

Automatische Qualitätsbeurteilung der Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionssignalen mit Hilfe von autoregressiven Pickerfunktionen

Martin RADLMEIER*, Ronald RICHTER*, Christian U. GROßE*
* TU München, cbm, Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung

Kurzfassung. Bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse spielt die Lokalisierbarkeit des Signalursprungs oft eine wichtige Rolle. So können beispielsweise Schäden im Bauteil geortet oder einzelne Signale auf Kausalität geprüft und für die weitere Analyse gegenüber Störgeräuschen selektiert werden (Verwendung der lokalisierbaren Ereignisse). Gerade bei zerstörenden Prüfungen, bei denen in der Regel sehr viele Signale aufgezeichnet werden, ist man auf eine zuverlässige und automatische Bestimmung des Ersteinsatzes angewiesen. Eine manuelle Bestimmung würde einen unangemessenen Arbeitsaufwand bedeuten. Die häufig verwendete Bestimmung der Erstankunftszeit über einen vorgegebenen Schwellwert (Threshold) ist zwar äußerst recheneffizient, führt jedoch auch häufig zu fehlerhaften Bestimmungen des Ersteinsatzes und damit einer fehlerhaften Lokalisierung der Schallemissionsquelle. Die Verwendung von autoregressiven Pickerfunktionen (Hinkley, AIC) zeigt hingegen eine signifikante Verbesserung bei der Bestimmung der Erstankunftszeit der Welle. Bislang fehlt für diese Verfahren jedoch meist eine Möglichkeit die Qualität der Ersteinsatzbestimmung zu ermitteln und anzugeben. In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der für die meisten konventionellen Pickeralgorithmen neben dem Ersteinsatz auch eine zuverlässige und vollautomatische Qualitätsbeurteilung der Ersteinsatzbestimmung liefern kann. Hierzu wird derselbe Algorithmus auf das detektierte Schallemissionssignal, sowie auch auf verschiedene Modifikationen desselben Signals angewendet. Für die modifizierten Signale neigen die Pickerfunktionen dazu einen Startwert vor bzw. nach der Originalwelle zu finden. Diese unterschiedlichen Ankunftszeiten können für eine Qualitätsbeurteilung herangezogen werden, mit Hilfe derer der Großteil der Fehlpickungen separiert und aussortiert werden kann. Die Lokalisierung der Schäden wird so verbessert. Darüber hinaus bietet das Qualitätsmaß prinzipiell zusätzlich die Möglichkeit die Unsicherheit der Ersteinsatzbestimmung in die Fehlerbetrachtung der Lokalisierung mit einfließen zu lassen.

1. Einführung

Für die Schallemissionsanalyse zählt die Lokalisierung der einzelnen Ereignisse zu den grundlegenden Möglichkeiten die aufgezeichneten akustischen Wellen auszuwerten. Die einzelnen Ereignisse werden lokalisiert indem die bestimmten Erstankunftszeiten der Welle an den einzelnen Sensoren in Bezug zu deren räumlichen Anordnung gesetzt werden. Eine richtige Bestimmung des Ersteinsatzes der Signale ist für eine gute Lokalisierung



unabdingbar. Für bruchmechanische Untersuchungen, bei denen eine Vielzahl von Schallemissionssignalen entsteht, stellt eine automatische Ersteinsatzbestimmung eine zusätzliche Randbedingung dar.

2. Automatische Ersteinsatzbestimmung

2.1 Schwellwertüberschreitung (Threshold)

Für die einfachste (recheneffizienteste) Methode zur Bestimmung der Erstankunftszeit der Welle werden meist Grenzwertüberschreitungen (Threshold) benutzt. Der Ersteinsatz der Welle ist in diesem Fall genau an dem Zeitpunkt, an dem das Signal einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Aufgrund seiner Funktionsweise neigt der Picker (automatische Ersteinsatzbestimmung) dazu den Zeitpunkt des Ersteinsatzes der Welle zu spät zu detektieren. Der dabei entstehende Fehler ist sehr stark abhängig von der Wahl des Grenzwertes. Ist er zu niedrig wird vermehrt das elektronische Rauschen als Schallemissionssignal interpretiert, ist er zu hoch kommt es zu einem starken Zeitverzug zwischen der tatsächlichen und der experimentell bestimmten Startzeit der Welle. Eine allgemein gültige bzw. richtige Wahl für den Grenzwert ist nicht möglich. Daher gibt es noch eine Vielzahl anderer Methoden zur automatischen Startwertbestimmung der Welle [1][2]. Zu den häufig verwendeten Pickermethoden für Schallemissionssignale zählen unter anderen der STA/LTA nach Bear und Kradolfer [3], das Hinkley-Kriterium [4] und der AIC-Picker (Akaike Information Criteria [5]).

