



(10) **DE 11 2015 002 478 T5** 2017.03.02

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2015/183868**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 002 478.6**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2015/032541**
(86) PCT-Anmeldetag: **27.05.2015**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **03.12.2015**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **02.03.2017**

(51) Int Cl.: **B32B 37/14 (2006.01)**
B32B 17/10 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
62/003,283 **27.05.2014** **US**

(74) Vertreter:
**Abitz & Partner Patentanwälte mbB, 81925
München, DE**

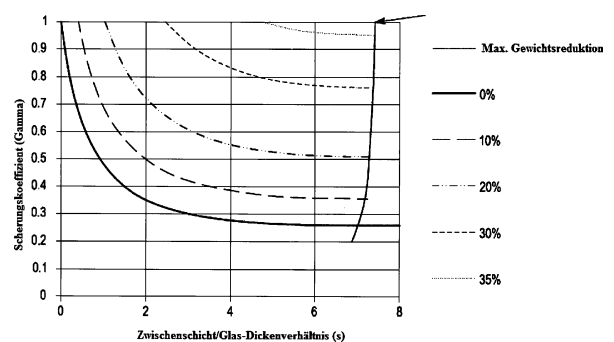
(71) Anmelder:
**E.I. du Pont de Nemours and Company,
Wilmington, Del., US**

(72) Erfinder:
**Shitanoki, Yuki, Tochigi, JP; Bennison, Stephen
J., Wilmington, Del., US**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Konstruieren eines festen leichten Laminats**

(57) Zusammenfassung: Hier wird ein Verfahren zum Konstruieren eines festen leichten Laminats bereitgestellt. Dieses Verfahren nutzt Prinzipien der effektiven Dicke zum Berechnen der Struktur eines Laminats, das eine Festigkeit gleich derjenigen eines Monolithen gleicher Dicke aufweist. In einer bevorzugten Anwendung des Verfahrens werden Sicherheitsglaslaminats konstruiert. Die Sicherheitsglaslaminats haben ein geringeres Flächengewicht bei gleicher Festigkeit, verglichen mit einer monolithischen Glasscheibe der gleichen Dicke wie derjenigen des Sicherheitsglaslaminats.



Beschreibung

QUERVERWEIS AUF VERWANDTE ANMELDUNG

[0001] Diese Anmeldung beansprucht Priorität nach 35 U.S.C. § 119 der vorläufigen Anmeldung Nr. 62/003, 283, eingereicht am 27. Mai 2014, die hier insgesamt durch Bezugnahme eingeschlossen ist.

GEBIET DER ERFINDUNG

[0002] Hier wird ein Verfahren zum Konstruieren eines festen leichten Laminats bereitgestellt. Dieses Verfahren nutzt Prinzipien der effektiven Dicke zum Berechnen der Struktur eines Laminats, das die gleiche Festigkeit und ein leichteres Gewicht im Vergleich zu einem Soll-Monolithen aufweist. In einer bevorzugten Anwendung des Verfahrens werden Sicherheitsglaslaminats entwickelt. Die Sicherheitsglaslaminats haben ein geringeres Flächengewicht bei gleicher Festigkeit im Vergleich zu einer monolithischen Glasscheibe der gleichen Dicke wie derjenigen des Sicherheitsglaslaminats.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0003] Mehrere Patente, Patentanmeldungen und Veröffentlichungen werden in dieser Beschreibung angeführt, um den Stand der Technik, zu der diese Erfindung gehört, ausführlicher zu beschreiben. Die gesamte Offenbarung jedes dieser drei Patente, Patentanmeldungen und Veröffentlichungen ist durch Bezugnahme hier eingeschlossen.

[0004] Die Suche nach leichteren, festeren Materialien ist in der Technik nach wie vor ein wichtiges Ziel. Es wird seit langem erkannt, dass eine Kombination ergänzender Materialien das Leistungsverhalten einer Strukturkomponente verbessern kann. Beispielsweise nutzt armerter Beton die hohe Festigkeit und Flexibilität von Stahlstäben, um die Sprödigkeit von Beton auszugleichen. In einem anderen Beispiel stellt eine polymere Zwischenschicht mit guter Zugfestigkeit die benötigte Zähigkeit für ein Glaslaminat bereit.

