TAGUNGSBAND / CONFERENCE VOLUME

18. Internationale FSK-Fachtagung Polyurethan 2017

18th International FSK Specialist Conference Polyurethane 2017

07./08. Nov. 2017

FILL GmbH in Gurten · Österreich/Austria

Fachverband Schaumkunststoffe und Polyurethane e.V.

in Zusammenarbeit mit
in cooperation with

YOUR FUTURE

Polyurethan der perfekte Schwingungsisolierer

Martin Dietrich

Die Aussage, ob ein Produkt perfekt ist oder nicht, kann entweder marketingmäßig oder auf technischer Ebene geklärt werden. Dass ein Produkt perfekt ist, kann durch Marktbetrachtung erfolgen, da die Anzahl der Marktteilnehmer stetig wächst und die Performance des Werkstoffes über die Jahre vom Markt anerkannt worden ist. Für diese offensichtliche Tatsache ist aber der technische Nachweis im Laufe von vielen Jahren in der Anwendung erbracht worden. Welche Vorteile Polyurethan hier gegenüber anderen Produkten liefern, soll hier dargestellt werden.

Grundlagen der Schwingungsisolierung

Unter Schwingungsisolierung versteht man die Minimierung der Übertragung von Schwingungen (Erregerfrequenz bis 30 Hz) oder Körperschall (Erregerfrequenz < 30 Hz) von einem Erreger auf die zu schützende Umgebung.

Als Erreger kommen beispielsweise der Eisenbahnverkehr und Maschinen in Frage. Für die Beschreibung und Klärung der Grundprinzipien der Schwingungsisolierung wird meist der Ein-Massen Schwinger für die vertikale Translationsbewegung herangezogen. Dieses idealisierte und vereinfachte Modell besteht aus starren Massen, Federn und Dämpfern.

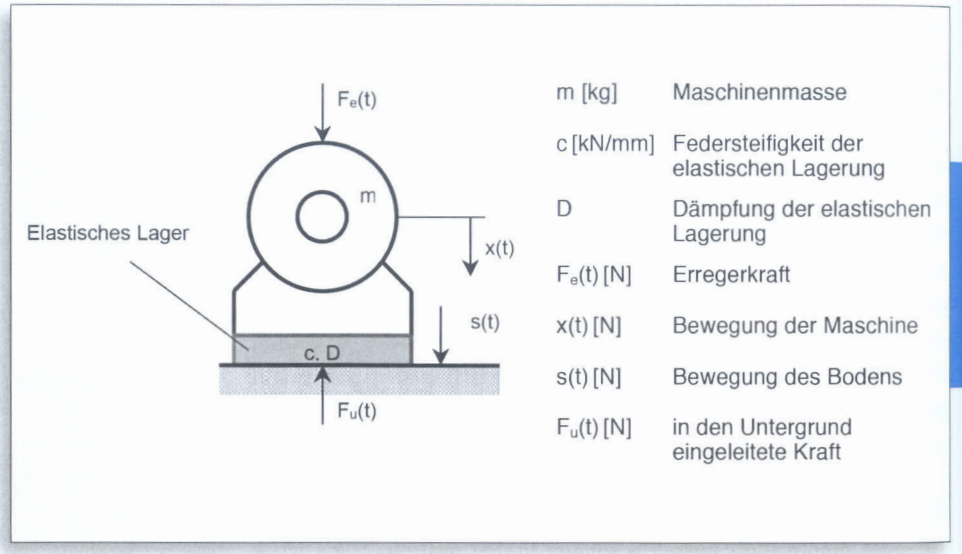


Abb. 1: Ein-Massen-Schwinger

Zur Bestimmung der Wirksamkeit einer Schwingungsisolierung sind demnach vor allem die elastischen Eigenschaften des Schwingungsisolierelementes von entscheidender Bedeutung.
Neben der statischen Steifigkeit des Bauteils, welche zur Ermittlung der Verformung unter statischer Last ausschlaggebend ist, stellt die dynamische Federsteifigkeit den wichtigsten Parameter zur Ermittlung der Eigenfrequenz eines schwingfähigen Systems dar.

