and Technology, Vol. 58, 1998, pp. 1011-1022
- [21] Sause, M.G.R., *Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources*, Journal of Acoustic Emission, Vol. 29, 2011, pp. 184-196