

ICAS Paper No. 68-34

THE REDUCTION OF NOISE BY THE USE OF OPTIMIZED
VIBRATION DAMPING MATERIALS

by

Hermann Oberst
Farbwerke Hoechst
Frankfurt (M), Germany

**The Sixth Congress
of the
International Council of the
Aeronautical Sciences**

DEUTSCHES MUSEUM, MÜNCHEN, GERMANY/SEPTEMBER 9-13, 1968

Preis: DM 2.00

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

1910

LÄRMBEKÄMPFUNG DURCH OPTIMAL EINGESTELLTE SCHWINGUNGSDÄMPFENDE STOFFE

H. Oberst
Farbwerke Hoechst AG.
vormals Meister Lucius & Brüning
Frankfurt (M)-Höchst
BR Deutschland

Zusammenfassung

Schwingungsdämpfende Stoffe werden zur Dämpfung der Biegeschwingungen von Blechkonstruktionen benutzt. Diese Maßnahme dient zur Pegelsenkung des von den Blechen in die Luft abgestrahlten Schalles, zur Verbesserung der Luftschalldämmung und zur Minderung der akustischen Ermüdung. Die höchsten Dämpfungen können mit amorphen thermoplastischen Polymeren erreicht werden. Schwingungsdämpfende Stoffe mit optimaler dämpfender Wirksamkeit in vorgeschriebenen Bereichen der Frequenz und der Temperatur konnten entwickelt werden. Sie werden angewandt als Schichten auf einer Seite der Bleche oder Metallplatten und in Verbundblech-(Sandwich-)Systemen, bestehend aus zwei äußeren Blechen und einer dazwischen liegenden dämpfenden viskoelastischen Schicht. Solche Mehrschicht-Systeme aus Blechen und dämpfenden Schichten werden in der Technik vielfach angewandt.

I. Einleitung

Schwingungsdämpfende Stoffe werden für die Dämpfung der Biegeschwingungen von Blechkonstruktionen benutzt. Auf diese Weise werden schwach gedämpfte Eigen- und Resonanzschwingungen der Bleche, die zur Abstrahlung störender Geräusche in die angrenzende Luft führen, unterdrückt, und der Geräuschpegel wird gesenkt. Freie Biege- und Dehnwellen können Schallenergie über ausgedehnte Blechkonstruktionen zu weit von den Schallquellen entfernten Punkten transportieren und dort Schallabstrahlung in die Luft verursachen. Auch in diesem Fall ist die Anwendung schwingungsdämpfender Stoffe nützlich, weil mit ihnen die Körperschallausbreitung durch die Dämpfung der freien Biege- wellen zum Teil unterdrückt wird. Außerdem kann die Dämpfung der Biegeschwingungen die Schalldämmung von Leichtbauwänden verbessern, den sogenannten Sandwichwänden, die aus äußeren

Metallplatten und einem Luftpolster dazwischen, das mit Luftschallabsorptionsstoffen gefüllt ist, bestehen. Die Dämpfung der Metallplatten verringert den Einfluß von Resonanzen und Ko- inzidenzen, die sonst zu einer Verringerung der Schalldämmung der Sandwichwand führen würden ⁽¹⁾. Schließlich konnte gezeigt werden, daß die Lebensdauer bei der akustischen Ermüdung der Metallplatten, beispielsweise in den Außenwänden von Düsenflugzeugen, die durch den statistischen Schalldruck im Luftschallfeld hoher Intensität zu Biegeschwingungen erregt werden, um so größer ist, je höher die Dämpfung der Platten ist ⁽²⁾.

Es gibt eine systematische Entwicklung schwingungsdämpfender Materialien seit etwa 20 Jahren. Vorher wurde versucht, die Entwicklung mit "trial and error"-Methoden zu fördern ⁽³⁾. Es war ein langer Weg zu den Produkten hoher Qualität, die heute gebräuchlich sind. Die Meß- technik, mit der die viskoelastischen Eigenschaften, insbesondere die Dämpfung der schwin- gungsdämpfenden Stoffe und der kombinierten Systeme aus Metallplatten oder Blechen und dämpfenden viskoelastischen Schichten, unter- sucht werden können, mußte entwickelt werden. Außerdem mußte die Theorie der Biegeschwin- gungen und der viskoelastischen Eigenschaften, insbesondere der Dämpfung, der kombinierten Systeme ausgearbeitet werden, um die Abhängig- keit von den viskoelastischen Eigenschaften der Schichten und ihren Dicken verstehen zu können.

Im ersten Stadium der Entwicklung wurden Zweischichtsysteme, bestehend aus Metallblechen mit einer dämpfenden Schicht auf einer Seite, behandelt ^(4 bis 6). Die Theorie ergab die Be- dingungen, die die dämpfenden Materialien er- füllen müssen, wenn eine hohe Dämpfung der kombinierten Systeme erreicht werden soll.

Dabei wurde es bald klar, daß die höchste Dämpfung mit amorphen thermoplastischen Polymeren zu erreichen ist. Im nächsten Schritt wurden die Möglichkeiten untersucht, wie schwingungsdämpfende Materialien mit optimaler Wirksamkeit in vorgeschriebenen Bereichen der Frequenz und der Temperatur eingestellt werden können. So kam nach der Physik der hochpolymeren Stoffe deren Chemie ins Spiel.

In einem späteren Stadium wurden die Theorien von Mehrschichtsystemen, insbesondere von Sandwichsystemen in einem anderen Sinne, die aus äußeren Metallschichten und einer schwingungsdämpfenden Schicht zwischen diesen bestehen, in gleicher Weise ausgearbeitet (7 bis 13). Auch in diesem Fall konnten thermoplastische Materialien entwickelt werden, die optimale Dämpfung der kombinierten Systeme in vorgeschriebenen Bereichen der Frequenz und der Temperatur ergeben (14 bis 16).

II. Schwingungsdämpfende thermoplastische Stoffe mit optimaler Wirksamkeit in vorgeschriebenen Bereichen der Frequenz und der Temperatur

Die viskoelastischen Eigenschaften der schwingungsdämpfenden Stoffe werden gewöhnlich beschrieben mit Hilfe des komplexen Elastizitätsmoduls E , der im Falle stationärer Erregung erzwungener Schwingungen von stabförmigen Probekörpern bei der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ gemessen wird; f ist die Frequenz. Es ist $E = E' + jE''$, $j = \sqrt{-1}$. E' ist der dynamische Elastizitätsmodul oder Speichermodul (storage modulus); er ist ein Maß für die dynamische Steifheit. E'' , der sogenannte Verlustmodul (loss modulus), ist ein Maß für die inneren Energieverluste. Neben dem Verlustmodul wird der Verlustfaktor (loss factor) $d = E''/E'$ als Relativmaß für die Energieverluste benutzt; es ist $d = \tan \delta$, wo δ der Phasenwinkel zwischen Spannung und Dehnung ist.

Es ist üblich, die viskoelastischen Kenngrößen durch Untersuchung der Biegeschwingungen von Stäben oder Streifen des zu prüfenden Materials zu bestimmen, und zwar durch Untersuchung der

schwach gedämpften Eigenschwingungen oder der Resonanzschwingungen im Falle stationärer Erregung. Dabei werden beidseitig freie oder einseitig eingespannte Stäbe benutzt (5,14,17,18). Die viskoelastischen Eigenschaften kombinierter Systeme, die aus Blechstreifen und viskoelastischen dämpfenden Schichten bestehen, können auf die gleiche Weise gemessen werden.