2.2 AIC-Picker (Akaike information criteria)

Der AIC-Picker gehört zu den autoregressiven Pickern und berechnet zwei gegenläufige Funktionen die addiert werden. Das Minimum der Pickerfunktion wird anschließend als Ersteinsatz der Welle ausgegeben. Die AIC-Funktion wird definiert durch

$$AIC(t_w) = t_w \cdot \log(\text{var}(U_w(t_w, 1))) + (T_w - t_w - 1) \cdot \log(\text{var}(U_w(1+t_w, T_w))) \quad . [5]$$

T_w stellt die Gesamtanzahl der gemessenen Datenpunkte im ausgewählten Intervall dar, dass für die Berechnung verwendet wird. Dabei ist der Index w der w -te Datenpunkt und die $\text{var}(U_w(t_w, 1))$ berechnet die Varianz der Spannungswerte vom ersten bis zum w -ten Datenpunkt, während $\text{var}(U_w(1+t_w, T_w))$ der Varianz der Spannungswerte zwischen dem $(1+w)$ -ten und dem letzten Datenpunkt (im ausgewählten Intervall) entspricht. Berechnet man $AIC(t_w)$ für jeden Index w , so wird eine Funktion berechnet, die im Folgenden die AIC-Pickerfunktion genannt wird. Das Minimum dieser Funktion beschreibt den Ersteinsatz der Welle. Der Formalismus muss auf ein Intervall von Messpunkten angewendet werden. In dieser Arbeit wird das Intervall, für das die AIC-Pickerfunktion berechnet wird, folgendermaßen zugeschnitten. Die vorliegenden Daten sind mit Hilfe eines Schwellwert-Triggers aufgezeichnet worden. Es wurden Datenreihen mit 8196 Punkten pro Signal aufgezeichnet (von denen sowohl 1000 als auch 1500 Pretrigger-Punkte getestet wurden). In der Regel werden für den Startwert des Intervalls alle Pretrigger-Punkte für die Berechnung mitgenommen, sofern die ersten beiden Werte voneinander unterschiedlich sind. (Bei der Implementierung des AIC-Pickers sollte darauf geachtet werden, dass die ersten und die letzten beiden verwendeten Messwerte im Intervall jeweils voneinander verschieden sind. Ansonsten werden die nächsten beiden aufeinanderfolgenden Punkte, die voneinander verschieden sind, verwendet.) Für den Endpunkt des Intervalls werden von dem zu untersuchenden Signal das Minimum und das

Maximum ausfindig gemacht. Der Endpunkt des Intervalls wird durch das zeitlich spätere Extremum festgesetzt, da der Beginn der Welle nicht nach dem Maximum/Minimum auftreten kann. Da der Algorithmus nicht das komplette Signal verwenden muss, wird zudem eine enorme Geschwindigkeitssteigerung (etwa den Faktor 5) für die rechnergestützte Auswertung erwirkt. Abb. 1 zeigt ein Schallemissionssignal und die dazu berechnete AIC-Funktion.

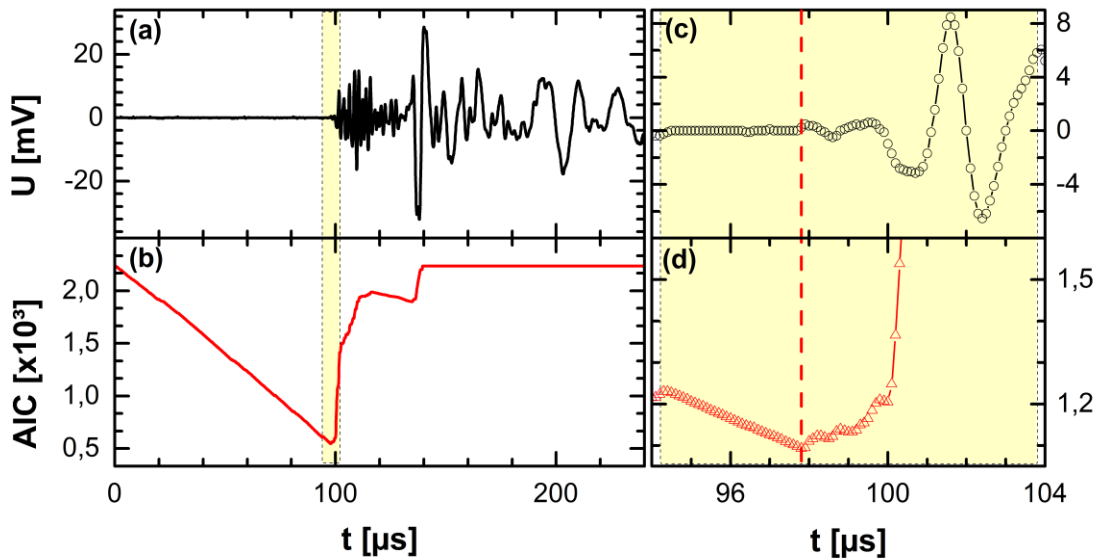


Abb. 1. (a) Signalverlauf eines Schallemissionssignals. (b) Aus dem Signalverlauf aus (a) berechnete AIC-Pickerfunktion (Intervall von $0\mu\text{s}$ bis etwa $140\mu\text{s}$). (c) und (d) kleinerer Zeitbereich von (a) und (b). Das Minimum der Pickerfunktion stellt den automatisch bestimmten Ersteinsatz dar.

