

DIN EN 15857

ICS 19.100

**Zerstörungsfreie Prüfung –
Schallemissionsprüfung –
Prüfung von faserverstärkten Polymeren - Spezifische Vorgehensweise
und allgemeine Bewertungskriterien;
Deutsche Fassung EN 15857:2010**

Non-destructive testing –
Acoustic emission –
Testing of fibre-reinforced polymers - Specific methodology and general evaluation
criteria;
German version EN 15857:2010

Essais non destructifs –
Émission acoustique –
Essai des polymères renforcés par des fibres – Méthodologie spécifique et critères
d'évaluation généraux;
Version allemande EN 15857:2010

Gesamtumfang 45 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 15857:2010) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Gremium ist der NA 062-08-23 AA „Ultraschallprüfung“ im Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Deutsche Fassung

Zerstörungsfreie Prüfung —
Schallemissionsprüfung —
Prüfung von faserverstärkten Polymeren —
Spezifische Vorgehensweise und allgemeine
Bewertungskriterien

Non-destructive testing —
Acoustic emission —
Testing of fibre-reinforced polymers —
Specific methodology and general evaluation criteria

Essais non destructifs —
Émission acoustique —
Essai des polymères renforcés par des fibres —
Méthodologie spécifique et critères d'évaluation généraux

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 4. Dezember 2009 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Qualifizierung des Personals	7
5 Schallemissionsquellen und akustisches Verhalten von FVP	7
5.1 Mechanismen für Schallemissionsquellen	7
5.2 Charakterisierung der Wellenausbreitung und der Dämpfung	8
5.3 Prüftemperatur	9
5.4 Ortungsverfahren.....	9
5.5 Analyse der Schallemission von FVP-Werkstoffen.....	10
6 Richtlinien für Instrumentierung und Überwachung	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Sensoren.....	11
6.3 Positionierung und Abstand der Sensoren	11
6.4 Ankopplung und Anbringung der Sensoren.....	11
6.5 Nachweisschwelle und Bewertungsschwelle.....	12
6.6 Aufbringung der Belastung	12
6.7 Diagramme für die Echtzeitüberwachung	13
7 Spezifische Vorgehensweise.....	14
7.1 Allgemeines	14
7.2 Prüfung von Proben	14
7.3 Prüfung von Bauteilen und Konstruktionen	14
7.4 Überwachung der Schadensfreiheit	22
8 Auswertung der Schallemissionsergebnisse/Quellenmechanismen.....	22
9 Dokumentation.....	23
Anhang A (informativ) Empfohlene Standardformate für die Darstellung von Schallemissionsdaten (Beispiele).....	24
A.1 AT an Proben.....	24
A.2 AT an Bauteilen und Konstruktionen, Beispiel 3: Schallemissionsdaten aus einer Druckprüfung	34
A.3 Neuere (verbesserte) Analyseverfahren.....	39
Literaturhinweise	41

Vorwort

Dieses Dokument (EN 15857:2010) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juli 2010, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juli 2010 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Die zunehmende Anwendung faserverstärkter Polymerwerkstoffe (FVP) (en: fibre-reinforced polymer materials FRP) für konstruktive Zwecke (z. B. in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Fahrzeugbau, im Tief- und Verkehrsbau) und für infrastrukturelle Zwecke (z. B. Gasflaschen, Lagertanks, Rohrleitungen) erfordert entsprechende Entwicklungen im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung.

Die Schallemissionsprüfung (AT) ist ein Prüfverfahren, das für die Werkstoffklasse der faserverstärkten Polymere (FVP) gut geeignet ist, weil es eine ausreichende Empfindlichkeit für den Nachweis der in diesen Werkstoffen üblicherweise anzutreffenden Schadensmechanismen hat.

Die Schallemissionsprüfung wird bereits zur Überwachung bei Belastungsversuchen (zwecks Erhöhung der Prüfsicherheit) sowie zu Abnahmeprüfungen, regelmäßigen (planmäßigen) Inspektionen und zur wiederkehrenden oder kontinuierlichen Echtzeitüberwachung (Überwachung der Schadensfreiheit) von Druckbehältern, Lagertanks und anderen sicherheitsrelevanten FVP-Konstruktionen eingesetzt.

Die Schallemissionsprüfung (AT) bietet Möglichkeiten, wenn übliche zerstörungsfreie Prüfverfahren (z. B. Prüfungen mit Ultraschall oder Prüfungen mit dem Water-Jacket-Verfahren) nicht anwendbar sind (z. B. für „dicke“ Gasflaschen mit einer Kohlenstofffaserverstärkung, die für Lagerung und Transport von Erdgas unter Druck [CNG], gasförmigen Wasserstoff usw.) vorgesehen sind.