Diese Eigenfrequenz also die Frequenz mit welcher ein schwingungsfähiges System nach einmaliger Anregung frei weiter schwingt erhält man gemäß:

$$f_o = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{E}{\sigma}} \quad [\mathrm{Hz}]$$

E = dyn E-Modul; σ = Pressung

Mit Hilfe der Eigenfrequenz und einem weiteren Materialkennwert, der Dämpfung des Elastomers kann man die Isolierwirkung anhand der Übertragungsfunktion ermitteln. Diese Übertragungsfunktion beschreibt die mathematische Beziehung zwischen der Systemantwort und der Einwirkung und wird üblicherweise als Funktion des Frequenzverhältnisses f/f0 (Erregerfrequenz/Resonanzfrequenz) dargestellt.

Aus dieser Abbildung (Abb.2) ist ersichtlich, dass eine Isolierwirkung nur im Frequenzbereich f/fo < √2 vorliegt.

Nach Klärung der für die Schwingungsisolierung wichtigen Parameter nämlich dynamische Steifigkeit und Dämpfung müssen wir noch einige weitere für die Anwendung relevante Anforderungen betrachten.

Das Schwingungsisolierelement muss zudem die für die Tragfähigkeit entscheidenden Eigenschaften der statischen Steifigkeit, der Dauerstandfestigkeit (kriechen) und Dauerschwellfestigkeit besitzen, damit eine langfristige Wirksamkeit gegeben ist. Weitere Parameter welche in der Regel nicht so offensichtlich sind stellen die Frequenzabhängigkeit und Amplitudenabhängigkeit der dynamischen Eigenschaften dar.

Unter Beachtung der aufgeführten Materialanforderungen können wir den Nachweis für die perfekte Schwingungsisolierung mit Polyurethan angehen. Dazu ist es erforderlich die ebenfalls für diese Anwendung verwendeten Produkte mit ihren spezifischen Eigenschaften mit denen der Polyurethane zu vergleichen.

Als Alternative sind hier Stahlfedern, Kautschukmaterialien, Polyurethan gebundene Gummigranulate (z.B. aus Altreifen) oder auch grundsätzlich mit Polyurethan gebundene Materialmischungen aus Kork, Gummi, PUR-Schaumstoffen und geschäumten Kautschukprodukten sowie Mineralfasern und thermoplastische Materialien zu nennen. Es soll hier zudem nicht unterschieden werden ob wir von kompakten oder geschäumten Produkten sprechen, da lediglich die Ausprägung bestimmter Eigenschaften die für Anwendung als meist druckbelastetes Bauteil von Interesse sind, betrachtet werden.

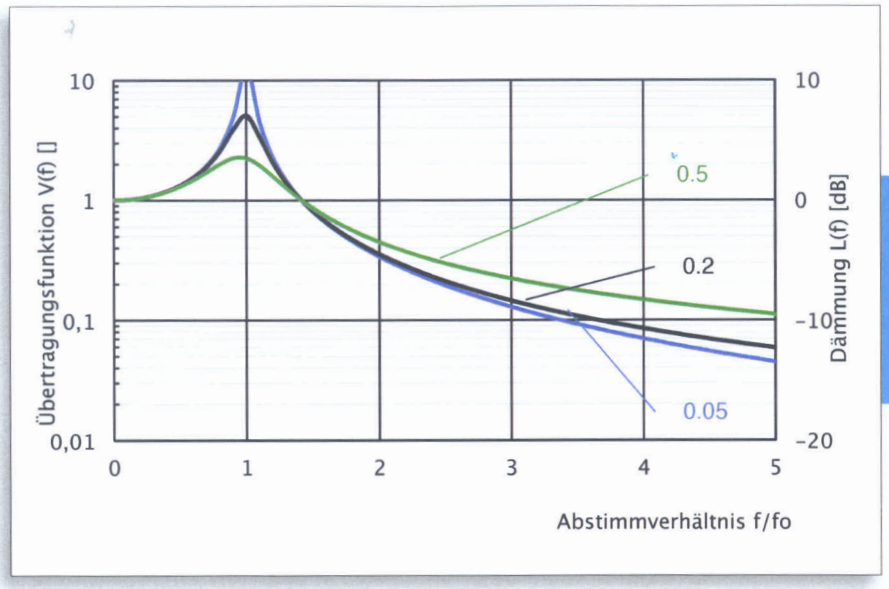


Abb. 2: Übertragungsfunktion als Funktion des Abstimmverhältnisses

Stahlfedern

Bei Stahlfedern stellen die Schraubendruckfedern die am Häufigsten verwendeten Bauteile dar. Als nahezu ideale Feder sind mit Stahlfedern sehr tiefe Abstimmfrequenzen erreichbar was daran liegt, dass die dynamische Steifigkeit nur marginal höher liegt als die statische Steifigkeit, das Versteifungsverhältnis also nur geringfügig über eins zu liegen kommt.