Die höchste innere Dämpfung wird mit amorphen Hochpolymeren in einem bestimmten Temperaturbereich erzielt. Abb. 1 zeigt schematisch die

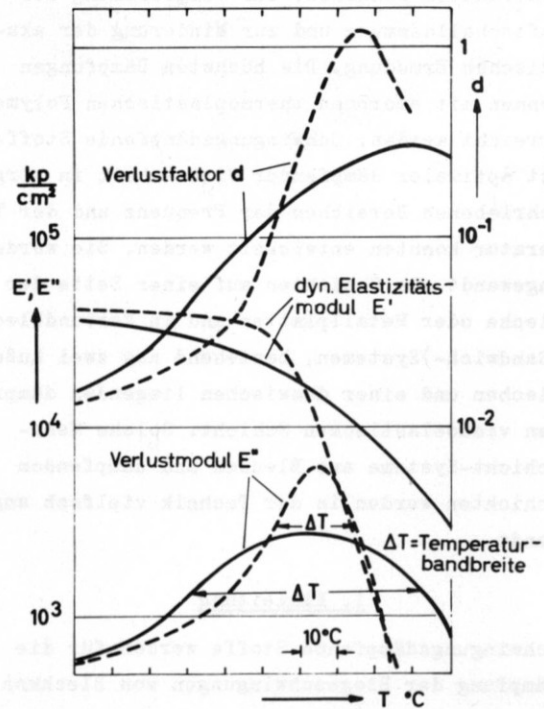


Abb. 1 Dynamischer Elastizitätsmodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor d bei gegebener Frequenz in Abhängigkeit von der Temperatur für einen hypothetischen schwingungsdämpfenden Stoff; ΔT die Temperaturbandbreite (Halbwertsbreite).

viskoelastischen Kenngrößen E' , E'' und d in Abhängigkeit von der Temperatur, wie sie bei konstant bleibender Frequenz gemessen werden. Kurven dieses Typs sind am besten geeignet, die Eigenschaften der polymeren Stoffe in den verschiedenen Bereichen der Temperatur zu veranschaulichen. Bei tiefen Temperaturen ist das Material im Glaszustand, und E' hat hohe Werte in der Größenordnung von $4 \times 10^4 \text{ kp/cm}^2$, während E'' und d verhältnismäßig niedrige Werte

aufweisen. Oberhalb der sogenannten Glasübergangs- oder Einfriertemperatur T_g werden die Molekülketten der Hochpolymeren beweglich, Kettensegmente können Platzwechsel ausführen, und im Falle mechanischer Spannungen finden Relaxationsprozesse der Segmente statt, die zu einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung und infolgedessen zu Hysterisisverlusten führen^(19 bis 23). In diesem Temperaturbereich erweicht das viskoelastische Material. Die Werte des dynamischen Moduls E' nehmen über mehrere Zehnerpotenzen ab, und der Verlustmodul und der Verlustfaktor durchlaufen hohe Maxima. Im Falle von Homopolymeren, deren Molekülketten aus monomeren Bausteinen gleicher Art bestehen, hat der Übergangsbereich, in welchem das Material erweicht, eine Breite von ungefähr 50°C . Das Maximum des Verlustfaktors hat in diesem Bereich Werte von der Größenordnung 1. So hohe Werte können nicht mit irgendwelchen anderen Materialien erreicht werden, und das ist der Grund, warum amorphe Hochpolymere am besten als schwingungsdämpfende Stoffe geeignet sind. Oberhalb des Übergangsbereichs sind vernetzte amorphe Polymere in dem wohlbekannten gummielastischen Zustand. Nicht vernetzte thermoplastische Polymere sind in einem quasi-gummielastischen Zustand, in dem das gummiähnliche Verhalten durch ein gewisses Fließen, das mit wachsender Temperatur zunimmt, überlagert ist.

Mit zunehmender Frequenz werden die Temperaturkurven, wie sie in Abb. 1 dargestellt sind, in Richtung höherer Temperaturen verschoben. Bei Homopolymeren sind die Beziehungen zwischen der Temperatur- und der Frequenzabhängigkeit wohlbekannt. Sie werden beherrscht durch die sogenannte WLF-Funktion^(19 bis 23). Außerdem ist auch das "Relaxationsspektrum" der molekularen Relaxationsprozesse, d. h. die Verteilung der Relaxationszeiten, im Übergangsbereich wohlbekannt. Es ist berechnet worden mit Hilfe der Molekülkettenstatistik⁽²⁴⁾.

Die für die Charakterisierung der dämpfenden Wirksamkeit eines schwingungsdämpfenden Stoffes am besten geeignete Größe ist der Verlustmodul E'' . Aus den Gesetzen, die das molekulare Verhalten der amorphen homopolymeren Stoffe be-

herrschen, kann abgeleitet werden, daß das Maximum im Übergangsbereich eine Halbwertsbreite $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$ hat (vgl. Abb. 1). Diese Breite reicht für viele technische Anwendungen der schwingungsdämpfenden Stoffe nicht aus. Beispielsweise in Fahrzeugen, für die das Maximum von E'' bei 20°C liegen soll, wäre die dämpfende Wirksamkeit bei 0°C zu gering. Deshalb ist es nötig, die Halbwertsbreite ΔT zu vergrößern. Es ist möglich, schwingungsdämpfende Materialien mit optimaler Dämpfung in vorgeschriebenen Bereichen der Frequenz und in Temperaturbereichen vorgeschriebener Lage und Breite dadurch herzustellen, daß man verträgliche amorphe Polymere mischt, deren Einfriertemperaturen T_g verschiedene Lagen haben. Das gleiche Ziel kann durch Copolymerisation passend gewählter Monomere erreicht werden. Außerdem können Weichmachung, Einmischung geeigneter Füllstoffe und andere Maßnahmen dazu beitragen, die gewünschte optimale Wirksamkeit zu erreichen^(14 bis 16).

Auf diese Weise können Temperaturkurven von E'' mit größerer Halbwertsbreite ΔT , ähnlich denen in Abb. 1, erzielt werden. Wenn man annimmt, daß die physikalischen Gesetze, die für Homopolymere gültig sind, auch noch näherungsweise für die Stoffmischungen und die Copolymeren mit erhöhter Halbwertsbreite benutzt werden können, läßt sich die folgende Beziehung zwischen der Halbwertsbreite ΔT und dem Maximum E''_{max} des Verlustmoduls ableiten:

$$\frac{E''_{\text{max}}}{E_g} \cdot \Delta T \approx \text{const.}$$

E_g ist das Glasmodul, d. h. der Wert von E' im Glaszustandsbereich bzw. bei hohen Frequenzen. Die Gleichung zeigt, daß die Zunahme der Halbwertsbreite zu einer entsprechenden Abnahme der maximalen Dämpfung führt. Dieses Gesetz ist als "Temperaturbandbreitengesetz" bezeichnet worden^(14, 16, 25). Wie Abb. 1 zeigt, führt die Zunahme der Temperaturbandbreite gleichzeitig zu einer Abflachung der Temperaturkurve von E' . Diese Beziehung ist wichtig im Hinblick auf die Grenzen der dämpfenden Wirksamkeit, die grundsätzlich nicht überschritten werden können. Es ist für die technischen Anwendungen von Bedeutung, diese Grenzen zu kennen.

III. Optimale kombinierte Systeme aus Blechen und thermoplastischen dämpfenden Schichten

Es wurde bereits erwähnt, daß zwischen Zweischichtsystemen und verschiedenen Typen von Mehrschichtanordnungen unterschieden werden muß. Abb. 2 zeigt schematisch die Systeme, die bisher technisches Interesse erlangt haben. Neben den Zweischichtsystemen, die aus Blechen mit einer dämpfenden Schicht auf einer Seite bestehen, sind im praktischen Gebrauch Dreischicht-Verbundblech- oder Sandwich-Anordnungen, die aus zwei äußeren Blechen und einer dazwischen liegenden dämpfenden Schicht bestehen. Symmetrische und unsymmetrische Systeme werden benutzt, in denen die Bleche oder Metallplatten verschiedene Dicken haben, und außerdem Anordnungen mit dünnen und dicken dämpfenden Schichten. Die dünnen Zwischenschichten sind von besonderem Interesse im Falle selbsthaftender dämpfender Materialien, die gleichzeitig als Klebstoffe und als schwingungsdämpfende Materialien wirksam sind. Die dicken dämpfenden Zwischenschichten sind meistens thermoplastische Folien, die zwischen die Bleche geklebt werden.