Die in EN 13554 festgelegten allgemeinen Grundlagen gelten (wie angegeben) für alle Werkstoffklassen, obwohl in der Norm nur Anwendungen für Teile aus Metall behandelt werden (siehe Abschnitt 6 „Anwendungen für Schallemissionsverfahren“).

In den für die AT wesentlichen Eigenschaften unterscheiden sich FVP und Metalle jedoch beträchtlich.

FVP-Konstruktionen sind inhomogen und weisen in Abhängigkeit von der Faserausrichtung, bzw. der Anordnung der Lagen, einen bestimmten Anisotropiegrad auf.

Zusammensetzung und Eigenschaften des Werkstoffs sowie die geometrischen Bedingungen haben Einfluss auf die Ausbreitung der Wellen, z. B. die Wellenart (Wellenmode), die Ausbreitungsgeschwindigkeit, Dispersion und Dämpfung und damit auf die von den Sensoren erfassten Schallemissionssignale.

Verbundwerkstoffe mit ausgeprägt viskoelastischer Polymermatrix (z. B. Thermoplaste) haben in Abhängigkeit von der Wellenausbreitung parallel oder senkrecht zur Faserausrichtung, vom Plattenwellenmodus und vom frequenz- und temperaturabhängigen Relaxationsverhalten eine vergleichsweise hohe Schallwellendämpfung.

Um die AT erfolgreich auf Werkstoffe, Bauteile und Konstruktionen aus FVP-Werkstoffen anzuwenden, ist eine spezifische Vorgehensweise erforderlich (z. B. Speicherung aller Wellenformen, Anwendung spezieller Sensoren und Sensoranordnungen, spezifische Schwellwerteinstellungen, geeignete Belastungsmuster, eine verbesserte Datenanalyse usw.), die sich von der für Metalle angewendeten Vorgehensweise unterscheidet.

Die Bewertungskriterien für die AT an Bauteilen und Konstruktionen aus FVP werden bisher überwiegend empirisch (mit Hilfe von Vergleichsprüfungen an einer begrenzten Anzahl von Proben) oder spezifisch klassifiziert (mit Hilfe firmeneigener, nicht öffentlicher Datenbanken).

Die Festlegung geeigneter Bewertungskriterien für spezielle Anwendungen der AT kann möglicherweise so viel Zeit, Aufwand und Kosten erfordern, dass sie sich nicht lohnt.

Bewertungskriterien, die für eine bestimmte Klasse von Werkstoffen gelten, in diesem Dokument für FVP-Werkstoffe, fördern die Entwicklung neuer Anwendungen.

In letzter Zeit wurden weitere AT-Techniken entwickelt, z. B. die „modale Schallemission“ (Analyse von Welle und Wellenart im Zeit- und im Frequenzbereich) und die Mustererkennungsanalyse.

Besonders Techniken zur Merkmalsextraktion und Mustererkennung scheinen vielversprechend zu sein, um unter anderem eine verbesserte Quellenortung und eine bessere Unterscheidung der Schädigungsmechanismen in Werkstoffen zu bieten, die ein komplexes Wellenausbreitungsverhalten zeigen und die Signale erzeugen, die von mehreren, gleichzeitig wirksamen Mechanismen herrühren, wie das z. B. bei den FVP der Fall ist.

1 Anwendungsbereich

In dieser Europäischen Norm werden die allgemeinen Grundlagen für die Schallemissionsprüfung (AT) von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen aus faserverstärkten Polymeren (FVP) mit dem Ziel beschrieben,

- eine Charakterisierung der Werkstoffe;
- eine Abnahmeprüfung/Prüfung der Fertigungsqualität;
- eine wiederkehrende Prüfung/Inspektion während des Betriebs;
- eine Überwachung der Schadensfreiheit

durchzuführen.

Wenn die AT zur Bewertung der Integrität von Werkstoffen, Bauteilen oder Konstruktionen aus FVP oder zur Identifizierung kritischer Bereiche angewendet wird, in denen eine hohe Schadensakkumulation oder eine Ausbreitung der Schäden unter Last zu verzeichnen ist, legt diese Norm auch die spezifische Vorgehensweise fest (z. B. die geeignete Instrumentierung, die übliche Anordnung der Sensoren, die Ortungsverfahren usw.).

Diese Norm gibt ferner die verfügbaren und allgemein anwendbaren Bewertungskriterien für die AT von FVP an und, sie legt für den Fall, dass keine Bewertungskriterien verfügbar sind, Verfahren zum Festlegen geeigneter Kriterien fest.

ANMERKUNG Die strukturelle Signifikanz der Schallemission kann nicht in allen Fällen zweifelsfrei — nur basierend auf den Schallemissionsbewertungskriterien — beurteilt werden, sondern es können weitere Inspektionen und Bewertungen erforderlich sein (z. B. andere zerstörungsfreie Prüfverfahren oder bruchmechanische Berechnungen).