Der AIC-Picker bestimmt in den meisten Fällen einen präziseren Startwert der akustischen Welle als die schwelwertbasierte Methode. In Abb. 2 ist ein Vergleich der beiden Methoden dargestellt.

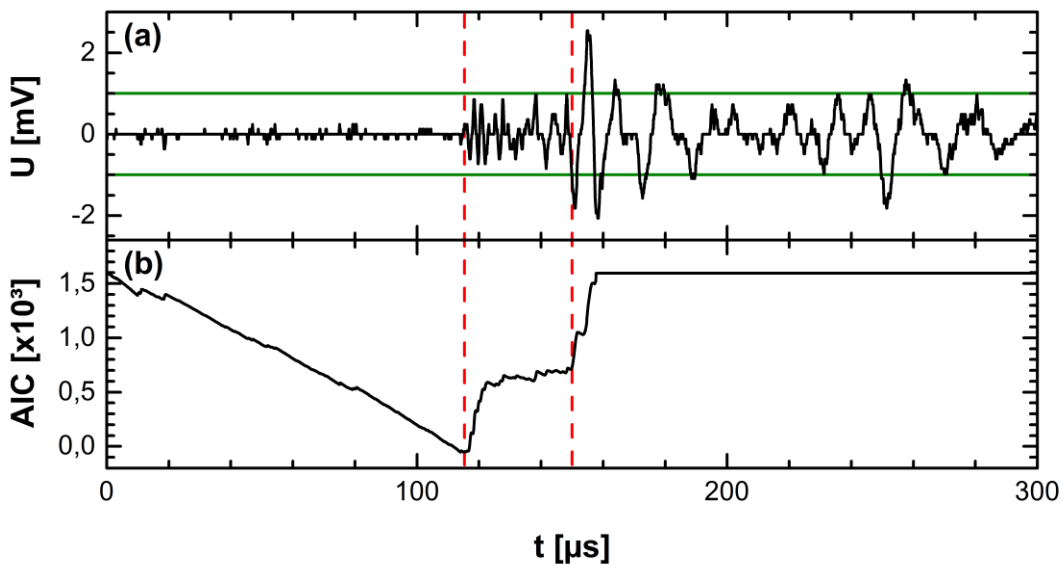


Abb. 2. Vergleich der Ersteinsatzbestimmung per Schwellwertüberschreitung und per AIC-Picker. (a) Gemessenes Schallemissionssignal mit eingezeichnetem Schwellwert. (b) Aus gemessenem Signalverlauf berechnete AIC-Pickerfunktion; linke rote Linie: Startwertbestimmung per AIC-Picker; rechte rote Linie: Startwert per Schwellwertüberschreitung.

Für eine modenbasierte Signalausbreitung ist die Intensität der ersten Mode willkürlich stark ausgeprägt. Es ist daher schwierig einen allgemein gültigen Schwellwert zu bestimmen. Der AIC-Picker hingegen findet (je nach Signal/Rausch-Verhältnis) sehr häufig den richtigen Startwert der Welle [6], jedoch fehlt es auch dem AIC-Picker an einer brauchbaren Qualitätsbeurteilung für die bestimmte Erstantkunftszeit.

3. Automatische Qualitätsbeurteilung der Erstantkunftszeitbestimmung mit Hilfe von autoregressiven Pickern

3.1 Prinzip der entwickelten Qualitätsbeurteilung für die Startwertbestimmung

Zur automatischen Qualitätsbeurteilung für die Startwertbestimmung der akustischen Welle wird mit Hilfe des AIC-Pickers sowohl der Startwert des Originalsignals bestimmt, als auch verschiedene Modifikationen desselben Signals. Die Idee dieser Modifikationen ist es, das Signal/Rausch-Verhältnis in beide Richtungen signifikant zu ändern. Zu diesem Zweck werden die schwächeren Spannungswerte in einem Signalverlauf einmal überproportional verstärkt und einmal überproportional stark unterdrückt. Aufgrund des statistischen Ursprungs des AIC-Pickers lässt sich dieser auch auf die modifizierten Signale anwenden. Bestimmt der AIC-Picker für das Originalsignal und den modifizierten Signalen dieselbe Startzeit, so ist die Pickung von guter Qualität. Die Gleichgewichtsposition der AIC-Funktion für die Startzeitbestimmung ist dann stabil genug, um sich selbst für die entarteten Signale nicht zu verschieben. Wird jedoch für mindestens ein modifiziertes Signal eine signifikant andere Startzeit als beim Originalsignal bestimmt, so ist die Qualität der gesamten Startwertbestimmung fragwürdig und der bestimmte Erstantkunftszeit der Welle sollte nochmals manuell auf Richtigkeit überprüft werden. Als Qualitätskriterium wird die Standardabweichung $\sigma(t_{\text{start}})$ der einzelnen Startwerte bestimmt.