[0005] Die Verbesserung von Strukturmaterialien wie Glas, Metall, Beton, Keramik und Polymer-Mineral-Verbundstoffen durch Reduzierung ihres Gewichts bei Beibehaltung ihrer Festigkeit ergibt viele Vorteile. Bei Strukturkomponenten eines Fahrzeugs ergibt beispielsweise eine Reduzierung des Gewichts direkte Kraftstoffeinsparungen. Alternativ können Strukturen wirtschaftlicher hergestellt werden, beispielsweise wenn ein relativ preiswertes Polymer einen Teil eines Sondermetalls oder einer Sonderkeramik ersetzt.

[0006] Entsprechend besteht nach wie vor ein Bedarf, neue dünnere oder leichtere Laminats zu entwickeln, die eine ausreichende Festigkeit für den Einsatz in einer großen Vielfalt von Strukturen, darunter Gebäude, Fahrzeuge und Sicherheitsglaslaminats, aufweisen.

KURZFASSUNG DER ERFINDUNG

[0007] Bereitgestellt wird hier ein Verfahren zur Entwicklung fester leichter Laminats unter Anwendung der Prinzipien der effektiven Dicke. Zuerst wird das Grundmaterial ausgewählt. Basierend auf seinen physikalischen Eigenschaften und den Anforderungen an die Struktur wird eine Dicke für einen Monolithen des Grundmaterials ausgewählt. Beispielsweise kann die Konstruktion eines großen Lagertanks Edelstahl mit einer bestimmten Dicke erfordern. Als nächstes wird ein Kandidat für eine Zwischenschicht ausgewählt, beispielsweise ein steifes Polymer wie Polycarbonat oder eine leichte Keramik. Für das Stahl/Zwischenschicht/Stahl-Laminat wird ein Scherungsübertragungskoeffizient Γ berechnet, und zwar unter Anwendung des Wölfel-Bennison-Ansatzes, der in der folgenden Literatur beschrieben wird, z. B.: Calderone I., Davies P. S., Bennison S. J., Huang X., Gang L. "Effective laminate thickness for the design of laminated glass," Proceedings of the Glass Performance Days, Tampere, Finnland (2009); Galuppi L., Royer-Carfagni G. "Effective Thickness of Laminated Glass Beams. New expression via a Variational Approach," Engineering Structures, 38, 53–67 (2012); and Galuppi L., Manara G., Royer-Carfagni G., "Practical expressions for the design of laminated glass," Composites Part B: Engineering, 45 (1), 1677–1688 (2013). Es wird ein Gewichtsreduktionsziel ausgewählt.

[0008] Unter Anwendung des entsprechenden Kurvendiagramms in **Fig. 2** bis **Fig. 6(b)** stellt der Schnittpunkt des Wertes des Scherungsübertragungskoeffizienten Γ und der Kurve für die angestrebte Gewichtsreduktion das Verhältnis s zwischen den Dicken der Zwischenschicht und der Außenschichten. Eine weitere mathematische Beziehung stellt die Dicken der einzelnen Schichten bereit. Da der Wölfel-Bennison-Ansatz verfolgt wird,

ist die Festigkeit des Stahl/Zwischenschicht/Stahl-Laminats dieselbe wie diejenige des monolithischen Stahls bei gleicher Dicke.

[0009] Die Vorteile und Merkmale als Neuheit, die die Erfindung kennzeichnen, werden besonders in den hier angehängten Ansprüchen, die einen Teil davon bilden, herausgestellt. Zum besseren Verständnis der Erfindung, ihrer Vorteile und der Gegenstände, die durch ihre Anwendung gewonnen werden, ist jedoch auf die Zeichnungen, die einen weiteren Teil hiervon bilden, und die begleitende Beschreibung, in der eine oder mehrere Ausführungsformen der Erfindung beschrieben sind, Bezug zu nehmen.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0010] Fig. A ist eine Schnittansicht einer monolithischen Tafel.

[0011] Fig. B ist eine Schnittansicht eines Laminats.

[0012] Fig. 1 ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Biegeverhaltens ($k = 1$).

[0013] Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 7,41$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 36,0%.“

[0014] Fig. 2 ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Belastungsverhaltens ($k = 1$). Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 4,45$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 30,2%.“

[0015] Fig. 3 ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Biegeverhaltens ($k = 1,5$).