In dieser Norm werden auch Grafikformate zur Präsentation der bei der AT gewonnenen Daten empfohlen, die sowohl online während der Prüfung als auch nach Auswertung der Prüfung die Anwendung qualitativer und quantitativer Bewertungskriterien ermöglichen und dadurch einen Vergleich von Schallemissionsprüfungsergebnissen vereinfachen, die an unterschiedlichen Prüfstandorten und von unterschiedlichen Prüforganisationen ermittelt wurden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 473, *Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung — Allgemeine Grundlagen*

EN 1330-1:1998, *Zerstörungsfreie Prüfung — Terminologie — Teil 1: Allgemeine Begriffe*

EN 1330-2:1998, *Zerstörungsfreie Prüfung — Terminologie — Teil 2: Begriffe, die von allen zerstörungsfreien Prüfverfahren benutzt werden*

EN 1330-9:2009, *Zerstörungsfreie Prüfung — Terminologie — Teil 9: Begriffe für die Schallemissionsprüfung*

EN 13477-1, *Zerstörungsfreie Prüfung — Schallemissionsprüfung — Gerätecharakterisierung — Teil 1: Gerätebeschreibung*

EN 13477-2, *Zerstörungsfreie Prüfung — Schallemissionsprüfung — Gerätecharakterisierung — Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen*

EN 13554, *Zerstörungsfreie Prüfung — Schallemissionsprüfung — Allgemeine Grundlagen*

EN 14584, *Zerstörungsfreie Prüfung — Schallemissionsprüfung — Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung — Planare Ortung von Schallemissionsquellen*

EN 15495, *Zerstörungsfreie Prüfung — Schallemissionsprüfung — Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung — Zonenortung von Schallemissionsquellen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1330-1:1998, EN 1330-2:1998 und EN 1330-9:2009 und die folgenden Begriffe.

3.1

Faser

schlankes und stark verlängertes massives Material

ANMERKUNG Üblicherweise mit einem Verhältnis Länge/Durchmesser größer als 5 und einem Zug-E-Modul größer als 20 GPa. Für die kontinuierliche (Filament-Achse) oder diskontinuierliche Verstärkung mit Fasern werden im Allgemeinen Glas, Kohlenstoff oder Aramid verwendet.

3.2

Polymermatrix

makromolekulare Substanz, in die Fasern eingebettet sind

ANMERKUNG Polymermatrices sind im Allgemeinen Duomere (z. B. Epoxid, Vinylesterpolyimid oder Polyester) oder hoch leistungsfähige Thermoplaste [z. B. Poly(amidimid), Poly(ether-etherketon) oder Polyimid]. Die mechanischen Eigenschaften von Polymermatrices werden merklich durch Temperatur, Zeit, Alterung und Umgebung beeinflusst.

3.3

Faserlaminat

zweidimensionales Element aus zwei oder mehr Lagen faserverstärkter Polymere (Schichten aus dem gleichen Material mit übereinstimmender Ausrichtung)

ANMERKUNG Lamine werden durch eine Versiegelung verfestigt, die unter Wärme und/oder Druck erfolgt. Lamine entstehen durch Schichtung ebener (oder gebogener) Lagen unidirektionaler Fasern oder Gewebelagen in einer Polymermatrix. Die Lagen können unterschiedlich dick sein und aus gleichen oder unterschiedlichen Fasermaterialien in gleichen oder unterschiedlichen Matrixmaterialien bestehen. Die einzelnen Lagen können eine unterschiedliche Faserorientierung aufweisen.

3.4

faserverstärkter Polymerwerkstoff

FVP

Verbundwerkstoff (Komposit) mit einer Polymermatrix und Verstärkungsfasern, bei denen eine oder mehrere Faserorientierungen bezogen auf eine Bezugsrichtung angeordnet sind

ANMERKUNG Es handelt sich im Allgemeinen um kontinuierliche Faserlamine. Zu den Laminen mit einer für den Herstellungszustand typischen geometrischen Anordnung der kontinuierlichen Fasern gehören Lamine mit einachsiger (uniaxialer) Faserorientierung, kreuzweise verstärkte (cross-ply) Lamine und Angle-ply-Lamine oder textile Flächengebilde. FVP gibt es auch mit einer Verstärkung durch diskontinuierliche Fasern, z. B. durch kurze oder lange Fasern oder Matten (Vliese) mit beliebiger Orientierung.