3.2 Experimentelle Umsetzung der geforderten Voraussetzungen des Qualitätskriteriums

Das Originalsignal wird zuerst in das normierte Spannungssignal überführt, welches in diesem Fall definiert ist durch

$$U(t)' = \frac{U(t)}{\max(|U(t)|)} .$$

Dabei beschreibt $U(t)$ die Gesamtheit der detektierten Spannungswerte eines Messsignals und $\max|U(t)|$ den maximalen Betragswert. Die detektierten Spannungswerte $U(t)'$ befinden sich anschließend zwischen -1 und 1, wobei für den allgemeinen Fall nicht beide Extremwerte erreicht werden. Für das normierte Signal wird in fast allen Fällen derselbe Startwert bestimmt, wie für das Originalsignal (in etwa 2 Promille der Fälle wird der Startwert der Welle an einem anderen Punkt bestimmt, was vermutlich auf die Numerik zurück zu führen ist). Die Normierung ist notwendig um die modifizierten Signale gemäß den Anforderungen von Absatz 3.1 berechnen zu können. Dazu werden die modifizierten Signale anschließend erzeugt gemäß:

$$U_p(t)' = \text{sgn}(U(t)') \cdot \left(|U(t)'|^p \right) .$$

Mit Hilfe der Signumfunktion wird sichergestellt, dass das Vorzeichen der normierten Spannungswerte $U(t)'$ auch für diese Transformation erhalten bleibt. Der Exponent p ist eine beliebige positive, rationale Zahl und fungiert als Variationskoeffizient

der die eigentliche Signalmodifikation bewirkt. Wählt man einen Koeffizienten p größer 1 und einen kleiner 1, so erhält man zwei modifizierte Signale mit den in Abschnitt 3.1 genannten Bedingungen. Man verstärkt bzw. unterdrückt die gemessenen Spannungswerte je nach dem Betrag dieser und dem gewählten Variationskoeffizienten. Je weiter der Variationskoeffizient relativ von 1 entfernt ist, desto stärker entartet das Ausgangssignal. Die Variationskoeffizienten sollten an das Rauschen des Systems angepasst werden. In dieser Arbeit wurde $p=2$ und $p=0,125$ verwendet, da diese Koeffizienten in den durchgeführten Versuchen eine hohe Effizienz zeigten. Es sei darauf hingewiesen, dass die modifizierten Signale natürlich auch ein verändertes Frequenzspektrum besitzen, da sie nicht linear transformiert werden.

3.3 Charakteristik der modifizierten Signale

Die nach Abschnitt 3.2 berechneten modifizierten Signale werden je nach Variationskoeffizienten charakteristisch verstärkt oder abgeschwächt. Diese Transformation ist mathematisch eindeutig auf das Originalsignal zurückführbar. Diese Abbildungsfunktion ist in Abb. 3 für zwei Variationskoeffizienten dargestellt. Der schwarze Graph stellt das normierte Signal dar und zeigt dementsprechend eine Ursprungsgerade ($p=1$) und bearbeitet das Signal (mit Ausnahme der Normierung) nicht. Die anderen Graphen zeigen die Abbildungsfunktionen der modifizierten Spannungswerte mit dem Variationskoeffizienten $p=0,125$ (blau) und das Gegenstück mit $p=2$ (rot). Das Vorzeichen bleibt durch die Transformation erhalten.

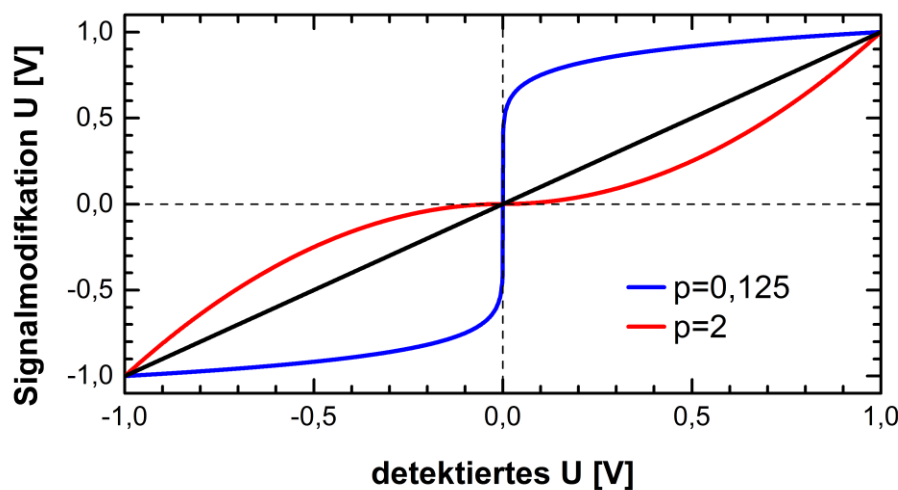


Abb. 3. Verstärkungs-/Abschwächungscharakteristik der modifizierten Signale; x-Achse: gemessene und normierte Spannungswerte; y-Achse: Spannungswerte nach der Transformation mit p .