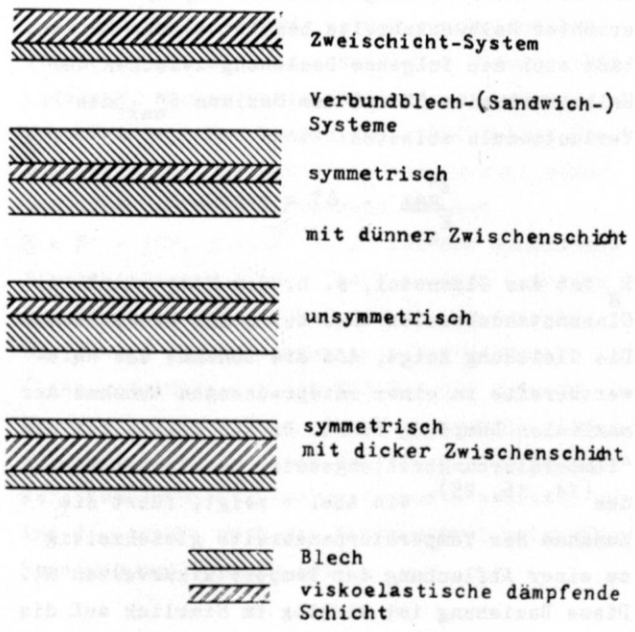


Abb. 2 Mehrschicht-Systeme aus Metallplatten und viskoelastischen dämpfenden Schichten

a) Zweischichtsysteme

Die Ergebnisse der Theorie der Biegeschwingungen von Blechen mit einseitigem dämpfenden Belag haben sich als nützlich für die Entwicklung und die Herstellung solcher Systeme erwiesen. Das Beispiel der Abb. 3 soll zur Veranschaulichung dieser Beziehungen dienen^(14, 16). In dieser Abbildung sind die Kenngrößen E' , E'' und d eines optimal eingestellten thermoplastischen Materials in Abhängigkeit von der Temperatur für die Frequenz 200 Hz dargestellt; außerdem ist der Verlustfaktor d_{comb} des Zweischichtsystems, bestehend aus dem Blech und einer aufgespritzten Schicht des dämpfenden Materials, wiedergegeben. Die Masse der Belagschicht beträgt 20 % der Blechmasse. Dieses Verhältnis wird oftmals für

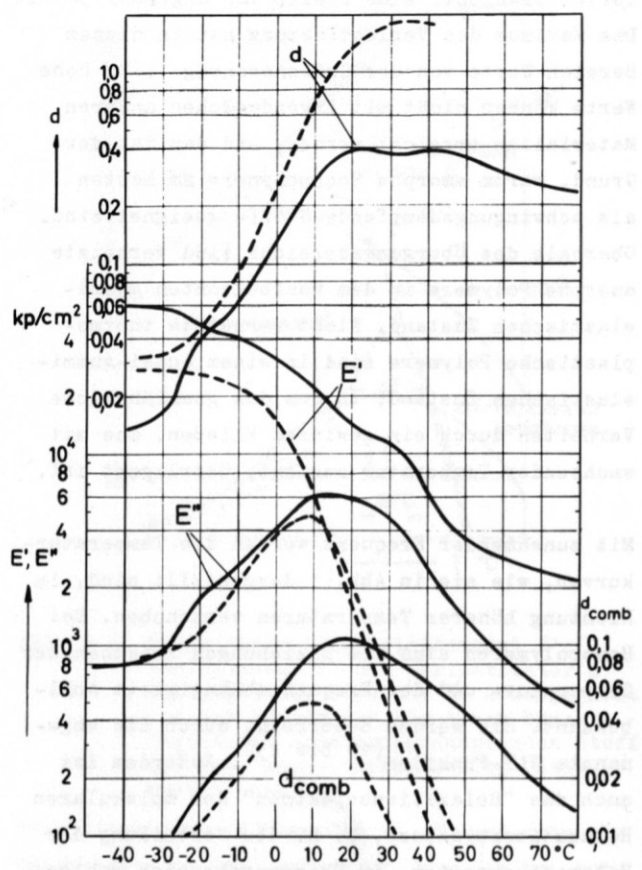


Abb. 3 Kenngrößen E' , E'' und d eines Dämpfungsstoffes und Verlustfaktor d_{comb} eines Stahlbleches mit Dämpfungsbelag in Abhängigkeit von der Temperatur für 200 Hz. Dämpfungsstoff ein modifiziertes Vinylacetat-Copolymer, ----- ungefüllt, — gefüllt mit Vermiculit. Massenverhältnis der Schichten des Zweischichtsystems 20 %.

Vergleichszwecke benutzt. Bei Einführung des Verlustfaktors d_{comb} sieht man das kombinierte System als ein homogenes System an, auf dem sich freie BiegeWellen ausbreiten können wie auf Platten eines homogenen Werkstoffs. Der Verlustfaktor d_{comb} kann unmittelbar mit den Verlustfaktoren reiner viskoelastischer Stoffe verglichen werden.

Der Dämpfungsstoff ist ein modifiziertes Vinylacetat-Copolymer, das mit Vermiculit, einem expandierten glimmerähnlichen Material, gefüllt ist. Zum Vergleich sind die viskoelastischen Kenngrößen des ungefüllten Materials denen des gefüllten gegenübergestellt. Abb. 3 zeigt, daß das Maximum des Verlustfaktors des ungefüllten Stoffes für 200 Hz bei 10° C liegt. Der Dämpfungsstoff hat eine mäßige Temperaturbandbreite. Seine Steifheit, d. h. der Modul E' , wird schon im Glaszustandsbereich durch die Füllung mit Vermiculit etwas angehoben. Im Übergangsbereich ist die versteifende Wirkung des Füllstoffs beträchtlich. Gleichzeitig hat auch der Verlustmodul E'' des gefüllten Materials in diesem Temperaturbereich höhere Werte, was zu einer beträchtlichen Vergrößerung der Temperaturbandbreite führt. Die Theorie der Zweischichtsysteme zeigt, daß bei einem vernünftigen Dicken- oder Massenverhältnis der Schichten der Verlustfaktor d_{comb} des kombinierten Systems angenähert proportional zum Verlustmodul E'' ist. Abb. 3 bestätigt, daß dies der Fall ist. Die viskoelastische, Vermiculit enthaltende Schicht hat eine relativ kleine Dichte. Dies ist im vorliegenden Fall günstig, weil nach der Theorie der Verlustfaktor d_{comb} des kombinierten Systems bei den technisch interessierenden Dickenverhältnissen angenähert proportional zum Quadrat des Dickenverhältnisses ist. Wenn das Massenverhältnis (20 %) vorgeschrieben ist, können größere Dicken der dämpfenden Schicht mit Materialien kleinerer Dichte benutzt werden, so daß relativ hohe Werte d_{comb} erreicht werden können.

Man ersieht aus Abb. 3, daß das vorliegende Zweischichtsystem für einen Temperaturbereich von 0° bis 50° C optimal eingestellt ist. Das Dämpfungsmaximum des kombinierten Systems liegt

bei 20° C. Für die Definition der Temperaturbandbreite ist ein Bezugspegel $d_{\text{comb}} = 0,05$ gewählt worden. Dieses Niveau ist mindestens 10 dB (Dezibel) oberhalb der Dämpfungswerte von Blechen in Metallkonstruktionen, auf die keine Dämpfungsstoffe aufgebracht sind. Die Dämpfung solcher Systeme entspricht Werten $d_{\text{comb}} \approx 0,01$ (14 bis 16, 26). Das vorliegende System ist optimal für Anwendungen beispielsweise in Fahrzeugen eingestellt worden. Gemäß dem Temperaturbandbreitengesetz (vgl. Abschnitt II) ist der Maximalwert von d_{comb} von der Größenordnung 0,1. Mit einem entsprechenden homopolymeren Material kann ein höheres Maximum erreicht werden; aber die Temperaturbandbreite würde zu klein werden.

Alle Kurven der Abb. 3 werden in Richtung höherer Temperatur verschoben, wenn die Frequenz wächst. Eine Zunahme der Frequenz um einen Faktor 10 entspricht einer Verschiebung von 6 bis 10° C (vgl. die folgenden Abbildungen). Es ist deshalb ausreichend, die viskoelastischen Eigenschaften durch die Kennkurven für eine einzige Frequenz (200 Hz) zu beschreiben.

b) Verbundblech- oder Sandwich-Systeme (Dreischicht-Systeme)

Die Theorie der Mehrschicht-Anordnungen, die in ähnlicher Weise wie die Theorie der Zweischicht-Anordnungen⁽⁸⁾ entwickelt wurde, ergibt Systeme von Gleichungen, deren Lösung nicht zu expliziten Ausdrücken für die interessierenden viskoelastischen Kenngrößen, insbesondere die Dämpfung eines Mehrschicht-Systems, führt. Deshalb ist es zweckmäßig, einen elektronischen Computer zu benutzen. Auf diese Weise erhaltene Ergebnisse wurden experimentell bestätigt. Im Falle der Verbundblech-Systeme kommt der Einfluß der "Geometrie" der Anordnungen viel stärker ins Spiel als bei den Zweischicht-Systemen. Beispielsweise die Temperaturkurven des Verlustfaktors d_{comb} des kombinierten Systems werden mit zunehmender Frequenz in einer Richtung verschoben, die der Verschiebungsrichtung der Temperaturkurven der viskoelastischen Kenngrößen der Dämpfungsmaterialien entgegengesetzt ist. Trotzdem ist es auch in diesem Fall möglich, optimal gedämpfte Systeme für spezielle technische Anwendungen zu entwickeln. Die folgenden Beispiele dienen zur

Veranschaulichung dieser Gegebenheiten^(14 - 16).