3.5

Delamination

Schichtentrennung

unter unterschiedlichen Belastungsarten in Verbundwerkstoffen auftretender intralaminarer oder interlaminarer Bruch (Ausbreitung von Rissen)

ANMERKUNG Delamination tritt meist zwischen den einzelnen Faserlagen auf, indem sich die Laminatlagen mit der geringsten Bindung oder mit den höchsten Spannungen unter einer statischen Beanspruchung oder unter einer Dauerschwingbeanspruchung (Ermüdung), unter Schlageinwirkung (Stößen usw.) abtrennen. Bei Delamination liegt eine große Anzahl von Mikrobrüchen und Sekundäreffekten vor, z. B. aneinander reibende Bruchflächen. Die Delamination entwickelt sich innerhalb des Verbundwerkstoffs, ohne dass sie auf der Oberfläche bemerkt werden kann; sie ist häufig mit einem merklichen Verlust der mechanischen Steifigkeit und Festigkeit verbunden.

3.6

Mikrobruch (in Verbundwerkstoffen)

Auftreten örtlicher Versagensmechanismen im mikroskopischen Bereich, z. B. Versagen der Matrix (Haarrissbildung (Crazing), Rissbildung), Versagen an der Grenzfläche Faser/Matrix (Adhäsionsbruch) oder Ausreißen von Fasern sowie Faserversagen (Bruch, Knicken)

ANMERKUNG Der Mikrobruch wird durch örtliche Überbeanspruchung des Verbundwerkstoffs ausgelöst. Eine Häufung von Versagensereignissen im Mikrobereich führt zu einem Versagen im Makrobereich, sie bestimmt die Bruchfestigkeit und Lebensdauer des Verbundwerkstoffs.

4 Qualifizierung des Personals

Es wird vorausgesetzt, dass die Schallemissionsprüfung von qualifiziertem und geeignetem Personal durchgeführt wird. Um diese Qualifikation nachzuweisen, wird empfohlen, das Prüfpersonal nach EN 473 zu zertifizieren.

5 Schallemissionsquellen und akustisches Verhalten von FVP

5.1 Mechanismen für Schallemissionsquellen

Eine Beschädigung der FVP durch Bruchmechanismen im Mikro- und Makrobereich erzeugt eine hohe Schallemissionsaktivität und -intensität, woraus sich die besonders gute Eignung für die Schallemissionsprüfung (AT) ergibt.

Die üblichen Versagensmechanismen in FVP, die durch eine AT nachgewiesen werden, sind:

- a) Rissbildung in der Matrix;
- b) Ablösen an der Grenzfläche Faser/Matrix (debonding);
- c) Auszug von Fasern (pull-out);
- d) Faserbruch;
- e) intralaminare oder interlaminare Rissausbreitung (Delamination/Aufspießen).

Die sich für FVP ergebende Schallemission (AE) (en: acoustic emission) hängt von vielen Faktoren ab, z. B. von den einzelnen Komponenten des Werkstoffs, dem Schichtaufbau des Laminats, dem Herstellungsverfahren, Fehlern, der aufgetragenen Belastung, den geometrischen Bedingungen und den bei der Prüfung vorliegenden Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Beanspruchung durch flüssige oder gasförmige Medien oder durch ultraviolette Strahlung usw.). Daher ist zur Auswertung der unter bestimmten Bedingungen emittierten Schallwellen die Kenntnis dieser Faktoren ebenso notwendig wie entsprechende Erfahrungen mit der Schallemission des jeweiligen Werkstoffs und der jeweiligen Konstruktion unter bekannten Spannungsbedingungen.

Das Bruchversagen eines FVP erzeugt Schallemission mit Burstsignalen hoher Aktivität, kann jedoch auch den Anschein einer kontinuierlichen Emission haben.

Für bestimmte Arten von Konstruktionen repräsentieren im gesamten Bauteil verteilte Schallemissionsquellen, die unter bestimmten Bedingungen durch Mikroversagensmechanismen in der Matrix oder der Grenzfläche verursacht werden, das „normale“ Verhalten. Diese Versagensmechanismen treten besonders während der ersten Belastung von neu hergestellten (noch nicht beanspruchten) FVP-Konstruktionen auf, bei denen eine Detektion der ersten signifikanten Schallemission erfolgt, wenn die Dehnung des Verbundwerkstoffs in einem Bereich von 0,1 % bis 0,3 % liegt.

Bei optimierten Verbundwerkstoffen mit hoher Steifigkeit kann sich der Beginn der ersten signifikanten Schallemission so verschieben, dass eine Detektion erst bei vergleichsweise hohen Spannungen erfolgt, weil die Matrix des Verbundwerkstoffs nur gering beansprucht wird.

Für hochfeste Verbundwerkstoffe wird die Schallemission, die neben anderen Quellen auf den Bruch erster Fasern zurückzuführen ist, üblicherweise bei Spannungen beobachtet, die bei etwa 40 % bis 60 % der Bruchfestigkeit des Verbundwerkstoffs liegen.

Ein „normales“ Verhalten der FVP-Konstruktion ist auch dadurch gekennzeichnet, dass unterschiedliche Bereiche mit abwechselnd höherer und niedrigerer Schallemissionsaktivität auftreten, besonders bei höheren Spannungen, weil eine Umverteilung der lokalen Spannungen erfolgt.