3.4 Darstellung der einzelnen Bearbeitungsschritte

Abb. 4 stellt beispielhaft für ein detektiertes Signal die einzelnen Bearbeitungsschritte graphisch dar. Zusätzlich zum Ursprungssignal werden das normierte (Abb. 4(b)) und die beiden modifizierten Signale berechnet (Abb. 4(c-d)). Bei dem mit $p=2$ (rot) modifizierten Signal werden dabei die schwachen Spannungswerte (sowohl das Rauschen, als auch die schwächeren Signalanteile) stark unterdrückt (Abb. 4(c)). An der Signalform ist dies deutlich zu erkennen. Bei dem mit $p=0,125$ modifizierten Signal werden die schwachen Spannungswerte hingegen stark verstärkt. Sowohl das Rauschen, als auch die schwächeren Signalanteile wirken wesentlich dominanter (Abb. 4(d)). Die Signalform sieht auf den ersten Blick zwar stark entstellt aus, ist aber eindeutig rücktransformierbar. Die vier AIC-Funktionen (Abb. 4(e)) des Ursprungs-, des normierten und der beiden modifizierten

Signale werden anschließend auf verschiedenen y-Achsen aufgetragen. Von diesem vierfach bestimmten Startwert der Welle kann man nun neben dem Mittelwert auch die Standardabweichung $\sigma(t_{\text{start}})$ der vier Startwerte ermitteln, welche dann als Qualitätskriterium verwendet wird. Für das in Abb. 4 dargestellte Signal verändern sich die Minima der AIC-Funktionen für die modifizierten Signale kaum, da das Signal/Rausch-Verhältnis des Ursprungssignals sehr gut ist.

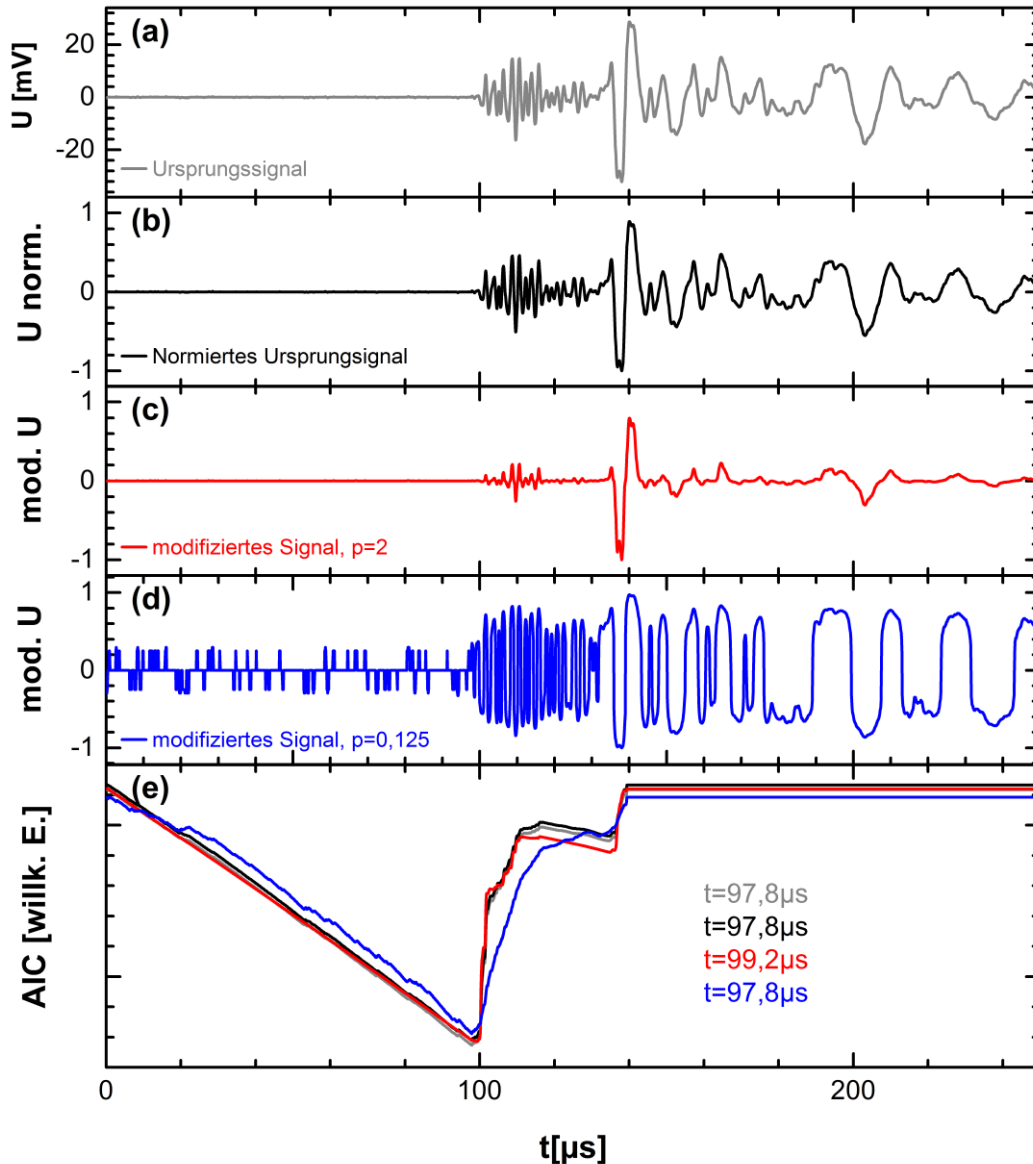


Abb. 4. Visualisierung der einzelnen Bearbeitungsschritte. (a) Gemessenes Schallemissionssignal. (b) Normiertes Schallemissionssignal von (a). (c) Modifiziertes Signal mit $p=2$. (d) Modifiziertes Signal mit $p=0,125$. (e) AIC-Funktion aller wellenförmigen Signale.

