

Schallemissionsmessung beim Krimparmieren von Verbund-Langstabisolatoren

Anton FURRER, Frank SCHMUCK
Pfisterer Sefag AG, CH-6102 Malters, Schweiz
Technology Overhead Lines
(anton.furrer@sefag.ch), (frank.schmuck@sefag.ch)

Kurzfassung. Ein Verbund-Langstabisolator besteht hauptsächlich aus dem glasfaserverstärkten Stab zur Übertragung der mechanischen Kräfte, den Metallarmaturen als kraftschlüssige Verbindungselemente und dem polymeren Isoliermantel zur elektrischen Isolation und zum Schutz des Stabes vor Umwelteinflüssen.

Mechanisch ist der Verbund-Langstabisolator durch seine Nennkraft, die SML (specified mechanical load) definiert. Diese axiale Zugkraft ist eine Stehkraft und wird in der Regel durch die Verbindung zwischen dem Stab und den Armaturen dominiert.

Zum Aufbringen der Metallarmaturen auf den Stab hat sich heute das Krimpen als Fügeverfahren durchgesetzt. Dabei wird die Armatur plastisch verformt und auf den Stab gepresst. Um bei gegebenem Stabdurchmesser und fester Armierungslänge eine möglichst grosse Abzugskraft der Armatur zu erreichen, muss die Armatur mit einem möglichst hohen Druck verkrimpt werden. Dies birgt dann die Gefahr einer Überbelastung des Stabes, wodurch dieser vorgeschädigt werden kann. Diese Vorschädigung ist kritisch, da sie innerhalb der Armatur in einem nicht sichtbaren Bereich auftritt.

Jeder Isolator wird einer mechanischen Stückprüfung, typischerweise 50 % der Nennkraft, unterzogen. Es ist jedoch möglich, dass ein durch den Krimpvorgang vorgeschädigter Isolator eine Zugkraft aufweist, die immer noch über dieser Stückprüfungskraft liegt. Um eine solche Vorschädigung aber trotzdem zu erkennen, besteht die Möglichkeit, den Krimpvorgang akustisch zu überwachen, da eine Rissbildung im Glasfaserstab Schallemissionen erzeugt, welche mit geeigneten Sensoren detektiert und ausgewertet werden können.

Bei der praktischen Anwendung ergeben sich vor allem durch die Überlagerung mit diversen Störsignalen, welche hauptsächlich durch die Hydraulik und Mechanik der Krimmmaschine generiert werden, Probleme bei der automatischen Bewertung der Signale. Deshalb muss die Software für die jeweilige Anwendung optimiert und die einzelnen Parameter an den Krimpvorgang angepasst sein, um eine falsche Bewertung der Signale zu vermeiden. Darin liegt wohl auch das grösste Optimierungspotential, um die Verlässlichkeit dieser Methode zur Prozessüberwachung weiter zu erhöhen. Der Beitrag befasst sich mit der Messung von Schallemissionen unter praktischen Produktionsbedingungen.

1 Einführung

Bei der Herstellung von Verbund-Langstabisolatoren ist das Aufbringen der Metallendarmaturen auf den GFK1-Stab durch das Krimpverfahren ein sehr wichtiger aber auch kritischer Prozessschritt. Die kraftschlüssige Verbindung zwischen der Endarmatur und dem GFK-Stab ist massgebend für das mechanische Verhalten des Isolators. Aus diesem Grund wird dieser Arbeitsschritt mit Hilfe der Schallemissionsanalyse prozessbegleitend überwacht.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Schallemissionsanalyse zur Prozessüberwachung unter praktischen Produktionsbedingungen und zeigt empirisch die Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung dieses Verfahrens auf.

2 Verbund-Langstabisolator

2.1 Aufbau und Materialien

Ein Verbund-Langstabisolator (Abb. 1) besteht hauptsächlich aus dem GFK-Stab zur Übertragung der mechanischen Kräfte, den Metallarmaturen als kraftschlüssige Verbindungselemente und dem polymeren Isoliermantel zur elektrischen Isolation und zum Schutz des Stabes vor Umwelteinflüssen.