Dieser Vorteil wird aber mit einer vernachlässigbar geringen Dämpfung erkauft, was im Extremfall dazu führt, dass bei ungünstig gelegener Erregerfrequenz im Vergleich zur Abstimmfrequenz das Gesamtsystem sich im Resonanzbereich bewegt und es zur sog. Resonanzkatastrophe, der Verstärkung der Wegamplitude auf Erregerseite, und damit bis zur Zerstörung der Anlage führen kann. Nur durch den Einbau zusätzlicher Dämpfungselemente verbunden mit einer Beeinflussung der Abstimmfrequenz kann dieses Phänomen verhindert werden. In realen Anlagen treten neben vertikalen Kräften vielfach auch horizontale Kräfte auf. Schraubendruckfedern zeigen neben der fehlenden Dämpfung auch nur geringe Schubsteifigkeit, so dass Schubkräfte zu sehr hohen Bewegungen in horizontaler Richtung führen und das System auch hier mit Zusatzfedern beruhigt werden muss.

Ein weiterer Effekt bei Stahlfedern besteht darin, dass abhängig von der Dicke des Federstahls relativ niedrige Frequenzen über den Federstahl in den Untergrund eingeleitet werden und somit bereits Erregerfrequenzen von unter 50 Hz ungedämpft in den Untergrund gelangen. Zudem handelt es sich immer um relativ kleine Bauteile so dass die resultierenden Kräfte immer sehr hohe lokale Beanspruchungen des Untergrundes hervorrufen.

Abb. 3 a) Stahlfeder; 3 b) Feder mit integriertem Elastomerdämpfer; 3 c) Federpaket mit Dämpfer und Zusatzdämpfer für über die Stahlwendel übertragene höherfrequente Anteile

Mineralfasern oder Glasfasermatten
Diese Produkte werden überwiegend als Wärmeisolierung eingebracht und fungieren dabei in vielen Fällen auch als Körperschallisolierung. Die Produkte sind in unterschiedlichen Steifigkeitsklassen verfügbar und zeigen dynamische Versteifungsfaktoren von ca. 2 und höher was bedeutet, dass die Produkte zumindest dynamisch doppelt so steif sind als statisch.

Gegenüber Stahlfedern haben diese Produkte schon einen Vorteil, dass die Dämpfung eine Resonanzkatastrophe verhindert und durch die üblicherweise flächige Anwendung die lokalen Beanspruchungen des Untergrundes gering sind. Dass zur Verbindung der einzelnen Fasern vielfach Polyurethanrohstoffe (Diisocyanate unterschiedlichster Zusammensetzung) verwendet werden zeigt die Performance von Polyurethan sehr deutlich. Die Dauerschwellfestigkeit dieser Produkte ist mit denen anderer Werkstoffe nicht zu vergleichen. Geringfügige lokale Überbelastung führt zur sofortigen Schädigungen (Bruch der Fasern) aber auch homogener Lasteintrag in Verbindung mit dynamischen Kräften führt über kurz oder lang ebenfalls zur Zerstörung der Faserstruktur was sich in einem erhöhten Setzungsverhalten und Verlust der dynamischen Eigenschaften widerspiegelt.

Gummiwerkstoffe aus Natur oder Synthesekautschuk geschäumt oder kompakt
Gummiprodukte aus Naturkautschuk bzw. aus Polyisopren nehmen eine gewisse Sonderstellung innerhalb der Kautschukmaterialien ein. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der dynamischen Eigenschaften von den anderen synthetischen Materialien, da die dynamische Versteifung dieser beiden Produkte per se bei 10-20% liegt und damit deutlich geringer ist als bei den anderen Kautschukqualitäten. Klassische Produkte wie EPDM und SBR zeigen Versteifungen von über 50%.
Die dynamischen Eigenschaften unterliegen allerdings gewissen Rahmenbedingungen die vielfach unbekannt sind oder unwissentlich vernachlässigt werden. In der ISO 18437-1 wird im Anhang explizit auf die ausgeprägte Amplitudenabhängigkeit der dynamischen Eigenschaften von Gummiprodukten durch den Rußanteil hingewiesen. Demnach führen kleine Erregeramplituden zu einer erheblichen Versteifung von allen Gummiprodukten so dass die eingangs erwähnten geringen Versteifungsfaktoren erheblich größer werden (Abb. 4). Einhergehend damit sind auch die Frequenzabhängigkeit (Abb. 8) und die Dämpfungsabhängigkeit als Beeinflussungsparameter der dynamischen Steifigkeit bzw. des dynamischen E-Moduls zu berücksichtigen.