Wenn ausgeprägte Inhomogenitäten oder andere Auslöser für eine hohe Spannungskonzentration vorliegen, die das Versagensverhalten von Konstruktionen aus FVP beeinflussen, konzentriert sich die Schallemissionsaktivität auf diesen beeinflussten Bereich und bietet damit ein Verfahren zum Nachweis des Versagensereignisses.

Allerdings ist anzumerken, dass umgekehrt keine anormale Schallemission erzeugt wird, wenn die Inhomogenitäten in den Bereichen des Bauteils liegen, die bei der Prüfung nicht beansprucht werden oder wenn die Inhomogenitäten strukturell nicht signifikant sind.

5.2 Charakterisierung der Wellenausbreitung und der Dämpfung

Die Schallemissionssignale von Wellen, die sich durch große Prüfobjekte bewegen, werden durch Dispersions- und Dämpfungseffekte beeinflusst.

Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix sind inhomogene und häufig auch anisotrope Werkstoffe, die in vielen Anwendungen als dünne Platten oder dünnwandige Schalen vorliegen. In Teilen mit geringer Dicke breiten sich die Wellen im Plattenwellenmodus aus (z. B. als Lamb-Wellen). Die Anisotropie resultiert hauptsächlich aus dem Volumen und der Ausrichtung der Fasern. Die Wellenausbreitung wird beeinflusst, indem in die Geschwindigkeit, Dämpfung und die starke Dispersion der Plattenwellen eine Richtungsabhängigkeit eingebracht wird.

Die Ausbreitung der Schallwellen in FVP-Werkstoffen führt zu einer signifikanten Änderung von Amplitude und Frequenz über die Distanz. Der Umfang dieser Einflüsse hängt von der Ausbreitungsrichtung, den Werkstoffeigenschaften, der Dicke und den geometrischen Bedingungen des Prüfgegenstands ab.

Nach EN 14584 muss eine Messung der Dämpfungskenngrößen in repräsentativen Bereichen der Prüfgegenstände durchgeführt werden.

Der Abschattungseffekt durch Stützen und andere Zubehörteile muss quantitativ erfasst werden; eine mögliche Übertragung von Schallwellen durch eine Prüfflüssigkeit muss berücksichtigt werden.

Die Dämpfung muss in verschiedenen Richtungen und besonders parallel und rechtwinklig zu den Hauptrichtungen der Faserausrichtung gemessen werden, falls die Hauptrichtungen bekannt sind. Wenn es sich bei den Prüfgegenständen um teilweise mit einer Flüssigkeit gefüllte Behälter handelt, muss die Dämpfung oberhalb und unterhalb des Flüssigkeitsstandes gemessen werden.

Für Konstruktionen aus FVP-Laminaten können die Verluste der Maximalamplituden der transienten Signale nach einer Wellenausbreitung über etwa 500 mm im Bereich von 20 dB bis 50 dB liegen. Die Dämpfung rechtwinklig zur Faserausrichtung ist im Allgemeinen wesentlich höher als in der Richtung parallel zur Faserausrichtung.

ANMERKUNG Die Maximalamplitude einer Hsu-Nielsen-Quelle kann in unterschiedlichen Bereichen einer Konstruktion in Abhängigkeit von den spezifischen viskoelastischen Eigenschaften des FVP schwanken.

5.3 Prüftemperatur

Das mechanische Verhalten (Steifigkeit, Festigkeit) und das akustische Verhalten (Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Dämpfung) von FVP-Konstruktionen und damit auch ihre Schallemissionsaktivität und die Charakteristika der Schallemissionswellen (Wellenformen, Spektren) ändern sich beträchtlich, wenn sich die Prüftemperatur an die Übergangstemperaturbereiche der Matrix annähert, z. B. an den Übergang vom duktilen in den spröden Zustand (β -Relaxation von teilkristallinen Matrices) oder den Glas-Gummi-Übergang (α -Relaxation von amorphen Matrices).

Aus diesem Grund muss die Prüftemperatur bei der Auswertung der Daten und bei der Interpretation der Ergebnisse der Schallemissionsprüfung sowie auch beim Belastungsprofil berücksichtigt werden.

5.4 Ortungsverfahren

In FVP-Konstruktionen ist die genaue Quellenortung schwierig. In den meisten Überwachungssituationen, die an kompletten Konstruktionen durchführbar sind, regen die Schallemissionswellen durch die hohe Dämpfung in Verbundwerkstoffen nur den nächstgelegenen Sensor an. Deshalb ist die Zonenortung üblicherweise die wichtigste Quelle für Ortungsangaben. Die Anwendung der Zonenortung verhindert jedoch nicht die lineare oder planare Ortung von Schallemissionsquellen, die genügend Wellenenergie haben, um mehrere Sensoren anzuregen, so dass eine Ortung mit Hilfe der Laufzeitdifferenzen möglich ist. Die lineare oder planare Ortung ist eine hilfreiche Ergänzung, hauptsächlich zur Ortung von Emissionen mit höherer Energie. Bei beiden Verfahren muss sehr sorgfältig vorgegangen werden, wenn Zeitmessungen für die Ortung verwendet werden, weil sich in FVP-Werkstoffen die Schallgeschwindigkeit und die Dämpfung üblicherweise mit der Ausbreitungsrichtung ändern.