Abb. 4 zeigt die viskoelastischen Kenngrößen eines Vinylchlorid(VC-)Copolymers, das aus VC und einem Acrylat copolymerisiert worden ist, dessen Homopolymer eine Glas temperatur T_g weit unterhalb 0°C aufweist. Die Kurven der Abb. 4 wurden

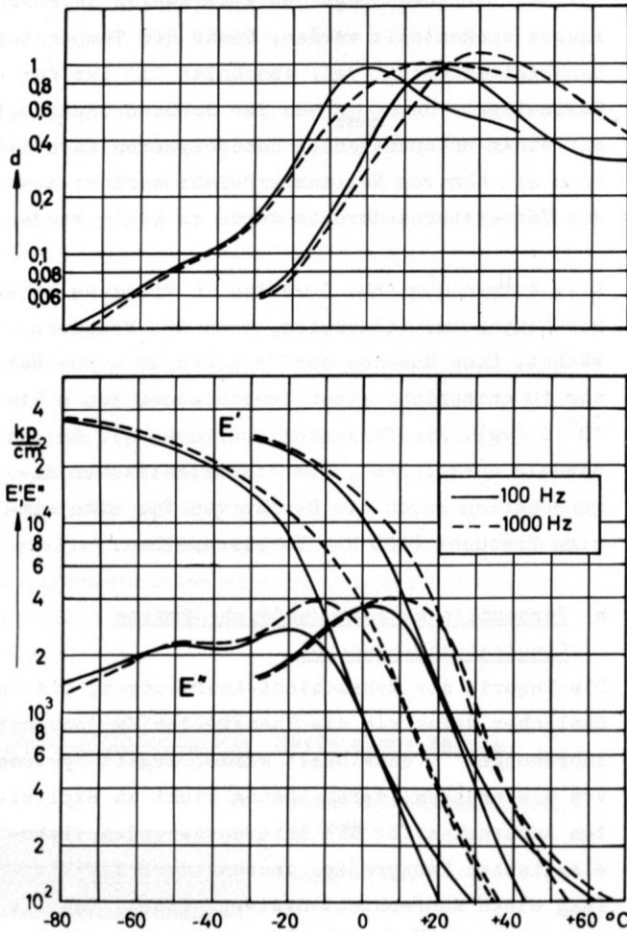


Abb. 4 Kenngrößen E' , E'' und d für ein Copolymer aus VC und einem Acrylat mit verschiedenen Gewichtsverhältnissen der Monomeren in Abhängigkeit von der Temperatur

in einem auf spezielle Weise geführten Copolymerisationsverfahren erzielt. Sie beziehen sich auf zwei verschiedene Gewichtsverhältnisse der Monomeren. Die Abbildung lehrt, daß in dieser Weise Temperaturbreitbandmaterialien mit breiten Maxima des Verlustmoduls und des Verlustfaktors und einem relativ flachen Abfall des Moduls E' mit der Temperatur im Übergangsbereich erhalten werden. Durch Änderung des Gewichtsverhältnisses kann der Bereich optimaler dämp-

fender Wirksamkeit verschoben werden. Weiterhin wird in der Abbildung die Verschiebung der Kurven bei einer Änderung der Frequenz von 100 auf 1000 Hz deutlich. Der Bereich zwischen diesen Frequenzen ist derjenige mit dem größten Interesse in der Technik.

Aus diesen Copolymeren hergestellte Folien werden zwischen die Bleche geklebt. Es entstehen dabei Verbundblech-Anordnungen, die zum Teil als Systeme mit relativ dicker Dämpfungsschicht eingeordnet werden können (vgl. Abb. 2). Abb. 5 zeigt Kurven des Verlustfaktors d_{comb} solcher Systeme, die aus äußeren Stahlblechen der Dicke 1 mm und Dämpfungsfolien, deren Dicken in einem

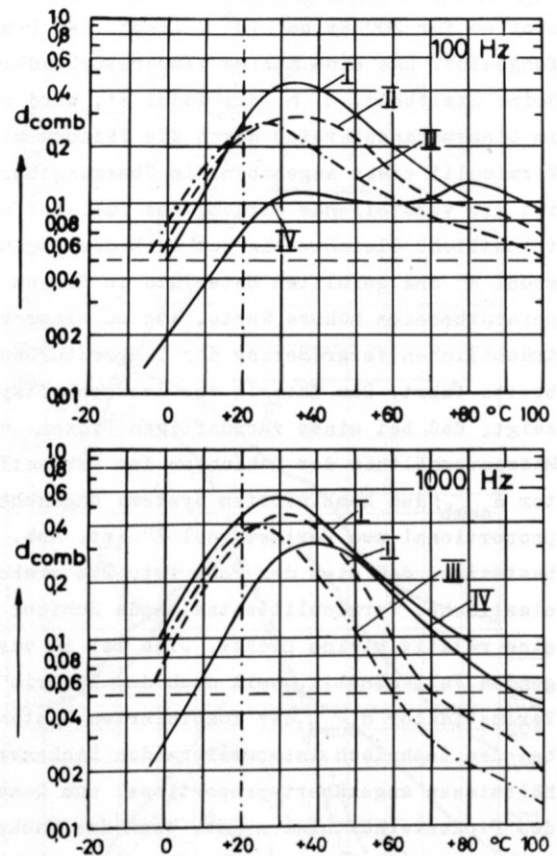


Abb. 5 Verlustfaktor d_{comb} von Verbundblech-Systemen mit Zwischenschichten verschiedener Dicke. Dämpfungsstoff das VC-Copolymer zum Kurvenpaar auf der rechten Seite in Abb. 4. Stahlblechdicken 1 mm, Zwischenschichtdicken 4 mm (Kurven I), 2 mm (Kurven II), 1 mm (Kurven III) und 0,2 mm (Kurven IV)

breiten Bereich von 0,2 bis 4 mm variieren, bestehen. Diese Kurvenscharen veranschaulichen die starke Abhängigkeit der Dämpfung der Systeme von

der Geometrie, d. h. von den Dicken der verschiedenen Schichten. Außerdem ersieht man aus der Abbildung, daß viel höhere Maxima des Verlustfaktors mit solchen Systemen erreicht werden können als mit Zweischicht-Systemen. Abb. 5 bezieht sich auf das Kurvenpaar der Abb. 4 mit höherer Temperaturlage. Die dämpfende Schicht wird bei der Biegeschwingung des Verbundblech-Systems auf Schub beansprucht, während die dämpfende Schicht auf einer Seite in einem Zweischicht-System einer einachsigen Zugspannung unterliegt. Dies ist der Hauptgrund, warum höhere Dämpfungsmaxima der kombinierten Systeme mit Verbundblech-Anordnungen erreicht werden. Beträchtliche Temperaturbandbreiten werden mit diesen Systemen erzielt, wenn man die Bandbreite auf das oben erwähnte Bezugsniveau bezieht (siehe Abb. 5).

Die folgenden Beispiele sollen die Möglichkeiten illustrieren, die Verbundbleche mit dünnen selbsthaftenden dämpfenden Schichten bieten. In Abb. 6 sind Temperaturkurven von E' , E'' und d für ein solches Material, nämlich ein modifiziertes Vinylacetat-(VAc-)Copolymer, dargestellt, das bei höheren Temperaturen als Schmelzkleber angewandt wird. Im Bereich unterhalb 20°C sind die Meßwerte mit Hilfe der Biegewellenmethode erzielt worden. Bei höheren Temperaturen wurden sie indirekt anhand von Ergebnissen der Theorie und der gemessenen viskoelastischen Kenngrößen von Verbundblech-Systemen mit verschiedenen Dicken der Bleche mit Hilfe eines Computers bestimmt⁽²⁷⁾. Das Dämpfungsmaterial ist im vorliegenden Fall ein solches mit mäßiger Temperaturbandbreite. Der Verlustfaktor d_{comb} von Verbundblech-Systemen beliebiger Blechdicken kann aus