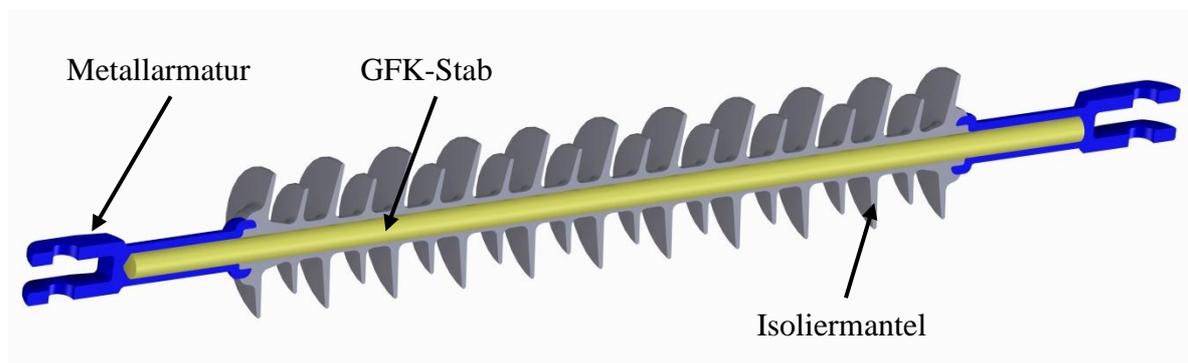


Abb. 1: Aufbau Verbund-Langstabisolator

Es ist bei zugbeanspruchten Verbundisolatoren heute Stand der Technik, dass der GFK-Stab mit E-CR2-Glasfasern mit einer besonders hohen Korrosionsbeständigkeit gegenüber Säuren verstärkt und einer Epoxidharz-Matrix imprägniert wird. Die Endarmaturen bestehen meist aus Schmiedestahl oder Stahlguss, um eine genügende Festigkeit zu erreichen. Zum Schutz vor Korrosion werden diese feuerverzinkt. Der Isoliermantel für Hochspannungsisolatoren von PFISTERER wird ausschliesslich aus Silikongummi hergestellt. Um eine hohe Alterungsbeständigkeit und eine gute Hydrophobie zu gewährleisten, wird ein optimierter HTV3-Silikongummi mit hohem Füllstoffgehalt verwendet.

2.2 Mechanische Eigenschaften

Verbund-Langstabisolatoren werden vor allem in Trag- und Abspannketten von Freileitungen eingesetzt. Deshalb ist dieser Isolator typ mechanisch in erster Linie durch seine Nenn-

¹ glasfaserverstärkter Kunststoff, heute typischerweise Epoxidharz

² E-Glas, Corrosion Resistant

³ hochtemperaturvernetzend

kraft SML4 definiert. Diese axiale Zugkraft ist eine Stehkraft, welche in der Regel durch die Verbindung zwischen dem GFK-Stab und den Endarmaturen dominiert wird, was die hohe Bedeutung dieser Verbindung untermauert. Die Definition und die Prüfungen zur mechanischen Festigkeit von Verbund-Langstabisolatoren sind in der Norm IEC 61109 [1] beschrieben.

2.3 Herstellung

Wie aufgrund des Aufbaus leicht zu erkennen ist, kann die Herstellung eines Verbundisolators aus Halbzeugen in die zwei folgenden Arbeitsschritte aufgeteilt werden: Der eine Arbeitsschritt ist das Aufbringen des Isoliermantels, was bei der Verarbeitung von HTV-Silikon Gummi im Spritzguss- oder Extrusionsverfahren geschehen kann. Der andere Arbeitsschritt ist das Aufbringen der Endarmatur auf den GFK-Stab, wobei das Krimpen, auf welches nachfolgend genauer eingegangen wird, Stand der Technik ist.

3 Krimpverbindung

3.1 Krimpverfahren

Zum Aufbringen der metallischen Endarmaturen auf den GFK-Stab hat sich heute das Krimpen mit druckgesteuerten oder druckgeregelten Mehrkantpressen (Abb. 2) aus wirtschaftlichen Gründen als Fügeverfahren durchgesetzt. Dabei wird die Armatur (Abb. 3) plastisch verformt und auf den Stab verpresst, wodurch eine kraftschlüssige Verbindung entsteht.