Bei Anwendung der Ortungsverfahren auf FVP muss ein weiterer Warnhinweis beachtet werden, der die sehr hohen Emissionsraten (Hit-Überlappung) betrifft.

Der Sensorabstand und die Positionierung der Sensoren sollte so vorgenommen werden, dass die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

a) Frequenzbereich des Sensors

Niedrigere Frequenzen bieten einen größeren Nachweisbereich, können jedoch bewirken, dass unerwünschte Störgeräusche empfangen werden. Für die praktische Prüfung von FVP werden im Allgemeinen Sensoren mit „hoher Frequenz“ angewendet (100 kHz bis 300 kHz), die einen „lokalen Bereich“ zur Überwachung von Bereichen mit hoher Spannung bieten, während Sensoren mit „niedriger Frequenz“ (30 kHz bis 60 kHz) eingesetzt werden, um eine vollständige Überdeckung zu ermöglichen. Es ist üblich, zwei Frequenzbereiche gleichzeitig anzuwenden.

Für FVP-Platten sind folgende Nachweisbereiche anzuwenden: 150 kHz für Distanzen von 400 mm bis 700 mm, 60 kHz für Distanzen von 600 mm bis 1 200 mm und 30 kHz für Distanzen von 900 mm bis 2 000 mm oder darüber liegende Distanzen in Abhängigkeit vom Werkstoff.

Für die Untersuchung der Schallemissionsquellenmechanismen kann die Anwendung von Breitbandsensoren vorteilhaft sein.

b) Richtungsabhängigkeit der Schallwellenausbreitung und -dämpfung

Bedingt durch die höhere Dämpfung können mehr Sensoren in einer Richtung erforderlich sein als in einer anderen Richtung mit geringerer Dämpfung. Durch Anwendung von Ortungstechniken, welche die richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen berücksichtigen, ist eine höhere Ortungsgenauigkeit erreichbar. Wenn die Software der Prüfausrüstung keine Wellengeschwindigkeiten berücksichtigen kann, ist es möglich, durch eine „virtuelle“ Sensorpositionierung die Ortungsleistung zu verbessern.

Um brauchbare Ergebnisse zu erreichen, wird die Überprüfung der Quellenortung mit einer Hsu-Nielsen-Quelle oder anderen Quellen empfohlen, die eine Schallemission simulieren.

c) Ortungsgenauigkeit

Wird die planare Ortung von Schallereignissen mit niedrigerer Energie gefordert, ist eine größere Anzahl von Sensoren notwendig, um die geforderten drei Hits zu erreichen.

Die planare Ortung ist besonders für kleine Proben oder in den Fällen von Vorteil, in denen ein lokaler Bereich einer Konstruktion besonders interessiert.

5.5 Analyse der Schallemission von FVP-Werkstoffen

Folgende Analysearten sind anwendbar:

a) Signalverarbeitung auf der Basis von Hit, Energie und RMS

Bei den meisten „Prüf“-Anwendungen, bei denen das zu untersuchende Bauteil nicht kurz vor dem Versagen sein sollte, unterscheidet sich die Verarbeitung der Schallemissionssignale für FVP nicht merklich von der Signalverarbeitung, die für Metalle notwendig ist. Die wichtigsten Unterschiede bestehen darin, dass Signale mit hoher Frequenz beträchtlich kürzer sind, weil kein Nachhall auftritt. Wenn ein Schaden erst einmal ausgelöst ist, wird die Emissionsrate wesentlich höher als bei Metallen. Wegen dieser Faktoren ist es erforderlich, dass das Überwachungssystem so eingestellt wird, dass eine geeignete Signalverarbeitung erfolgt, indem z. B. kürzere Diskriminierungszeiten zur Hit-Trennung angewendet werden. Es kann sein, dass ein signifikanter Schaden bei einer „Hit-basierten“ Analyse als kontinuierliches Signal angezeigt wird; aus diesem Grund sollte stets eine ergänzende Signalverarbeitung z. B. unter Anwendung der RMS oder des Average Signal Levels (ASL), d. h. der mittleren Signalthöhe durchgeführt werden, oder die „absolute Energie“ sollte als kontinuierlicher Parameter gemessen werden.