Die Standardabweichung ist mit $\sigma(t_{\text{start}})=0,7 \mu\text{s}$ (7 Messpunkte für die Abtastrate 10MHz) somit relativ klein und die Qualität dieser Ersteinsatzbestimmung ziemlich gut. Das begutachtete Signal kann demzufolge für die Darstellung der Lokalisierung verwendet werden. Würden die vier Minima der AIC-Funktionen in Abb. 4(e) zeitlich weiter auseinander liegen, wäre die berechnete Standardabweichung höher und die schlechte Qualität der automatischen Startwertbestimmung durch den AIC-Picker leicht erkennbar. Die ursprüngliche Startwertbestimmung durch den AIC-Picker am Orginalsignal muss deshalb noch nicht unbedingt falsch sein, jedoch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für eine ursprünglich fehlerhafte Bestimmung sehr stark sobald $\sigma(t_{\text{start}})$ zunimmt.

Abb. 5 stellt ein Signal mit einer hohen Standardabweichung $\sigma(t_{\text{start}})$ der automatischen Qualitätsbeurteilung dar. Selbst eine manuelle Bestimmung der Erstankunftszeit erweist sich ohne weiteres Hintergrundwissen schwierig (vgl. Abb. 5(a)). Bei der detektierten Welle handelt es sich um eine Plattenwelle, bei der die erste ankommende Mode sehr stark unterdrückt ist, so dass diese nahe am Digitalisierungslimit der verwendeten Messkette liegt. Wendet man an diesem Signal das vorgestellte Qualitätskriterium mit den modifizierten Signalen an, so streuen die einzelnen Minima untereinander stark. In diesem Fall bestimmt die blaue Kurve mit $p=0,125$ (Abb. 5(b)) den Startwert signifikant früher als die anderen AIC-Pickerfunktionen. Die hohe Unsicherheit für den bestimmten Erstansatz durch den AIC-Picker am Originalsignal (schwarz) spiegelt sich in der hohen Standardabweichung $\sigma(t_{\text{start}})=10,1\mu\text{s}$ (101 Messpunkte) wieder, die mit den modifizierten Signalen berechnet wurde. Aufgrund eines hohen $\sigma(t_{\text{start}})$ kann für dieses Signal (je nach Bedarf) die Startzeitbestimmung manuell durchgeführt werden oder für die Lokalisierung nicht weiter berücksichtigt werden.

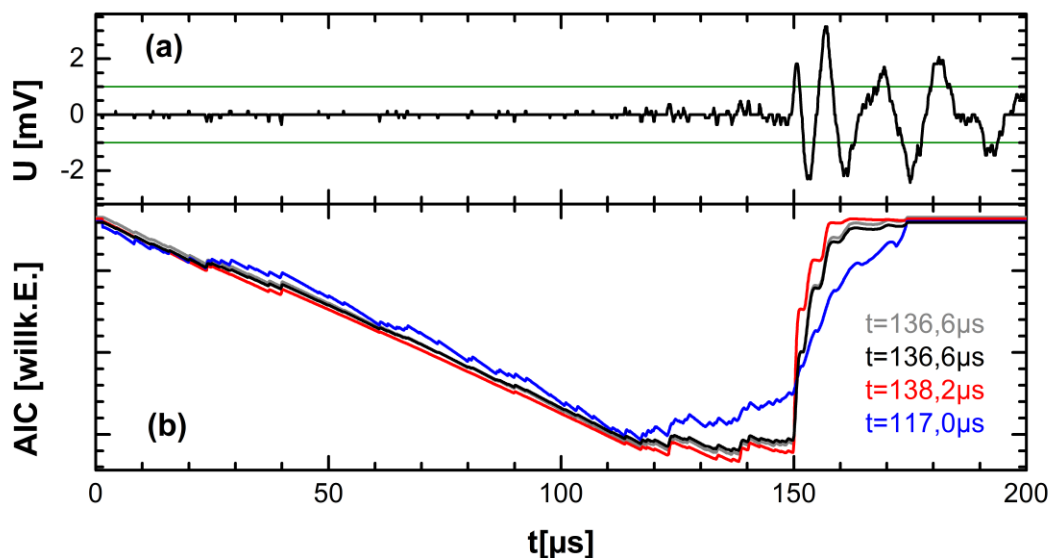


Abb. 5. Visualisierung eines Signals mit hoher Standardabweichung. (a) Normiertes Schallemissionssignal. (b) AIC-Funktion des Signals und den einzelnen Modifikationen (wie in Abb. 4).