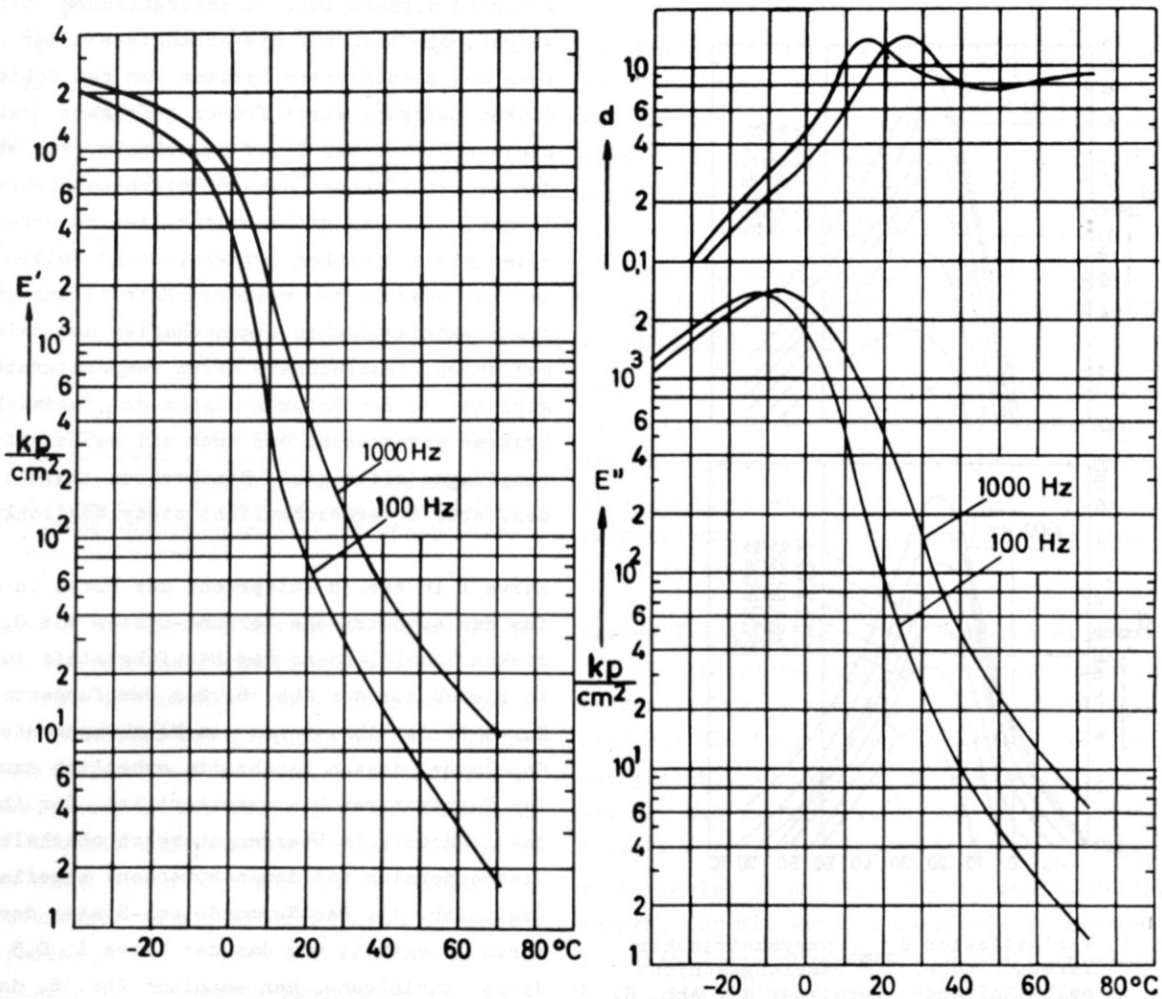


Abb. 6 Kenngrößen E' , E'' und d eines selbsthaftenden modifizierten Vinylacetat-(VAc-)Copolymeren in Abhängigkeit von der Temperatur

den viskoelastischen Kenngrößen und den Dicken der Schichten mit Hilfe des Computers berechnet werden. Die berechneten Werte stimmen mit den Meßergebnissen befriedigend überein.

Abb. 7 zeigt als Beispiel eine Schar von Temperaturkurven des Verlustfaktors d_{comb} von Verbundblech-Systemen, in denen die Dicken des einen Bleches (0,5 mm) und der dämpfenden Schicht (0,3 mm) konstant gehalten und die Dicken des zweiten Bleches in einem breiten Bereich zwischen 0,5 und 10 mm variiert wurden⁽²⁷⁾. Die höchsten Werte d_{comb} werden mit dem symmetrischen System erreicht, bei dem beide Bleche 0,5 mm dick sind. Der Maximalwert $d_{\text{comb}} \approx 0,7$ hat nahezu die Größe des Verlustfaktors des viskoelastischen Dämpfungstoffes selbst. Dies bedeutet, daß diese Maxima kaum mit irgendeinem anderen kombinierten System übertroffen werden

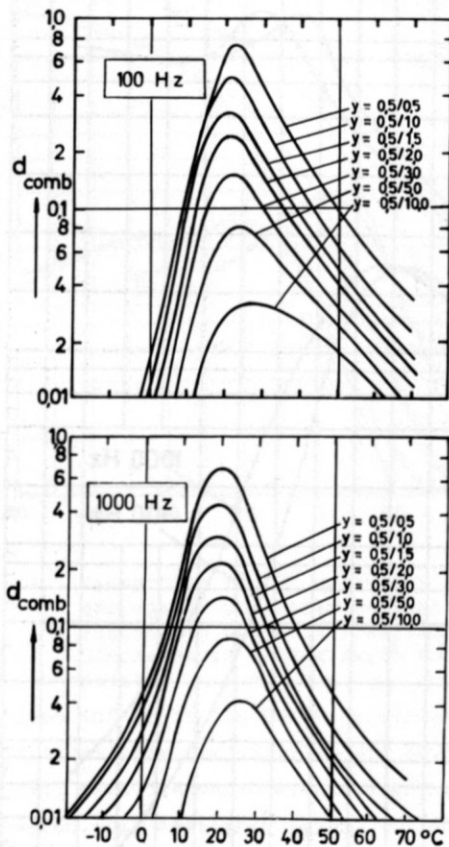


Abb. 7 Verlustfaktor d_{comb} unsymmetrischer Verbundbleche. d_{comb} Dämpfungsschicht selbsthaftendes Copolymer der Abb. 6, Schichtdicke 0,3 mm. Dicke des einen Stahlbleches 0,5 mm; y das Verhältnis der Dicken der beiden Stahlbleche.

können. Die Verlustfaktormaxima und gleichzeitig die Temperaturbandbreiten nehmen mit zunehmendem Dickenverhältnis der Bleche ab. Befriedigende Kurvenverläufe erhält man bis hinauf zu Dickenverhältnissen von der Größenordnung 4. Man ersieht also aus Abb. 7, daß die Unsymmetrie der Systeme nicht zu groß sein sollte. Unsymmetrische Verbundbleche müssen im Hinblick auf die statische Biegesteifigkeit oft benutzt werden.

Die Dämpfungskurven in Abb. 7 sind vergleichsweise schmal. Relativ hohe Temperaturbandbreiten werden, wenn man die Bandbreite auf den Pegel $d_{\text{comb}} = 0,05$ bezieht, trotzdem erreicht, weil bei nicht zu großen Blechdickenverhältnissen die Maxima von d_{comb} sehr hoch sind. Es ist jedoch bei dem Dämpfungstoff der Abb. 6 und 7 noch unbefriedigend, daß er im Hinblick auf Anwendungen im Freien unterhalb 0°C nicht mehr genügend wirksam ist. In theoretischen Überlegungen, die sich auf die Abhängigkeit der Dämpfung des kombinierten Systems von den Schichtdicken bezogen, wurde früher gefolgert, daß mit kleinen Dicken der Dämpfungsschicht, wie sie bei den selbsthaftenden dünnen Zwischenschichten vorliegen, nicht so große Bandbreiten zu erreichen seien wie mit dicken (eingeklebten) Folien⁽⁸⁾; man hat aber in der weiteren Entwicklung gelernt, die viskoelastischen Eigenschaften der Zwischenschichten, insbesondere deren Temperaturabhängigkeit, so den Erfordernissen der Sandwich-Systeme anzupassen, daß auch mit selbsthaftenden Dämpfungstoffen große Bandbreiten erzielt werden. Abb. 8 veranschaulicht diese Möglichkeit.

Kurve I in Abb. 8 entspricht der Kurve in Abb. 7 für das symmetrische Verbund-System mit 0,5 mm dicken Stahlblechen; der Dämpfungstoff ist also gleich dem der Abb. 6. Der Dämpfungstoff zu Kurve II der Abb. 8 ist ein Mehrkomponenten-VAC-Copolymer, dessen Bandbreite erheblich nach tiefen Temperaturen hin erweitert ist. Der Abfall des E' -Moduls im Übergangsbereich oberhalb der Glas temperatur ist dementsprechend abgeflacht (vgl. Abb. 1). Das Verbundblech-System der Kurve II enthält wie das der Kurve I 0,5 mm dicke Stahlbleche. Man entnimmt Abb. 8, daß in Kurve II Werte $d_{\text{comb}} = 0,05$ im Bereich etwa von -20°C bis 50°C bzw. 70°C überschritten werden.