b) Modale Schallemission; Analyse der Wellenform; Wavelets; Frequenzspektren

Die Analyse der Wellenformen bei der Schallemission kann nützliche Angaben zum Quellenmechanismus und den Wellenausbreitungswegen liefern. Diese Analyse ist jedoch kein „Routineverfahren“, sondern eine Aufgabe für einen Experten, der Erfahrungen mit den zu untersuchenden Werkstoffen vorweisen kann. Die Analyse der Wellenform wird im Allgemeinen nach der AT durchgeführt. Diese Analyse erfordert die Speicherung von Zeitsignalen entweder abhängig von der Schallemissionsaktivität oder durch eine kontinuierliche Signalaufzeichnung (Streaming).

c) Echtzeitanalyse

Die Echtzeitanalyse der nachgewiesenen Schallemission und festgelegte Bewertungskriterien werden üblicherweise angewendet und sind wichtig, wenn eine Überwachung verlangt wird, um Rückinformationen für die fortschreitende Lastaufbringung zu erhalten. Diagramme einer Echtzeitüberwachung müssen alle Schallemissionsparameter und alle sonstigen Parameter enthalten, die notwendig sind, um erforderlichenfalls eine Entscheidung zum Abbruch der Schallemissionsprüfung zu treffen.

d) Analyse im Anschluss an die Schallemissionsprüfung

Die Analyse nach der AT wird angewendet, um die erfassten Daten besser zu verstehen und Signale von bekannten Störungsquellen herauszufiltern sowie für Anwendungen in der Produktion, bei denen es nicht erforderlich ist, eine Echtzeitanalyse durchzuführen.

6 Richtlinien für Instrumentierung und Überwachung

6.1 Allgemeines

Alle Gerätekomponten (Hardware und Software) müssen den Anforderungen nach EN 13477-1 und EN 13477-2 entsprechen.

Die Geräte müssen in der Lage sein, die Datenerfassung und die Analyse nach der schriftlich festgelegten Prüfanweisung in Echtzeit durchzuführen.

6.2 Sensoren

Die Auswahl des Frequenzmessbereichs des Schallemissionssensors hängt vom Zweck der AT und von den in 5.4 beschriebenen Faktoren ab.

Zur Untersuchung der Schadensmechanismen und der Wellenausbreitung können Breitbandsensoren besser geeignet sein; sie arbeiten jedoch mit Plattenwellen, die sich als Funktion der Frequenz mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten und eine zusätzliche Variable darstellen. Bei der Auswahl von Breitbandsensoren sollte ihre potenziell geringere Empfindlichkeit und die Eignung ihrer Kenngrößen für die jeweilige Laminatdicke beachtet werden.

6.3 Positionierung und Abstand der Sensoren

Wenn keine geeignete Vorschrift für die Sensorpositionierung existiert, wird die Anordnung der Sensoren im Allgemeinen auf die folgende Weise bestimmt:

- a) Auf der zu untersuchenden Konstruktion werden 150-kHz-Sensoren zur Überwachung von Bereichen mit hoher Spannung (Beanspruchung) angewendet;
- b) sofern nicht alle Bereiche vollständig durch die 150-kHz-Sensoren abgedeckt werden, sind 30-kHz- bis 60-kHz-Sensoren zur Überwachung der restlichen Prüfflächen anzuwenden, wobei jedoch zu beachten ist, dass diese Sensoren für Störgeräusche anfällig sein können;
- c) der Abstand zwischen den Sensoren wird auf der Grundlage einer Dämpfungsmessung in unterschiedlichen Richtungen bestimmt. Die für den maximal zulässigen Sensorabstand „ $d_{\max}$ “ bei der planaren Ortung (EN 14584) oder bei der Zonenortung (EN 15495) existierenden Richtlinien müssen eingehalten werden.

Der Schwellwert für die Bewertung der Schallemission wird in 6.5 definiert.

ANMERKUNG Es muss berücksichtigt werden, dass die Dämpfung in FVP zunimmt, wenn während der Belastung Mikrobrüche im Werkstoff auftreten.

6.4 Ankopplung und Anbringung der Sensoren

Um eine gute Übertragung der Schallwellen zu erreichen, muss ein akustisches Koppelmittel für die Sensoren angewendet werden, das mit dem Verbundwerkstoff weder chemisch noch physikalisch reagiert (z. B. durch das Auslösen von Haarrissbildung, Aufquellen, Rissbildung oder anderen Versagensmechanismen im Mikrobereich). Geeignete Koppelmittel sind Hochvakuumfette oder -haftmittel auf Siliconbasis, z. B. chemisch härtender Silicongummi.

Konstruktionen aus Verbundwerkstoffen dürfen nicht bearbeitet werden, um an den Stellen, an denen die Sensoren anzubringen sind, eine ebene und glatte Oberfläche zu erzeugen. Zum Ausgleichen von Oberflächenrauheiten oder Krümmungen wird ein dickerer Film des Koppelmittels aufgebracht, der eine höhere Dämpfung (z. B. um Faktor 2) zur Folge hat, die aber akzeptiert werden muss.