Abb. 2: 8-Backen-Krimpmaschine



Abb. 3: Verpressungsmuster

Für jede Paarung aus unterschiedlichen Kombinationen von Endarmaturen und Stäben (Material, Durchmesser, Presslänge usw.) sind die Krimpparameter, insbesondere der Pressdruck, empirisch zu ermitteln. Die Gestaltung der Pressbacken und die Krafteinleitung von der Armatur auf den Stab usw. sind das Know-how der Isolatorenhersteller [2].

3.2 Verpressungsgrad

Um bei gegebenem Stabdurchmesser und fester Armierungslänge eine maximale Abzugskraft der Armatur zu erreichen, muss die Armatur mit einem möglichst hohen Druck verkr-

⁴ specified mechanical load

impt werden. Dies birgt dann die Gefahr einer Überbelastung des Stabes, wodurch dieser zerbrechen (Abb. 4 u. 5) oder vorgeschädigt werden kann. Gerade eine Vorschädigung ist sehr kritisch, da sie innerhalb der Armatur in einem nicht sichtbaren Bereich auftritt und nachträglich nicht zerstörungsfrei zu ermitteln ist.



Abb. 4: Stabbruch durch Überpressung

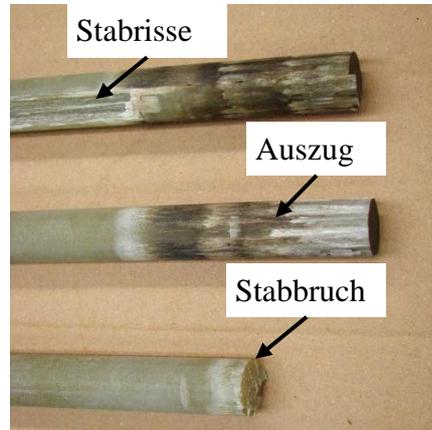


Abb. 5: Fehlermodi der Krimpverbindung

Nach IEC 61109 [1] muss jeder Isolator einer mechanischen Stückprüfung mit einer Zugkraft RTL5 von mindestens 50 % seiner Nennkraft unterzogen werden. Je nach Ausprägung der Vorschädigung ist es jedoch möglich, dass ein durch den Krimpvorgang vorgeschädigter Isolator eine Zugkraft aufweist, die immer noch über der Stückprüfkraft liegt. Somit gibt es eine „diagnostische Grauzone“ zwischen der Stückprüfkraft und der Nennkraft, in der ein vorgeschädigter Isolator liegen kann (Abb. 6).

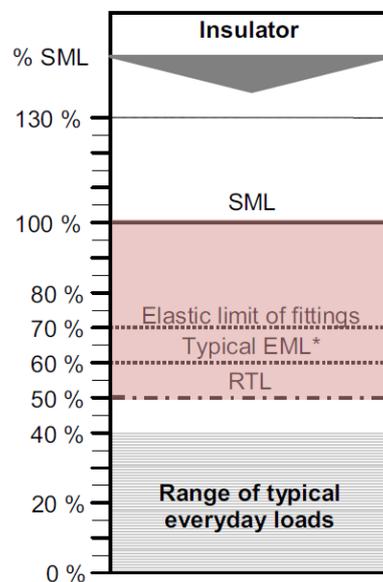


Abb. 6: Mechanische Kennwerte eines zugbelasteten Verbund-Langstabisolators nach IEC 61109

⁵ Routine test load

4 Schallemissionsanalyse zur Überwachung des Krimpvorgangs

4.1 Signalerfassung

Hier bietet die akustische Überwachung des Krimpvorgangs mittels der Schallemissionsanalyse eine Möglichkeit, solche Vorschädigungen während ihrer Entstehung zu erkennen. Rissbildungen im Glasfaserstab erzeugen Schallemissionen, welche mit geeigneten Geräten detektiert und ausgewertet werden können.

Die PFISTERER Sefag AG hat ihre Krimpmaschinen mit Anbaugeräten zur akustischen Überwachung ausgerüstet. Mit diesen Geräten ist es möglich, die akustischen Signale automatisch zu erfassen, online auszuwerten und aufzuzeichnen. Dazu werden die Signale an der Maschine möglichst nahe beim Werkstück erfasst.