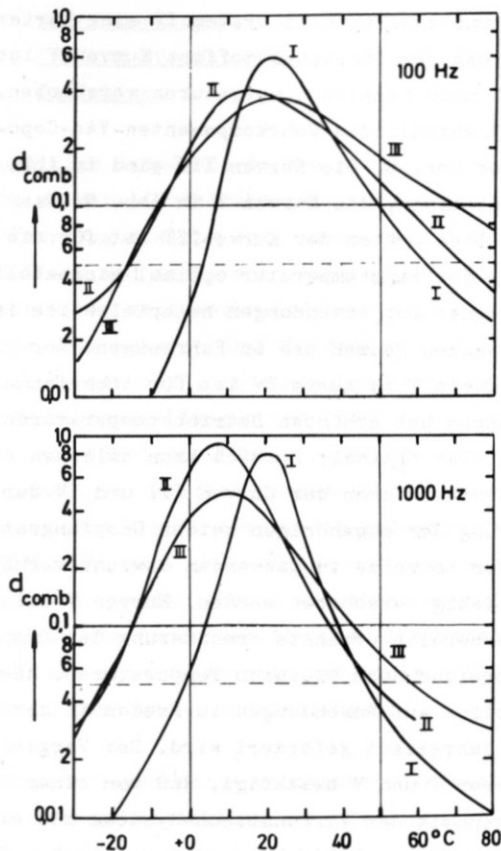


Abb. 8 Verlustfaktor d_{comb} von Verbundblech-Systemen mit d_{comb} 0,3 mm dicker selbsthaftender Zwischenschicht aus VAc-Copolymeren.
 Kurven I und II: Symmetrische Verbunde mit 0,5 mm Stahlblechen;
 Kurven I: Zwischenschicht modifiziertes VAc-Copolymer der Abb. 6;
 Kurven II: Zwischenschicht Mehrkomponenten-VAc-Copolymer;
 Kurven III: Unsymmetrischer Verbund mit 1,5 mm und 1,0 mm Al-Blech; Zwischenschicht Mehrkomponenten-VAc-Copolymer wie zu Kurven II.

Im Vergleich zur Kurve I ist in der Kurve II die Lage der oberen Flanke erhalten geblieben, die untere Flanke ist um 20°C nach tieferen Temperaturen verschoben. Das Mehrkomponenten-Copolymer erfüllt also die Forderung nach dämpfender Wirksamkeit auch in der Kälte (bei Temperaturen unter 0°C). Mit dicken eingeklebten Folien werden auch nicht wesentlich günstigere Verläufe der Dämpfungskurven als mit dem System II erreicht (siehe unten). Dabei ist es grundsätzlich möglich, die Temperaturbandbreite der selbsthaftenden Copolymeren noch weiter zu vergrößern.

Der Temperaturbereich hoher dämpfender Wirkung des Mehrkomponenten-(VAc-)Copolymeren entspricht demjenigen, der in der Luftfahrttechnik für die Schwingungsdämpfung der Außenwände von Düsenflugzeugen gefordert wird (etwa -20°C bis 60°C) (15). Es sind deshalb in Abb. 8 noch als Kurven III die Verlustfaktoren für ein unsymmetrisches Verbundblech mit 1,5 und 1,0 mm dicken Duraluminium-Blechen und dem Mehrkomponenten-Copolymer als Zwischenschicht (0,3 mm) eingetragen; dieses System dürfte für die genannten Anwendungen an Düsenflugzeugen als "praxisnah" anzusehen sein. Die Kurven III verlaufen ähnlich wie die Kurven II des Verbundblechs mit 0,5 mm Stahlblechen; die Bandbreite ist bei Kurve III noch etwas größer. Es ist also möglich, auch für diesen speziellen Anwendungszweck einen optimal wirksamen Dämpfungsstoff zur Verfügung zu stellen.

In ähnlicher Weise wie in den hier diskutierten Fällen können viele andere Fragen beantwortet werden, so daß man zusammenfassend feststellen kann, daß auch die Dreischicht-Systeme gut beherrscht werden.

c) Optimale Einstellung der viskoelastischen Dämpfungsstoffe für spezielle Anwendungen der kombinierten Systeme

Abb. 9 gibt einen Überblick über die dämpfende Wirksamkeit einer Mannigfaltigkeit von Mehrschicht-Systemen, womit demonstriert wird, daß es in der Tat möglich ist, solche Systeme für verschiedene technische Anwendungen optimal einzustellen (15, 16).

Kurven I und II der Abb. 9 beziehen sich auf die VC-Copolymeren, deren viskoelastische Kenngrößen in Abb. 4 wiedergegeben sind. Im System I sind die Dämpfungsfolien zwischen Aluminiumbleche geklebt. Auch dieses System ist so eingestellt, daß es für Anwendungen in der Luftfahrttechnik optimal ist, beispielsweise für Sandwich-Platten in den Außenwänden von Düsenflugzeugen, für die optimal dämpfende Wirksamkeit in einem Temperaturbereich ungefähr zwischen -20°C und 60°C verlangt wird (vgl. oben). Das Verbundblech-System II ist für Anwendungen in Maschinenaggregaten eingestellt, deren Betriebs-

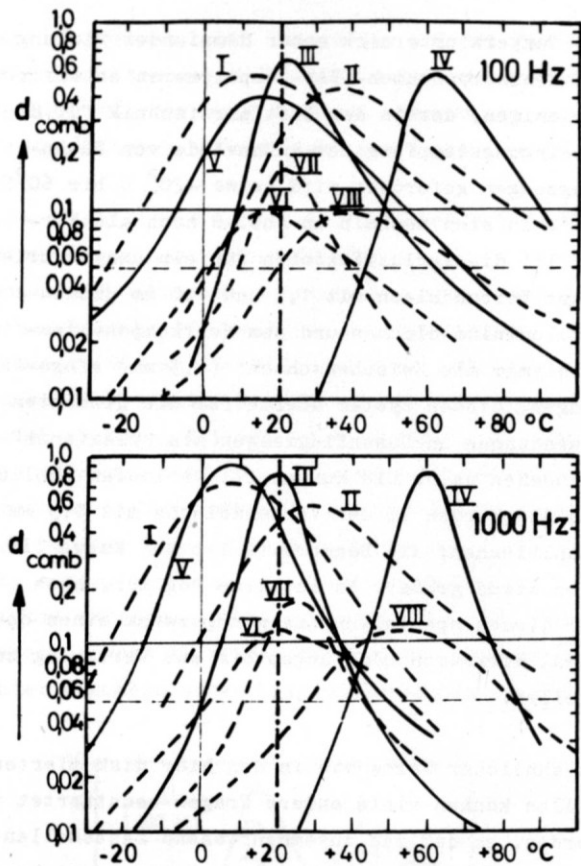


Abb. 9 Verlustfaktor d_{comb} kombinierter Systeme aus Blechen und viskoelastischen dämpfenden Schichten. Verbundblech-(Dreischicht-)Systeme: Kurven I und II: Zwischen die Bleche (gleicher Dicke) geklebte Folien aus VC-Copolymeren der Abb. 4; Kurven I: 0,6 mm Al-Blech, 1,7 mm Zwischenschicht; Kurven II: 1 mm Stahlblech, 4 mm Zwischenschicht. Kurven III, IV und V: Zwischenschichten selbsthaftende Vinylacetat-Copolymere, Schichtdicke 0,3 mm; Kurven III und IV: modifizierte VAc-Copolymere, 0,5 mm Stahlblech (symmetrische Verbunde); Kurven V: Mehrkomponenten-VAc-Copolymer, Al-Bleche, Dicken 1,5 und 1,0 mm (unsymmetrischer Verbund). Bleche mit dämpfendem Belag (Zweischicht-Systeme): Kurven VI, VII und VIII: Belagschichten mit Vermiculit gefüllte Polymere, 1 mm Stahlblech, Verhältnis der Massen des Belages und des Bleches 20 %; Kurven VI: modifiziertes VAc-Copolymer der Abb. 3; Kurven VII: Homopolymer (zum Vergleich); Kurven VIII: modifizierte Mischung von Copolymeren.

temperatur gegenüber der Raumtemperatur erhöht ist. Die Temperaturbandbreite dieses Systems überdeckt den Bereich von 0°C bis etwa 100°C . Systeme III und IV enthalten das Vinylacetat-

Copolymer der Abb. 6 in verschiedenen Modifikationen, und zwar enthält System IV eine härtere Einstellung des Dämpfungstoffes; Kurve IV ist demgemäß nach höheren Temperaturen verschoben. System V enthält das Mehrkomponenten-VAc-Copolymer der Abb. 8. Die Kurven III sind in Abb. 7 und 8 enthalten, die Kurven V in Abb. 8. Das Verbundblech-System der Kurve III ist für die Umgebung der Raumtemperatur optimal eingestellt und geeignet für Anwendungen beispielsweise in geschlossenen Räumen und in Fahrzeugen. Der Dämpfungstoff zu Kurve IV ist für technische Anwendungen bei erhöhten Betriebstemperaturen gedacht. Der optimale Bereich kann zwischen den Temperaturbereichen der Kurven III und IV durch Abmischung der zugehörigen beiden Dämpfungstoffe in der Schmelze in passendem Gewichtsverhältnis beliebig verschoben werden. Kurven V bringen die bereits erwähnte Erweiterung des Dämpfungsbereichs nach tieferen Temperaturen, die im Hinblick auf Anwendungen im Freien in der kalten Jahreszeit gefordert wird. Der Vergleich der Kurven I und V bestätigt, daß von einer Überlegenheit der Verbundblech-Systeme mit eingeklebter dicker Folie kaum noch gesprochen werden kann, zumal eine weitere Vergrößerung der Bandbreiten beim System V grundsätzlich möglich ist (siehe dazu auch Kurve III in Abb. 8 für das unsymmetrische Al-Verbundblech).