Die Wahl des Koppelmittels hängt von den Prüfbedingungen (Temperatur, Feuchte, größte Oberflächenverformung infolge der Prüflast, Oberflächenrauheit usw.) ebenso wie von der notwendigen Beständigkeit bei Langzeitprüfungen ab. Das Koppelmittel darf bei allen möglichen Prüftemperaturen und bei den größten Verformungszuständen keine eigene Schallemission hervorrufen.

Eine sichere mechanische Anbringung der Sensoren unter Anwendung von Klebestreifen, Befestigungsringen mit Federn, elastischen Gummibändern usw. muss sichergestellt werden. Dabei müssen Störgeräuschsignale verhindert werden, die unter der aufgetragenen Belastung bei einer Bewegung des Sensors auf der Oberfläche der Konstruktion oder durch die Befestigungsvorrichtung des Sensors entstehen.

Vor der Prüfung muss die korrekte Funktion des Prüfgeräts nach EN 14584 mit einer Hsu-Nielsen-Quelle oder durch einen automatischen Sensortest (AST) mit elektronischen Impulsen verifiziert werden. Der Mittelwert für die Maximalamplitude einer Hsu-Nielsen-Quelle sollte vor der Prüfung um nicht mehr als ± 6 dB von dem Mittelwert aller Sensoren abweichen. Alle ± 6 dB überschreitenden Abweichungen müssen untersucht und nach Möglichkeit korrigiert werden. Die entsprechenden Werte müssen am Ende der Prüfung unter Berücksichtigung einer durch zunehmende Schädigung während der Belastung erhöhten Schallschwächung protokolliert werden.

6.5 Nachweisschwelle und Bewertungsschwelle

Für die Nachweisschwelle wird ein Wert von X dB über dem größten Hintergrundgeräusch festgelegt; sie muss kleiner als die Bewertungsschwelle sein.

Die Nachweisschwelle muss hoch genug gesetzt werden, um zu vermeiden, dass für bestimmte Arten von Laminaten zu viele Daten erfasst werden, die das „normale“ Verhalten kennzeichnen.

Hohe Mikroversagensraten führen in der Praxis bei der ersten Belastung neuer (bisher noch nicht beanspruchter) Konstruktionen zu einer hohen Schallemissionsaktivität. Die Definition der Schallemission-Hits (und die Berechnung der Hit-Raten) aus den transienten Signalen gilt als Folge der hohen Schallemissionsaktivität und der niedrigen Nachweisschwelle nicht für die Bedingungen, bei denen eine scheinbar kontinuierliche Schallemission auftritt.

Für diesen Fall sollten geeignete Maßnahmen eingeplant werden. Beispiele für diese Maßnahmen sind Signalform-Streaming, Erhöhung des Schwellwerts (verursacht eine ungenauere Bestimmung der Ankunftszeiten und verringert die Ortungsgenauigkeit) oder die parallele Anwendung von Kanälen mit höheren Schwellwerten oder eine Analyse von Parametern kontinuierlicher Signale.

Vor der Prüfung müssen Fremdgeräusche eliminiert werden, die durch den Belastungsvorgang verursacht werden, z. B. Pumpengeräusche oder Geräusche durch Leckage der servohydraulischen Prüfeinrichtung oder der Druckausrüstung, das Reiben zwischen Spannklemmen und Proben usw. Falls das nicht möglich ist, dürfen eindeutig identifizierte Störgeräuschsignale bei einer Analyse im Anschluss an die Prüfung aus den Messdaten entfernt werden.

6.6 Aufbringung der Belastung

Die Aufbringung der Belastung hängt vom Zweck der Prüfung, dem Prüfgegenstand, vom Medium für eine Innendruckprüfung, sofern angewendet, und von den Anforderungen an die Betriebssicherheit ab.

Im Belastungsprofil müssen die maximale Prüfbelastung, die Belastungsgeschwindigkeit, die Höhe und Dauer von Lasthalteperioden (Zwischenhalten) und, wenn erforderlich, die Stufen für eine Entlastung/erneute Belastung zur Ermittlung des Felicity-Verhältnisses festgelegt werden.

In den Fällen, in denen die Prüfbelastung nicht ausreichend höher ist als die vorausgegangene maximale Belastung im Betrieb, kann vor der Prüfung eine längere Entlastungsphase des Prüfobjekts erforderlich sein.

Im Belastungsregime muss das Lastniveau für den Beginn der Erfassung von Schallemissionsdaten festgelegt sein.

Bei der Belastungsgeschwindigkeit muss die hohe Schallemissionsaktivität der FVP-Werkstoffe und das Potenzial für Hit-Überlappungen berücksichtigt werden, das zu einer kontinuierlichen Emission führt.