Abb. 7: Sensorplatzierung

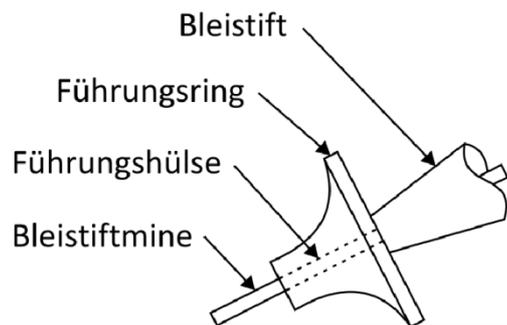


Abb. 8: HSU-Nielsen Quelle [3]

Eine optimale Erfassung der akustischen Signale würde sich durch Ankopplung des Sensors direkt am GFK-Stab ergeben [4]. Dies ist einerseits nicht möglich, weil der Stab beim Armieren bereits mit dem Isoliermantel umhüllt ist, andererseits wäre dadurch eine Neupositionierung des Sensors bei jedem Pressvorgang nötig. Aus diesen Gründen wird der Sensor auf der feststehenden Grundbacke (Abb. 7), welche sich während dem Pressvorgang nicht bewegt, platziert. Durch diverse Versuche und auch durch Vergleiche mit dem Bleistift-Minenbruch-Test (Abb. 8) nach HSU-Nielsen konnte die Wahl der Sensorpositionierung verifiziert werden.

4.2 Signalaufbereitung und Auswertung

Zur Aufbereitung wird das Sensorsignal verstärkt, gefiltert und logarithmiert. Anschließend wird das Signal über einen Tiefpassfilter geglättet, woraus dann das ASL6-Signal resultiert. Parallel dazu werden die Spitzenwerte des Signals detektiert und als APK7-Signal mit einer Pulsbreite von 50 ms ausgegeben [5]. Zusätzlich wird noch das Drucksignal des Hydrauliksystems aufgezeichnet.

Die Signalauswertung wird über die jeweiligen Amplituden realisiert. Dazu können über die Auswertesoftware diverse Grenz- und Schwellwerte gesetzt werden. Weiter kann definiert werden, für welche Zeitdauer ein Signal einen bestimmten Wert erreichen muss, um eine definierte Bewertung auszulösen. Über das Drucksignal kann eine Messung automatisch gestartet und wieder gestoppt werden, sodass dies nicht bei jeder Messung manuell gemacht werden muss und nicht unnötig Daten aufgezeichnet werden.

⁶ Average signal level

⁷ AE peak amplitude

Ein Krimpvorgang kann, wie in Abb. 9 ersichtlich ist, grob in drei Phasen gegliedert werden. In der Phase I findet der Druckaufbau, welcher proportional zur Presskraft ist, statt. Die Akustiksignale ASL und APK zeigen hier eine erhöhte Aktivität, was aus den sich bewegenden Maschinenteilen und der Verformung der Halbzeuge resultiert. In der Phase II wird der Druck für eine bestimmte Zeitdauer aufrecht gehalten. Wenn der Druck nicht nachgeregelt wird, fällt dieser aufgrund von Leckströmen in den Hydraulikventilen und aufgrund des Fließverhaltens der Halbzeuge leicht zusammen. Die Aktivität der Akustiksignale nimmt in dieser Phase wieder ab und pendelt sich beim Grundstörpegel ein. Die Phase III wird durch den raschen Druckabbau bestimmt, was nochmals zu einer deutlichen Erhöhung der Akustiksignale führt. Die Signale bleiben unter den gesetzten Grenzwerten.