4. Anwendung der automatischen Qualitätsbeurteilung zur Unterdrückung von Fehllokalisierungen von Schallemissionssignalen

Ziel der Qualitätsbeurteilung ist es die einzelnen Fehlpickungen aufgrund fehlerhaft bestimmter Erstankunftszeit der Signale zu eliminieren. Experimentell wurden Schallemissionsdaten von einem 3-Punktbiegeversuch einer unidirektionalen CFK-Probe ausgewertet und eine eindimensionale Lokalisierung für 5000 Signale mit 2 Kanälen (max. 2500 Hits) durchgeführt. Aufgrund der Kraftverhältnisse beim 3-Punktbiegeversuch sollten die meisten Schädigungen in dem Bereich unter der mittleren Druckfinne ($x=-2\text{mm}$) stattfinden. In Abb. 6(a) ist die Häufigkeit der eindimensionalen Lokalisierung für die Erstankunftszeitbestimmung mit Hilfe der Schwellwertmethode dargestellt. Abb. 6(b) zeigt die Lokalisierung mit Hilfe der Erstansatzbestimmung durch den AIC-Picker während Abb. 6(c) zusätzlich das Qualitätskriterium verwendet. Dieses sorgt nochmal für eine Reduktion von weiteren 140 fehlerhaft lokalisierten Ereignissen. Im Histogramm fallen hauptsächlich die verringerten Flanken (also Schädigung die weit von der Mitte entfernt sind) auf. Das

dieser Schritt die Lokalisierung sichtlich verbessert, ist leicht nachzuweisen indem man die automatische Erstankunftsbestimmung der aussortierten Signale manuell betrachtet und feststellt, dass die bestimmte Erstankunftszeit von mindestens einem der beiden Signale fehlerhaft ist.

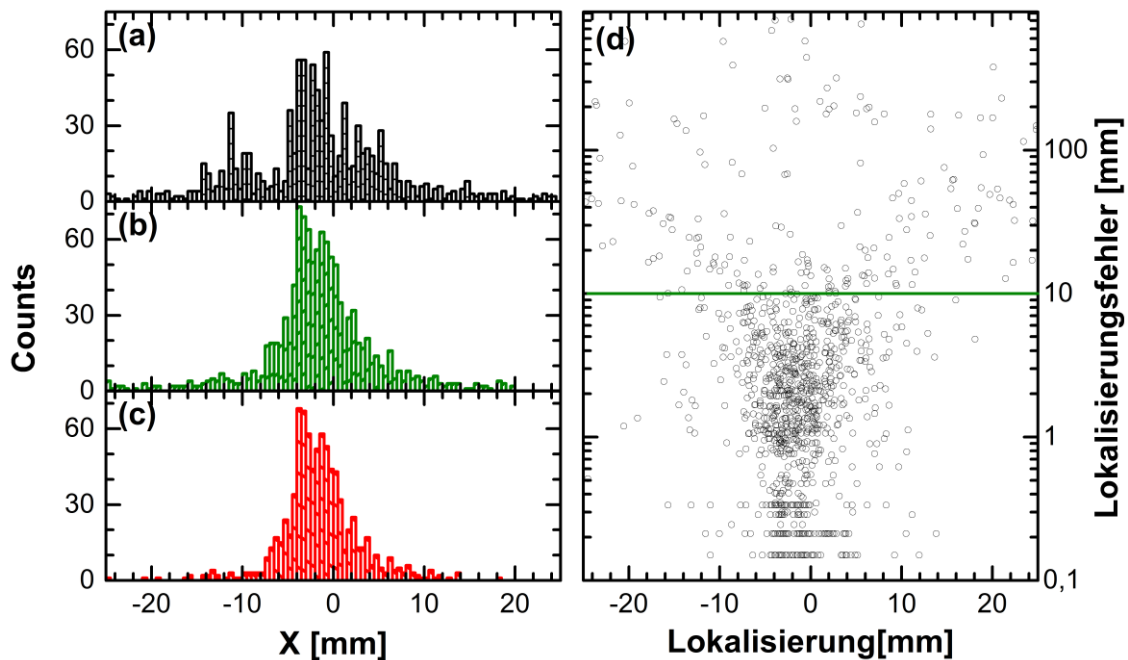


Abb. 6. Lokalisierung von Schallemissionssignalen mit Hilfe von unterschiedlichen Methoden. 0mm bezeichnet den Mittelpunkt der Sensoren.
 (a) Lokalisierung über Schwellwertverfahren. (b) Lokalisierung über AIC-Picker. (c) Lokalisierung mit dem AIC-Picker mit Hilfe des automatischen Qualitätskriteriums. (d) Betrachtung der Standardabweichung $(\sigma(t_{\text{start}}) + \Delta t_{\text{Abtast}})$ als Fehler für die Startzeitbestimmung bzw. den Lokalisierungsfehler mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung.