Bei Standardkautschukwerkstoffen zu denen auch Naturkautschuk gehört sind aufgrund der chemischen Grundstruktur eine Vielzahl von reaktiven Doppelbindungen vorhanden die im Vulkanisationsprozess nie vollständig umgesetzt werden und demzufolge im fertigen Elastomer noch Doppelbindungen vorliegen.
Durch Alterungsprozesse und Umwelteinflüsse können die hier stattfindenden Reaktionen zur Versprödung des Werkstoffes führen und damit die Eigenschaften entsprechend negativ beeinflussen. (Durch Additive kann dieser Prozess gebremst aber nicht vollständig und dauerhaft verhindert werden). Eine Ausnahme bildet hier EPDM, da die Anzahl der reaktiven Doppelbindungen beim Herstellungsprozess des Kautschuks auf die für die Anwendung erforderliche Mindestzahl eingestellt werden kann bzw. aufgrund der Anordnung außerhalb der Polymerkette keine Abbaureaktionen auftreten können. (Abb. 5)

Bei geschäumten Gummiprodukten muss noch unterschieden werden ob es sich um Moosgummi oder Zellkautschuk handelt. Zellkautschuk ist geschlossenzellig während Moosgummi die eher offenzellige Variante darstellt. Die Unterscheidung ist deshalb wichtig, weil druckbelastete, geschlossenzellige, geschäumte Produkte eine erhebliche Kriechneigung (Verformungszunahme unter Last) zeigen. Damit ist die für eine Schwingungsisolierung erforderliche Dauerschwellfestigkeit und Dauerstandfestigkeit nur bedingt gegeben.

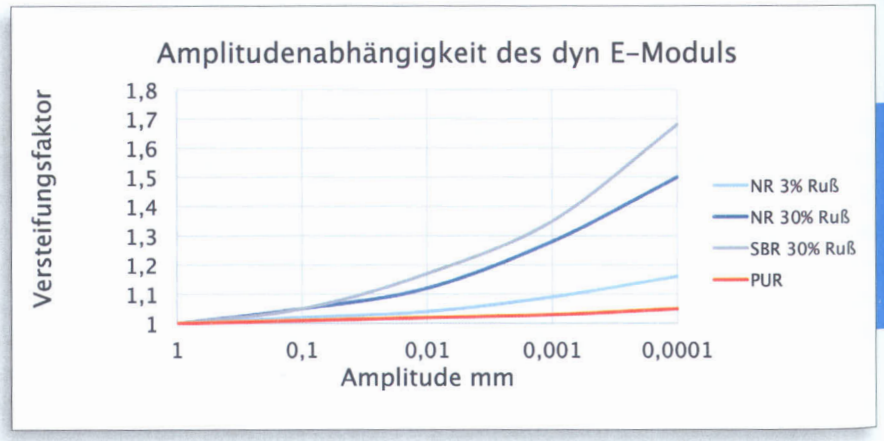


Abb. 4: Amplitudenabhängigkeit von mit Ruß verstärkten Kautschukwerkstoffen und Polyurethan

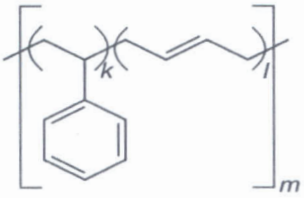
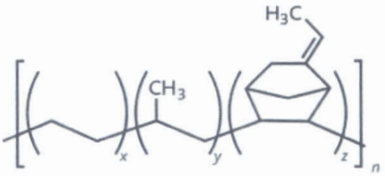


Abb. 5: SBR (Styrol-Butadien Rubber)



EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)