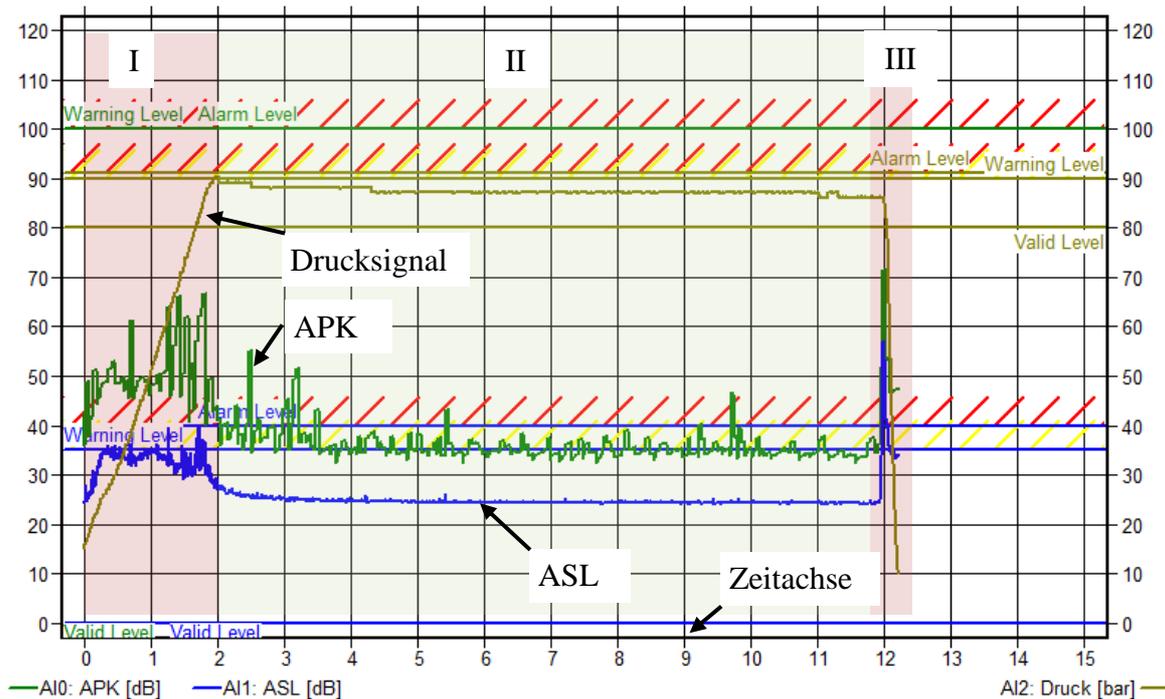


Abb. 9: Signalverläufe einer guten Verpressung

Das nächste Beispiel (Abb. 10) zeigt den Signalverlauf bei einem Stabbruch. In der ersten Phase verlaufen die Kurven der Akustiksignale gleich wie bei der guten Verpressung. In der zweiten Phase, kurz nach dem Erreichen des maximalen Pressdruckes, steigen die Pegel der Akustiksignale nochmals stark an (Detail A). Da die Maschine zu diesem Zeitpunkt keine Bewegung mehr ausführt und dadurch die Signalpegel wie in Abb. 9 beobachtet, wieder abflachen sollten, ist dies ein deutliches Zeichen für einen Stabbruch. Wenn man zusätzlich den Druckverlauf etwas genauer betrachtet, fällt auf, dass dieser zum Zeitpunkt der höchsten Schallemissionen deutlich einbricht (Detail B). Dies resultiert daraus, dass der Gegendruck, welcher das Halbzeug der Maschine entgegengesetzt, durch den Bruch des Stabes verringert wird.

Aufgrund dieser deutlichen Unterschiede der beiden Signalverläufe ist es recht einfach die Grenzwerte zur Beurteilung der Krimpung festzulegen und die automatische Bewertung durch die Software liefert zuverlässige Ergebnisse. Hier wäre auch eine Bewertung nur über die Signalpegel ohne Berücksichtigung der Zeitdauer möglich.