Die Kurven VI bis VIII der Abb. 9 beziehen sich auf Zweischicht-Systeme mit einem Verhältnis der Massen der dämpfenden Schicht und des Stahlblechs von 20 %. Kurven VI entsprechen denjenigen in Abb. 3, Kurven VII einer modifizierten Mischung von Polymeren mit Vermiculit-Füllung. Dieser Dämpfungstoff ist ebenfalls für technische Anwendungen bei erhöhten Betriebstemperaturen gedacht. Zum Vergleich sind die Kurven VII für einen homopolymeren, mit Vermiculit gefüllten Stoff in die Abbildung eingetragen. Dieses Material ist ein typischer Schmalband-Dämpfungstoff. Die Maxima von d_{comb} haben vergleichsweise hohe Werte; aber die Temperaturbandbreite ist klein. Abb. 9 verdeutlicht die wesentlich höheren Dämpfungen, die mit Verbundblechen zu erzielen sind.

IV. Technische Anwendungen der schwingungsgedämpften Mehrschicht-Systeme aus Blechen und dämpfenden Schichten

Einseitige dämpfende Beläge werden meist auf fertige Metallkonstruktionen aufgebracht, z. B. in Fahrzeugen aller Art, insbesondere auch Schiffen, und in Maschinenaggregaten. Diese Technik ist weit verbreitet und seit langem bewährt. Die meisten Kraftfahrzeuge sind in dieser Weise "entdröhnt", im einzelnen Karosserieteile von Personenkraftwagen und Autobussen, wie Boden- und Türbleche, Motor- und Kofferhauben, in Lastwagen die Blechwände des Fahrerhauses. Die Wagenkästen der Reisezugwagen moderner Fernschnellzüge sind vollständig mit dämpfenden Belägen wie dem der Abb. 3 versehen; das gleiche gilt für die Wandungen der Diesellokomotiven. Unzählige weitere Anwendungsbeispiele ließen sich zu den genannten hinzufügen.

Gedämpfte Verbundblechkonstruktionen stellen eine neuere Entwicklung dar. Dreischicht-Anordnungen dieses Typs werden als Bauelemente in Neukonstruktionen angewandt⁽²⁸⁾; aber auch nachträgliche Doppelung der Bleche am fertigen Objekt ist mit selbsthaftenden Dämpfungsschichten möglich. Schon im gegenwärtigen Stadium der Entwicklung liegt eine verhältnismäßig breite Erfahrung in der Verarbeitung der Verbundbleche mit dünner selbsthaftender Zwischenschicht vor⁽²⁹⁾. Verarbeitungstechniken wie Biegen, Abkanten, Tiefziehen, Nieten, Schweißen, insbesondere Punktschweißen, sind möglich⁽²⁹⁾. Dabei ist stets zu beachten, daß die Verbundbleche gewissermaßen einen neuen Werkstoff darstellen, der eigenen Verarbeitungsgesetzen unterliegt, daß also die an homogenen Blechen bewährten Verarbeitungsverfahren dem neuen Werkstoff angepaßt werden müssen. Die Herstellung der Verbundbleche mit eingeklebter Dämpfungsfolie ist aufwendiger und kostspieliger als die der Blechsysteme mit dünner selbsthaftender Zwischenschicht; die Verarbeitung der erstgenannten Systeme stößt ebenfalls auf weit größere Schwierigkeiten als die der Systeme mit selbsthaftender Zwischenschicht. Nachdem es gelungen ist, auch mit diesen breite Temperaturbereiche

hoher Dämpfung zu erreichen, sind diese Anordnungen stark in den Vordergrund des Interesses gerückt.

Verbundbleche werden in der Technik schon vielfach angewandt, doch sind noch zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten offen, in Fahrzeugen, in der Industrielärmbekämpfung und im Bauwesen. Größte Lärmpegelsenkungen werden in den Fällen erreicht, in denen die Eigen- und Resonanzschwingungen großflächiger ebener oder schwach gekrümmter Bleche unmittelbar zur Abstrahlung von Störschall in die angrenzende Luft führen, d. h. in denen die dröhnenden Bleche selbst die Luftschallquellen sind. Beispielsweise in Fördergeräten wie Wendelschwingförderern und Schwingförderinnen sind durch Anwendung von optimalen Verbundblechen im Bereich hoher Frequenzen oberhalb 500 Hz, die bekanntlich besonders zur "Lästigkeit" der Störgeräusche beitragen, Schallpegelsenkungen von etwa 20 dB erreicht worden. Entsprechend groß sind die Gesamtlautstärkeminderungen⁽²⁸⁾. Allgemein kann das Dröhnen von Karosserieteilen der Kraftfahrzeuge, Baumaschinen, von Transportbehältern aus Blech, von Zerkleinerungsmaschinen, von Stahltüren, Garagentoren, Blechgehäusen, Klimakanälen usw. durch diese Dämpfungsmaßnahmen weitgehend unterdrückt werden.

Auch die schalldämmende Verkleidung oder Einkapselung von Störschall abstrahlenden Objekten wie Transformatoren, Getrieben usw. kann bei Verwendung hochwertiger Verbundbleche zu erheblichen Lärminderungen führen. So werden bei Großtransformatoren auf diese Weise Pegelsenkungen von etwa 8 bis 10 dB erreicht, was bei den großen Lautstärken in der Nähe von 100 phon eine beträchtliche Geräuschminderung bedeutet. Eine Lautstärkesenkung um 10 dB entspricht einer Halbierung der Lautheitsempfindung. Ein besonderer Vorteil der hochgedämpften Verbundbleche ist es, daß sie unmittelbar auf das Rahmenwerk der Transformatoren (ohne Schwingungsisolationsmaßnahmen) geschraubt werden können. Ganz allgemein stören Körperschallbrücken nicht, weil es wegen der hohen Dämpfung nicht zur Ausbildung stehender Wellen auf den Verbundblechen, also insbesondere nicht zur Ausbildung von Resonanzschwingungen kommt. Entsprechende Pegelsenkungen

werden auch bei sachgemäßer Einkapselung von Dieselkompressoren unter Verwendung von Verbundblechen erzielt. Bei der Verkleidung mit Ummantelungen und "Schallschutzhauben" ist wie stets bei Schalldämmmaßnahmen die Regel zu beachten, daß eine wirksame Geräuschpegelsenkung im allgemeinen nur erreicht wird, wenn alle Störschallquellen ausgeschaltet und alle möglichen Maßnahmen zur Geräuschminderung getroffen werden. Im vorliegenden Falle bedeutet dies, daß im Innern der Hauben Luftschallabsorptionsmittel angebracht werden müssen und auf Fugendichtheit zu achten ist. Daraus ergeben sich Belüftungsprobleme. Nötigenfalls müssen die Innenräume über Schalldämpfer belüftet werden, wie es beispielsweise bei speziellen Dieselkompressoren der Fall ist⁽²⁸⁾.

Bei Verwendung optimal eingestellter Verbundbleche in doppelschaligen Leichtbauwänden aus zwei äußeren Blechen und dem dazwischen liegenden, mit Luftschallabsorptionsstoffen gefüllten Luftpolster werden bei richtiger Dimensionierung der Doppelwand extrem hohe Schalldämmungen erreicht⁽¹⁾ (vgl. Abschnitt I).