Kompakte Gummiprodukte eigenen sich grundsätzlich für Anwendungen in der Schwingungsisolierung und finden u.a. vielfältigen Einsatz als Verbundsysteme aus Metall und kompaktem Gummi sog. Gummi-Metallelemente. Als Vorteil ist hier die hervorragend Verbindungsfestigkeit zwischen Metall und anvulkanisiertem Gummi zu nennen. Nachteilig ist hierbei die hohe Steifigkeit so dass die eingetragene Last in die umgebene Struktur lokal hohe Werte annimmt. Für flächige Anwendungen werden daher profilierte Produkte angeboten um die erforderlichen niedrigen dynamischen Steifigkeiten zu erreichen. Diese Systeme sind sehr anfällig für Verschmutzungen die im Laufe der Zeit zu einer Beeinträchtigung der Wirksamkeit führen können.

Ein weiterer gravierender Unterschied ist das Verformungsverhalten von profilierten Produkten aus kompakten Werkstoffen die sich hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens wie kompakte Werkstoffe verhalten. Durch den progressiven Kurvenverlauf nimmt mit steigender Belastung auch die dynamische Steifigkeit zu was im Besonderen bei sog. Mehrmassenschwingern zu unerwünschten Wirksamkeitsverlusten führt. (Abb. 7)

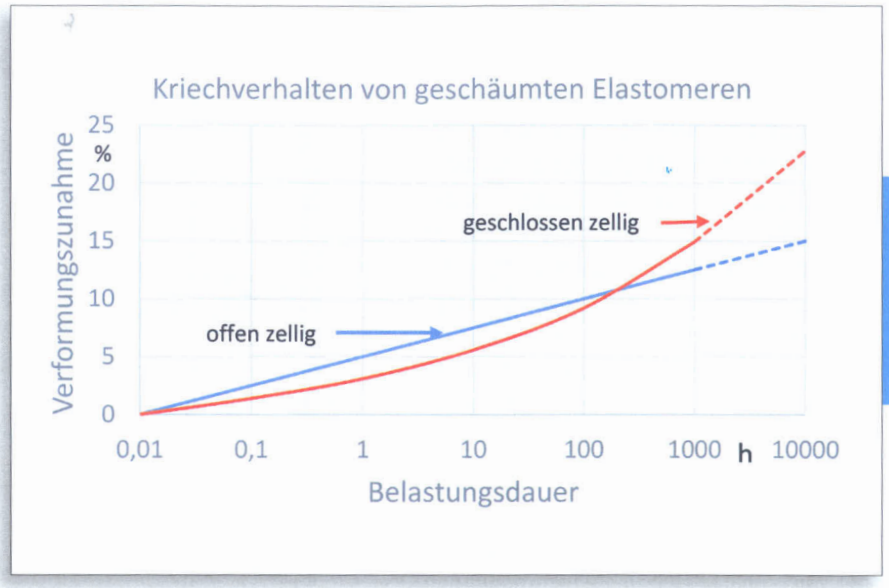


Abb. 6: Kriechverhalten von geschäumten Elastomeren vergleichbarer Dichte

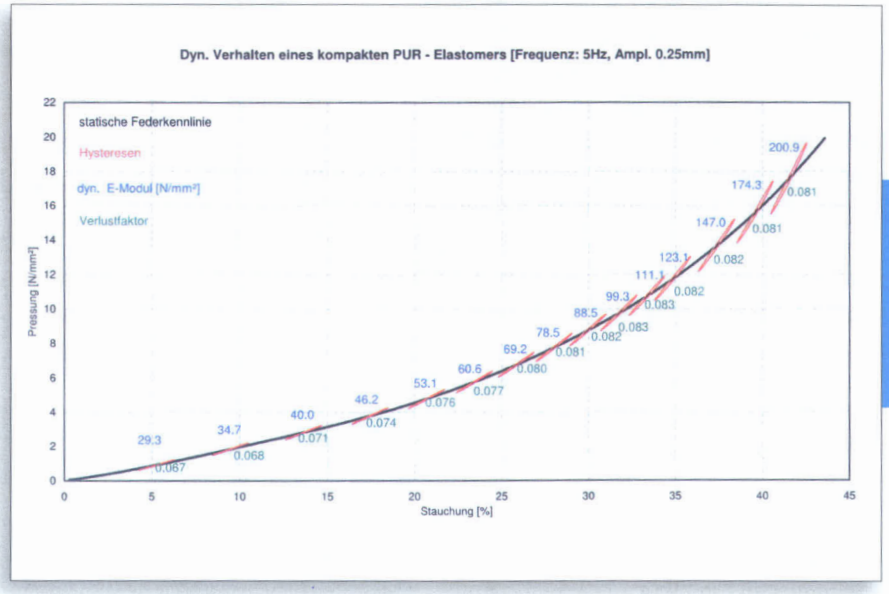


Abb. 7: Elastische Eigenschaften eines kompakten Werkstoffes (Bsp. PUR)

PUR gebundene Granulate

(Gummi (Altreifen); Gummi-Kork; Gummi-PUR Schaum; Flockenverbunde).