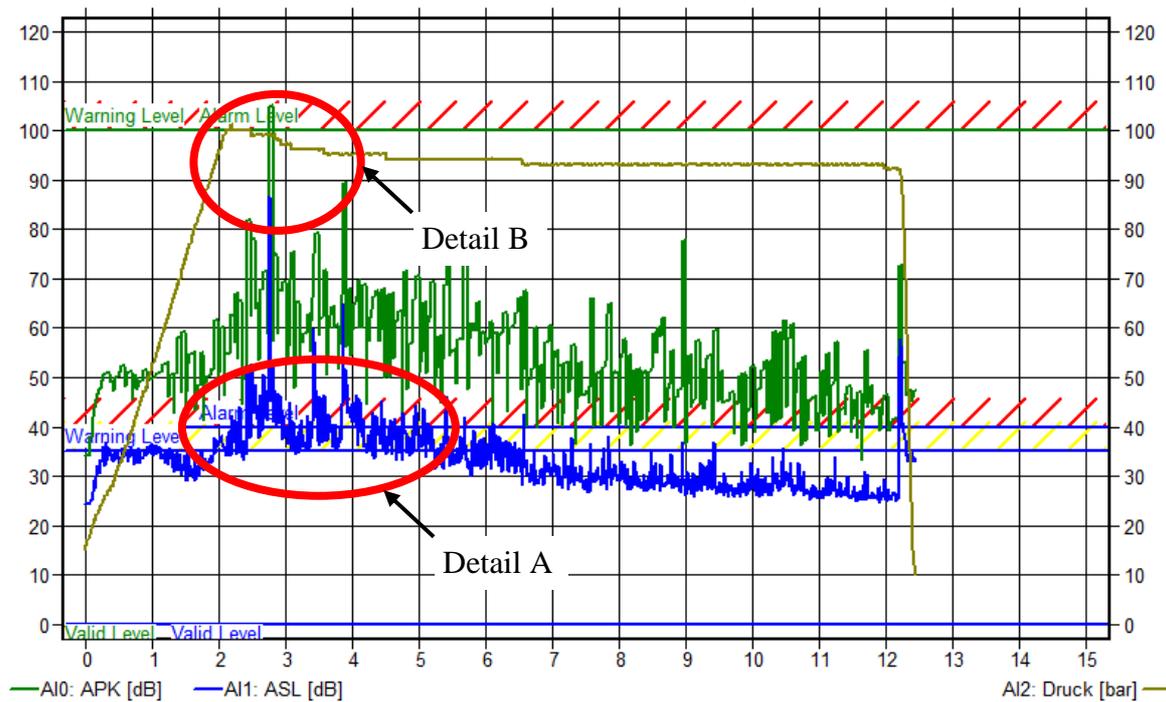


Abb. 10: Signalverläufe bei Stabbruch

4.3 Problematik in der Praxis

In der Praxis zeigt sich die Problematik, dass oft Störgeräusche vorhanden sind, welche die Messung beeinträchtigen und vor allem die automatische Bewertung der Signale erschweren. Die Störgeräusche werden hauptsächlich durch die verwendete Maschine bestimmt. So hat sich gezeigt, dass Maschinen mit einem gewissen Verschleiss, Verschmutzung oder mangelnder Schmierung während dem Druckaufbau sehr hohe Schallemissionen erzeugen können. Das Problem verschärft sich insbesondere, wenn beim Krimpvorgang noch hohe Kräfte resp. Drücke nötig sind. Abb. 11 zeigt die Signalverläufe einer solchen Verpressung. Die Pegel der Akustiksignale weisen während dem Druckaufbau gleich hohe Werte auf, wie bei einem Stabbruch. Es ist aber zu erkennen, dass während dem Druckaufbau noch kein Bruch aufgetreten ist, da die Pegel der Akustiksignale rasch wieder auf den Grundstörpegel absinken. Erst nach einer Haltezeit von ca. 6 s ist wieder ein markanter Anstieg der Signalpegel zu erkennen.

In dieser Situation ist also eine Bewertung der Verpressung alleine aufgrund der Signalpegel nicht möglich. Insbesondere auch da der Druckabfall beim Eintritt des Ereignisses nicht markant ist. Dies wiederum deutet daraufhin, dass der Stab nicht komplett zerbrochen ist, sondern nur einzelne Risse aufgetreten sind. Um trotzdem eine automatische Bewertung zu ermöglichen, wird zusätzlich die Zeitdauer berücksichtigt, während dieser die Signale die gesetzten Grenzwerte überschreiten. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Signale beim Druckaufbau den gezeigten Verlauf aufweisen und nicht schon zu diesem Zeitpunkt kontinuierlich über dem Grenzwert liegen. Die Herausforderung liegt also im Festlegen dieser Grenzwerte. Liegen diese zu hoch, werden Stabbrüche nicht erkannt. Liegen sie zu tief, erfolgen zu viele Falschmeldungen, welche überprüft werden müssen.