Für die Darstellung der Lokalisierung von Schallemissionssignalen ist es auch denkbar die berechneten Standardabweichungen $\sigma(t_{\text{start}})$ direkt als Fehler für die Erstankunftszeit zu interpretieren. So könnte beispielsweise $(\sigma(t_{\text{start}}) + k\Delta t_{\text{Abtast}})$ als Fehler für die Erstankunftszeit bestimmt werden und mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung eine automatische Angabe des Lokalisierungsfehlers bestimmt werden. Abb. 6(d) zeigt für diesen Fall mit $k=1$ den bestimmten Lokalisierungsfehler ΔX über die Lokalisierung X . In Abb. 6(c) wurden alle Werte nicht weiter berücksichtigt, die eine Lokalisierungsungenauigkeit von mehr als 10mm hatten (Punkte oberhalb der grünen Linie in Abb. 6(d)). Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um die üblicherweise berechnete Lokalisierungsungenauigkeit LUCY handelt, die des Öfteren in überbestimmten Systemen angegeben wird. Eine Kombination von der Lokalisierungsungenauigkeit LUCY und der automatischen Qualitätsbeurteilung wäre durchaus umsetzbar um eine bessere Lokalisierung zu erreichen, indem den einzelnen Startzeiten mit Hilfe des Qualitätskriteriums eine unterschiedlich starke Gewichtung geben könnte. Prinzipiell ist der Einsatz der modifizierten Signale auch für andere Verfahren wie z.B. das Hinkley-Kriterium denkbar um die Qualität der Ersteinsatzbestimmung zu prüfen, nachdem die Normierung geeignet gewählt wird.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der AIC-Picker liefert für viele Messdaten meist eine zuverlässige Bestimmung des Ersteinsatzes. Allerdings macht er keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit einer Fehlpickung bzw. wie „schwer“ es für den Algorithmus war, den Startwert der Welle eindeutig zu bestimmen. Für die automatische Ersteinsatzbestimmung der Welle und der anschließend folgenden Lokalisierung heißt dies, dass sich Fehllokalisierungen einschleichen. Ziel dieser Qualitätsbeurteilung ist es, eine Möglichkeit zu schaffen, um für jede Lokalisierung eine Unsicherheit angeben zu können. Dadurch können Fehllokalisierungen von vorne herein mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden. Als Qualitätskriterium wurde $\sigma(t_{\text{start}})$ verschiedener Startwertbestimmungen benutzt. Die verschiedenen Startwerte werden in diesem Fall alle mit dem AIC-Picker bestimmt indem man den AIC-Picker auf das Ursprungssignal, sowie auf verschiedene Modifikationen desselben Signals anwendet. Dieses Verfahren kann eine hohe Anzahl an Fehllokalisierungen separieren um diese gegebenenfalls für die Lokalisierung nicht weiter zu verwenden bzw. um die Erstankunftszeiten nochmal manuell zu bestimmen. Dazu muss man anschließend nur die Ereignisse separat betrachten, bei denen eine hohe Standardabweichung für die bestimmten Erstankunftszeiten berechnet wurde. Diese Signale besitzen ein hohes Risiko, dass dieses Ereignis fehlerhaft lokalisiert wurde. Sofern man $\sigma(t_{\text{start}})$ direkt als Fehler für die Erstankunftszeit verwendet, kann dies in eine weitere Fehlerrechnung für die Lokalisierung einfließen. Um diese Möglichkeit zu verifizieren, müsste jedoch noch die verwendeten Variationskoeffizienten bestimmt und validiert werden. Dies kann geschehen indem man für viele Signale manuell den Fehler des Ersteinsatzes der Welle abschätzt und dies abgleicht mit der Methode, die in dieser Arbeit vorgestellt wurde. Eventuell erfordert der Schritt hin zur Verwendung der Standardabweichung $\sigma(t_{\text{start}})$ als Fehlerangabe auch die Verwendung einer Vielzahl von modifizierten Signalen (nicht nur zwei). Diese Fehlerbetrachtung könnte anschließend mit bereits bekannten Verfahren kombiniert werden, wie zum Beispiel mit der in überbestimmten Systemen häufig verwendeten Lokalisierungsungenauigkeit LUCY, Dazu müsste man lediglich die unterschiedlichen Erstankunftszeiten an den einzelnen Sensoren mit gemäß der Standardabweichung wichten. Ein besseres Lokalisierungsergebnis ist auch durch eine präzisere Fehlerangabe der einzelnen Ereignisse möglich.

Literaturverzeichnis:

- [1] R. Pullin, K. M. Holford u. Mark J Eaton, "Towards improved damage location using acoustic emission," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 226, pp. 2141-2153, 31 Mai 2012.
- [2] C. U. Grosse und M. Ohtsu, Acoustic Emission Testing, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [3] M. Bear und U. Kradolfer, "An automatic phase picker for local and teleseismic events," Bulletin of the Seismological Society of America 77, vol. 77, Seiten. 1437-1445, 1987.
- [4] D. Hinkley, "Inference about change-point from cumulative sum tests," Biometrika, Seiten 509-523, 1971.
- [5] H. Akaike, "Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes," Annals of the Institute of Statistical Mathematics, vol. 26, Seiten 363-387, 1974.
- [6] C. U. Grosse, H.-W. Reinhardt und J. H. Kurz, "Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete," Ultrasonics, vol. 43, Seiten 538-546, 07 07 2005.