Ein grundsätzliches Problem aller genannten Produkte ist, dass es sich in der Regel um Verbundsystem aus teilweise gebrauchten Werkstoffen handelt. Gummigranulatmatten aus Altreifen sind hier ein vielfach verwendetes Produkt. Für diese Produktgruppe gilt das oben gesagte vollumfänglich und zudem zeigen die Werkstoffeigenschaften aufgrund der Streuung innerhalb der Reststofffraktion erhebliche Unterschiede.

Die anderen Verbundmaterialien unterscheiden sich hinsichtlich der elastischen Eigenschaften nur unwesentlich von den ihnen zugrunde liegenden Basiswerkstoffen, und eine detaillierte Betrachtung würde den Rahmen dieses Vortrages sprengen.

Polyurethan als perfekter Schwingungsisolierer

Was macht jetzt Polyurethan zum perfekten Schwingungsisolierer. Polyurethan lässt sich in nahezu allen Dichten und Steifigkeiten herstellen. Damit ist der Werkstoff grundsätzlich für alle denkbaren Anwendungen geeignet. Es lassen sich daher immer großflächige schwingungstechnische Entkopplungen bewerkstelligen und die Belastungen des Untergrundes sind homogen. Es können also lokale erhöhte Untergundbeanspruchungen verhindert werden, welche im Extremfall zu unerwünschten Setzungseffekten des Untergrundes und in weiterer Folge zu verminderter Wirksamkeit der Schwingungsisolierung führen können.

Polyurethane zeigen je nach den verwendeten Rohstoffen geringe ca.10% bis mittlere (50%) dynamische Versteifung. Sofern erforderlich sind auch höhere Versteifungsfaktoren möglich was aber für die Schwingungsisolierung kontraproduktiv wäre. Gegenüber allen Kautschukelastomeren besitzen Polyurethanwerkstoffe eine vernachlässigbare amplitudenabhängige Steifigkeitsänderung (Abb. 4). Aus dieser Werkstoffeigenschaft ergibt sich auch zwangsläufig eine deutlich geringer ausgeprägte Frequenzabhängigkeit des dynamischen E-Moduls.

Polyurethane zeigen wie bereits dargestellt bei allen dynamischen Beanspruchungen unabhängig von den Erregeramplituden immer die gleichen dynamischen Eigenschaften was bei allen anderen elastomeren Werkstoffen nicht der Fall ist. Ein weiterer Vorteil der Polyurethane liegt in der chemischen Struktur begründet. Aufgrund von fehlenden C=C Doppelbindungen ist die Oxidationsanfälligkeit wesentlich geringer als bei vielen Kautschukelastomeren wodurch die bei Kautschukmaterialien nur durch Einsatz von Additiven verbesserte Versprödungsneigung nicht vorhanden ist.

Die exzellente Alterungsbeständigkeit und Dauerschwellfestigkeit kann nicht nur durch entsprechende Laboruntersuchungen (Abb. 9) nachgewiesen werden sondern auch durch die langjährigen Erfahrungen und Nachmessungen von im Einsatz befindlichen Produkte.

Abb. 10 zeigt die dynamischen Eigenschaften von entnommenen Proben eines Produktes welches ca. 20 Jahre im Eisenbahnbereich verwendet wurde. Die Entnahme von Mustern wurde dadurch ermöglicht, dass durch den erforderlichen Austausch der verschlissenen Schienen innerhalb dieser Sperrpausen Zugang zum Gleis möglich war. Die Beanspruchung entspricht ca. 45 Millionen Lastwechseln und bei den zugrunde liegenden Achslasten ergeben sich daraus ca. 750 Millionen Lasttonnen die zu praktisch keiner Veränderung der Werkstoffeigenschaften geführt haben.