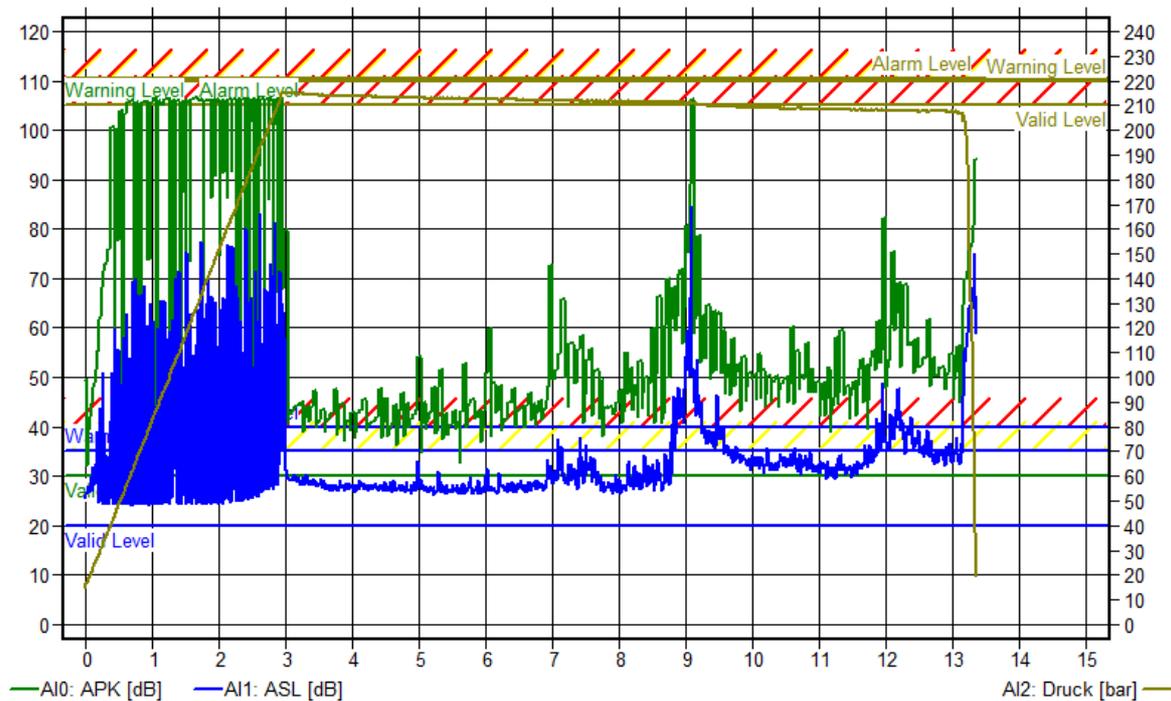


Abb. 11: Signalverläufe mit hohen Störgeräuschen

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die praktische Erfahrung hat gezeigt, dass durch den Einsatz der Schallemissionsmessung die Prozesssicherheit beim Krimparmieren von Verbund-Langstabisolatoren erhöht werden kann.

Die Anwendung des Verfahrens ist jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden. So müssen die Parameter für die Grenzwerte empirisch ermittelt und an die jeweiligen Gegebenheiten wie Maschinentyp, Material und Grösse der Halbzeuge angepasst werden, um eine automatische Signalauswertung zu ermöglichen. Auch der mechanische Zustand der Krimmaschine hat einen grossen Einfluss auf die Signalqualität, wodurch die Signalauswertung erschwert wird. Dies wiederum bietet aber die Möglichkeit einer qualitativen Bewertung des Maschinenzustandes woraus eine allfällig nötige Wartung der Maschine eingeleitet werden kann.

6 Referenzen

- [1] IEC 61109 Ed 2: 2008: Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria
- [2] K. O. Papailiou, F. Schmuck: Silikon-Verbundisolatoren: Werkstoffe, Dimensionierung, Anwendungen. Springer Verlag, 2012, ISBN 978-3-642-23813-0
- [3] M. Schlossig, Ch. Bierögel, W. Grellmann: Prozedur zur Validierung von akustische Sensoren für die Schallemissionsprüfung an Kunststoffen (2010)
- [4] J. Brunner, G. P. Terrasi: Unterstützende SE-Messungen beim Crimpvorgang, EMPA Prüfbericht Nr. 5214002761 (2013)
- [5] User Manual ASCO-DAQ2, Vallen Systeme GmbH (2012)