In der Luftfahrttechnik wird von den Möglichkeiten, die die schwingungsgedämpften Blechsysteme bieten, noch kaum Gebrauch gemacht. Jedoch sind systematische Untersuchungen über die Wirksamkeit von Dämpfungsmaßnahmen an den Außenwänden von Düsenflugzeugen und Raketen seit Jahren im Gange. Von großem Einfluß auf die Schwingungseigenschaften der in Flugzeugkonstruktionen eingebauten schwingungsgedämpften Verbundblech-(Dreischicht-)Platten sind die notwendigen Versteifungen und Spanten ("stringers" und "frames") und auch die Krümmung der Platten. Unter anderem wurden die Dehnungen in solchen Verbundblechplatten bei Erregung mit statistischen Schalldruckfeldern (random load) untersucht⁽³⁰⁾. Es wurde gefunden, daß in den Sandwichplatten wesentlich niedrigere statistische Beanspruchungspegel (random stress level) als in entsprechenden Vollblechplatten auftreten. Bei Erregung mit einem sich über die Konstruktionen ausbreitenden statistischen Schalldruckfeld nimmt der mittlere Pegel umgekehrt proportional mit der Quadratwurzel aus dem Verlustfaktor der

Platten ab, wenn die Konvektionsgeschwindigkeit die niedrigste "pseudo-wavespeed", eine durch die Abmessungen der Versteifungen bestimmte "Phasengeschwindigkeit", überschreitet. Die Dämpfung der Sandwich-Platten wird durch Nieten wegen der Behinderung der Schubbeanspruchung der Zwischenschicht etwas beeinträchtigt. Auch die Krümmung der Platten, die besonders die Schwingungsformen mit großen Wellenlängen beeinflusst, vermindert die Verlustfaktoren der Platten, erhöht jedoch deren Steifheit. Punktschweißstellen, die oft Ansatzpunkte akustischer Ermüdungsbrüche sind, werden bei hoher Dämpfung der Platten so wenig beansprucht, daß Ermüdungsbrüche vermieden werden. Zu beachten ist ferner, daß die Umwandlung von freien Biegewellen in Dehnwellen und umgekehrt an den "Inhomogenitäten" bei der Schallausbreitung über ausgedehnte Strukturen eine Minderung der Ausbreitungsdämpfung gegenüber derjenigen bei reiner Biegewellenausbreitung ergibt, weil die dämpfenden Schichten auf Dehnwellen nicht wirken. Also auch die Umwandlung der Wellentypen an den Inhomogenitäten begrenzt die Wirksamkeit der Dämpfungsmaßnahmen. Diese kann trotz allem immer noch beträchtlich sein.

Die Unterdrückung der Körperschallausbreitung über die inhomogenen Strukturen und die Bekämpfung der akustischen Ermüdung in den intensiven statistischen Schallfeldern der Strahltriebwerke sind wichtige Ziele der Dämpfungsmaßnahmen. Untersuchung der akustischen Ermüdung mit verschiedenen Verfahren hat ergeben, daß die Lebensdauer der Wände (bis zu Ermüdungsbrüchen) mit deren Dämpfung stark anwächst^(2, 31) (vgl. Abschnitt I). Bei Verwendung hochwertiger Verbundbleche können die Lebensdauern um einen Faktor 10 und mehr verlängert werden. Solche diesen Zwecken optimal angepaßte Verbundbleche können bereits, wie gezeigt wurde (Abschnitt III b, Abb. 8), hergestellt werden, doch wird diese Möglichkeit in der Luftfahrttechnik noch nicht benutzt.

Literatur

- (1) C. Stüber, *Acustica* 6, 133(1956); *Lärmbekämpfung* 9, Nr. 1 und 2/3 (1965).
- (2) G. Kurtze und W. Westphal, "Structural Configurations for Increasing Fatigue Life", in "Acoustical Fatigue in Aerospace Structures", Proc. of the 2nd Internat. Confer., Dayton, Ohio, 1964, hrsg. von W. J. Trapp und D. M. Forney, Jr., Syracuse University Press, Syracuse, New York 1965, S. 617.
- (3) L. L. Beranek, "Noise Reduction", Mc Graw-Hill Book Comp., Inc., New York, Toronto, London 1960; 13.14: "Damping of Panels".
- (4) P. Liénard, *Rech. aéro.* 20,11 (1951); *Ann. Télécomm.* 12, 359(1957).
- (5) H. Oberst und K. Frankenfeld, *Acustica* 2, AB 183(1952).
- (6) H. Oberst, G. W. Becker und K. Frankenfeld, *Acustica* 4, 433(1954).
- (7) E. M. Kerwin, Jr., *J. Acoust. Soc. Amer.* 31, 952(1959).
- (8) D. Ross, E. E. Ungar und E. M. Kerwin, Jr., in "Structural Damping", S. 49. Papers ASME-Colloq. Atlantic City, N. J., 1959, hrsg. von J. E. Ruzicka, Amer. Soc. Mech. Engrs., New York 1959.
- (9) G. Kurtze und B. G. Watters, *J. Acoust. Soc. Amer.* 31, 739(1959).
- (10) N. I. Naumkin, B. D. Tartakowskij und M. M. Effussi, *J. Akust. UdSSR*, Bd. 5, Ed. 2, 196(1959).
- (11) E. E. Ungar und D. Ross, Proc. 4th Annual Confer. on Solid Mechanics, S. 468. University of Texas, Austin, Texas, 1959.
- (12) B. D. Tartakowskij und S. A. Rybak, 4th Internat. Congr. on Acoustics, Kopenhagen 1962.
- (13) Y. Y. Yu und N. Ren, in "Acoustical Fatigue in Aerospace Structures"⁽²⁾, S. 555.
- (14) H. Oberst, L. Bohn und F. Linhardt, *Kunststoffe* 51, 495(1961).
- (15) H. Oberst und A. Schommer, *Kunststoffe* 55, 634(1965); in "Acoustical Fatigue in Aerospace Structures"⁽²⁾, S. 599.
- (16) H. Oberst, *Ber. Bunsengesellsch. physik. Chem.* 70, 375(1966); *Koll.-Z., Z. Polymere* 216/217, 64(1967).
- (17) G. W. Becker, *Koll.-Z.* 140, 1(1955).
- (18) H. Oberst, in R. Nitsche und K. A. Wolf, "Kunststoffe", Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg. Bd. II: "Praktische Kunststoffprüfung" (1961); 3.4.2: "Zerstörungsfreie Prüfung auf dynamisch-elastisches Verhalten bei schwingender Beanspruchung".
- (19) A. J. Staverman und F. Schwarzl, in H. A. Stuart, "Physik der Hochpolymeren", Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg. Bd. IV: "Theorie und molekulare Deutung technologischer Eigenschaften von hochpolymeren Werkstoffen" (1956); Kap. I: "Linear Deformation of High Polymers".
- (20) A. V. Tobolsky, *Properties and Structure of Polymers*. J. Wiley & Sons, New York, London (1960).
- (21) J. D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*. J. Wiley & Sons, New York, London (1961).
- (22) L. E. Nielsen, *Mechanical Properties of Polymers*, Reinhold Publish. Corp., New York. (1962), Kap. 7.
- (23) G. W. Becker und E. Schreuer, in R. Nitsche und K. A. Wolf, "Kunststoffe"⁽¹⁸⁾. Bd. I: "Struktur und physikalisches Verhalten der Kunststoffe" (1962); 4.2: "Deformationsmechanik und Relaxationsverhalten".
- (24) P. E. Rouse, *J. chem. Physics* 21, 1272 (1953).
- (25) F. Linhardt und H. Oberst, *Acustica* 11, 255(1961).
- (26) M. Heckl, *J. Acoust. Soc. Amer.* 34, 803 (1962); *Lärmbekämpfung* (Juni/August 1963) S. 61.
- (27) H. Braunisch, "Entdröhnung durch schwingungsdämpfende Kunststoffe" in "Praxis der Lärmbekämpfung", Vorträge AICB-Tagung, Baden-Baden, 1966. Verlag für Medizin und Technik, Baden-Baden (1966), S. 159.
- (28) A. Schommer, *Klepzig-Fachberichte* 74, 301(1966).
- (29) P. Koch, *Klepzig-Fachberichte* 74, 347(1966).
- (30) D. J. Mead, "The Use of Stiffened Sandwich Plates on Aircraft", *Comptes rendus du "Symposium international sur l'Amortissement des vibrations de tôles par revêtement"*, Löwen, Belgien, 1967, hrsg. von H. Myncke, Gen.-Skr. der Assoc. Belge des Acousticiens (A.B.A.V.), Naamsestraat, 61, Leuven (Belgique).
- (31) F. Mechel, "Structural Configurations for Increasing Fatigue Life", *Comptes rendus*⁽³⁰⁾.