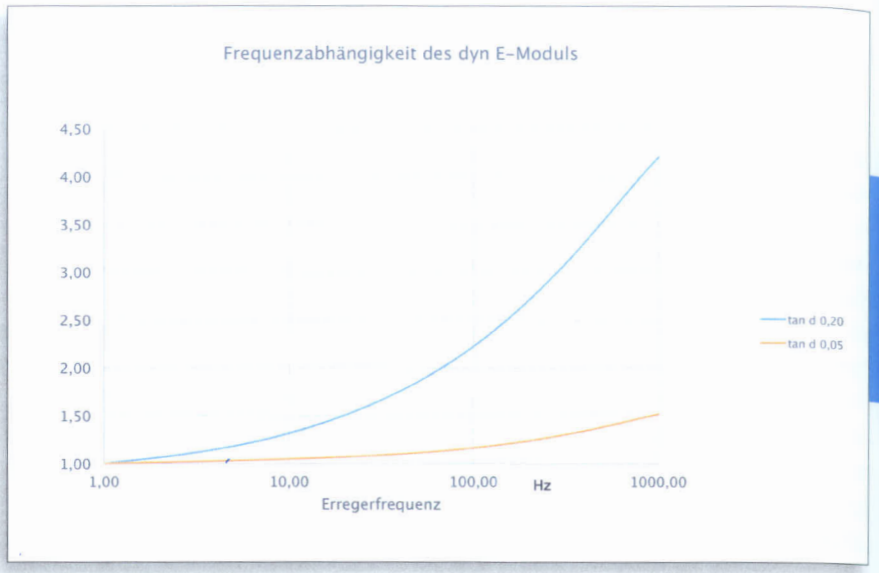


Abb. 8: Frequenzabhängigkeit als Versteifungsfaktor des dynamischen E-Moduls

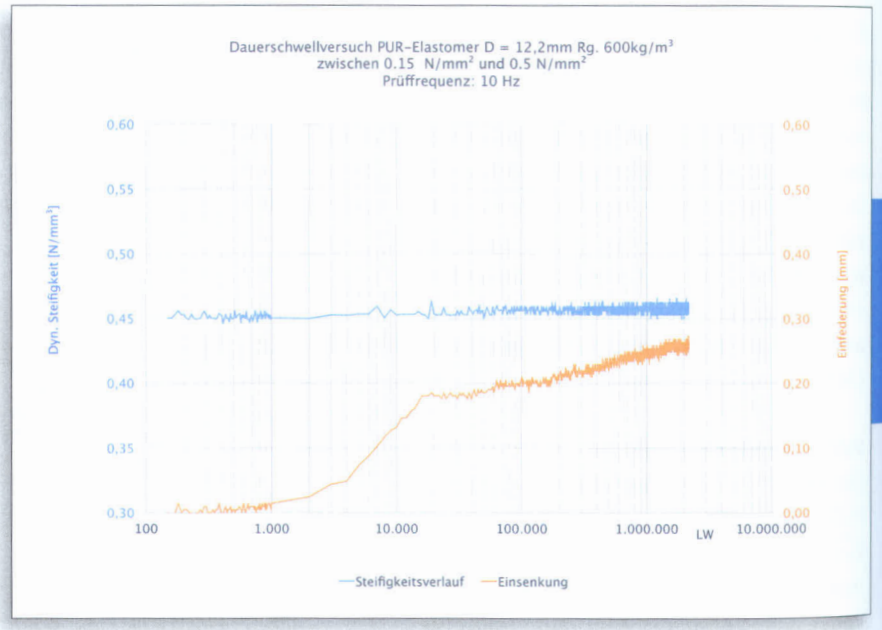


Abb. 9: Dauerschwelluntersuchung

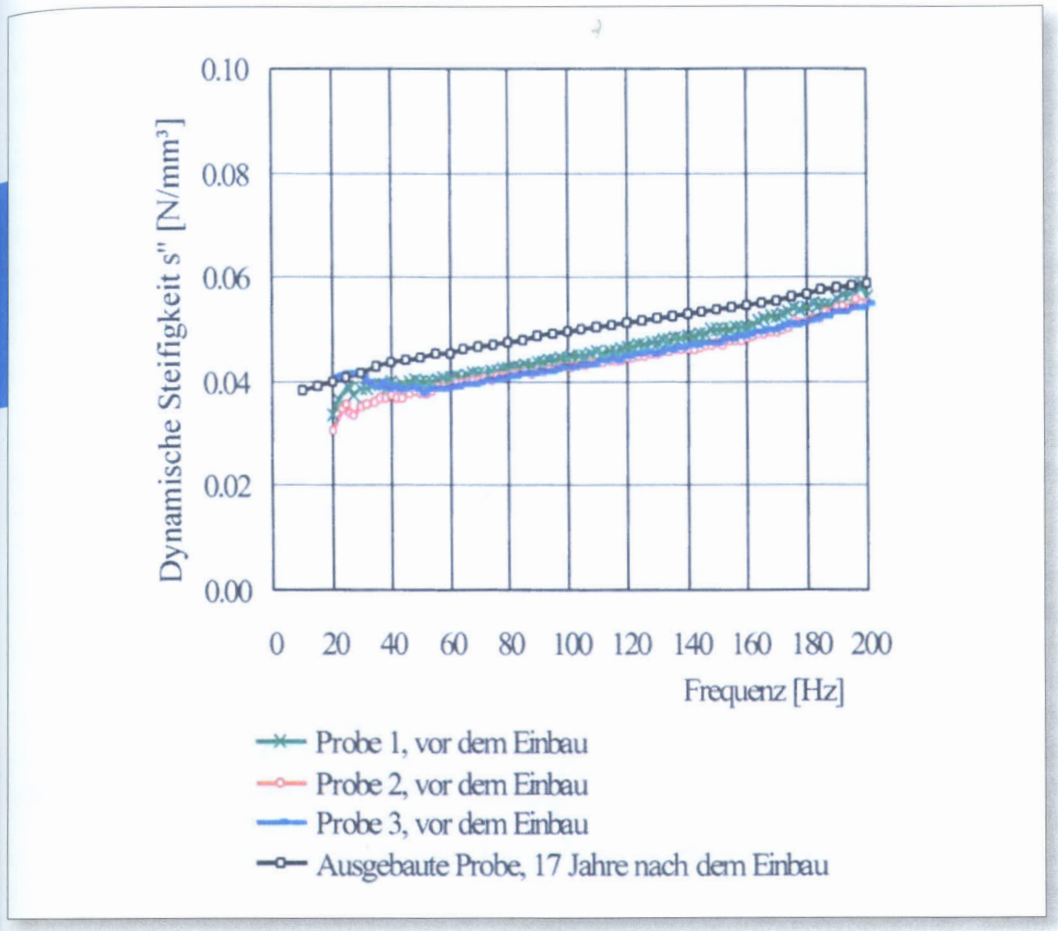


Abb. 10: Polyurethan ist also der ideale Schwingungsisolierer

Zusammenfassung

Polyurethan ist der perfekte Schwingungsisolierer weil dieser Werkstoff gegenüber anderen Bauteilen wie Stahlfedern, Gummiprodukte und auch Verbundmaterialien erhebliche Eigenschaftsvorteile bietet. Durch die integrierte Dämpfung ist gegenüber herkömmlichen Stahlfedern nur eine geringe Resonanzüberhöhung zu erwarten und eine sog Resonanzkatastrophe ausgeschlossen. Kautschukelastomere zeigen eine ausgeprägte Amplitudenabhängigkeit der dynamischen Steifigkeit was durch den Verstärkungsstoff Ruß noch erheblich verstärkt wird. Durch latent vorhandene Doppelbindungen in vielen Kautschukelastomeren liegt erhöhte Versprödungsneigung vor. Bei geschäumten Produkten führt die Geschlossenzelligkeit zu verstärktem Kriechen und verminderter Dauerstandfestigkeit. Polyurethane zeigen demgegenüber praktisch konstante dynamische Eigenschaften sowohl im Dauerstand- wie im Dauerschwellverhalten. Die Frequenz- und Amplitudenabhängigkeit ist wesentlich niedriger ausgeprägt. Daher eignet sich Polyurethan hervorragend für die Schwingungsisolierung.

BIOGRAPHIE

Martin Dietrich

geb. 1953 Studium der technischen Chemie an der FH Berlin. Seit 1977 tätig bei Getzner Werkstoffe GmbH im Bereich Forschung und Entwicklung. Von 1995 bis 2015 Leitung Werkstoffentwicklung jetzt als Fachexperte für Werkstoffe und Vorentwicklung tätig.