[0016] Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 9,38$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 30,1%.“

[0017] Fig. 4(a) ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Belastungsverhaltens ($k = 1,5$, Muster 1). Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 4,25$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 23,8%.“

[0018] Fig. 4(b) ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Belastungsverhaltens ($k = 1,5$, Muster 2). Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 5,45$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 33,9%.“

[0019] Fig. 5 ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Biegeverhaltens ($k = 2$). Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 11,3$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 33,4%.“

[0020] Fig. 6(a) ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Belastungsverhaltens ($k = 2$, Muster 1). Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 4,29$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 17,9%.“

[0021] Fig. 6(b) ist ein Kurvendiagramm von s in Bezug auf Γ für eine Gewichtsreduktion mit Angleichung des Belastungsverhaltens ($k = 2$, Muster 2). Der Pfeil gibt an: „Maximum: $s = 6,56$, $\Gamma = 1$, Gewichtsreduktion = 35,1%.“

[0022] Fig. 7 ist eine perspektivische Ansicht eines Vier-Punkt-Biegeprüfgeräts, einschließlich des Testbalkens. Belastung und Biegung werden in der Mitte der Unterseite der unteren Glasschicht gemessen (gestrichelter Pfeil). $L_1 = 200$, $L_2 = 100$, $L_3 = 50$, $b = 100$.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0023] Die folgenden Definitionen gelten für die Ausdrücke, wie sie in dieser Beschreibung verwendet werden, sofern sie nicht im konkreten Fall anderweitig eingeschränkt werden.

[0024] Darüber hinaus haben alle hier verwendeten technischen und wissenschaftlichen Fachausdrücke, sofern nicht anderweitig definiert, dieselbe Bedeutung, wie sie üblicherweise von einem normalen Fachmann des Fachgebiets, zu dem diese Erfindung gehört, verstanden wird. Im Falle eines Konflikts hat die vorliegende Beschreibung einschließlich der hier enthaltenen Definition Vorrang.

[0025] Auch wenn Verfahren und Materialien, die den hier beschriebenen ähnlich oder gleichwertig sind, in der praktischen Anwendung oder Erprobung der Erfindung verwendet werden können, werden geeignete Verfahren und Materialien hier beschrieben.

[0026] Wie hier verwendet, bedeutet der Ausdruck „ca.“, dass Beträge, Größen, Formulierungen, Parameter und andere Mengen und Eigenschaften nicht genau sind und sein müssen, sondern ungefähr und/oder größer oder kleiner als gewünscht sein können, was Toleranzen, Umrechnungsfaktoren, Auf- und Abrunden, Messfehler und dergleichen und sonstige, dem Fachmann bekannte Faktoren wiedergibt. Im Allgemeinen ist ein Betrag, eine Größe, eine Formulierung, ein Parameter oder eine sonstige Menge oder ein Merkmal „ca.“ oder „ungefähr“, ob es ausdrücklich so gesagt wird oder nicht.

[0027] Der Ausdruck „oder“, wie hier verwendet, ist einschließend; insbesondere bedeutet die Wendung „A oder B“ „A, B oder A und B“. Ausschließendes „oder“ wird hier beispielsweise durch Ausdrücke wie „entweder A oder B“ und „eines von A oder B“ bezeichnet.

[0028] Außerdem sind bei Bereichen, die hier genannt werden, ihre Endpunkte eingeschlossen, sofern nicht unter eingeschränkten Umständen anders angegeben. Ferner ist, wenn ein Betrag, eine Konzentration oder ein anderer Wert oder Parameter als ein Bereich, ein oder mehrere bevorzugte Bereiche oder eine Liste von oberen bevorzugten Werten oder unteren bevorzugten Werten angegeben wird, dies so zu verstehen, dass dadurch alle Bereiche, die aus einem Paar aus einer oberen Bereichsgrenze oder bevorzugtem Wert und einer unteren Bereichsgrenze oder bevorzugtem Wert gebildet sind, angegeben werden, unabhängig davon, ob solche Paare getrennt offenbart werden.

[0029] Darüber hinaus soll der Bereich, wenn hier ein Bereich aus numerischen Werten genannt wird, die Endpunkte davon und alle Ganzzahlen und Bruchzahlen innerhalb dieses Bereichs einschließen, sofern unter bestimmten Umständen nicht anders angegeben. Der Umfang der Erfindung soll nicht auf die bestimmten Werte, die beim Definieren eines Bereichs genannt werden, eingeschränkt werden. Schließlich ist die Offenbarung, wenn der Ausdruck „ca.“ in der Beschreibung eines Wertes oder eines Bereichsendpunktes verwendet wird, so zu verstehen, dass sie diesen bestimmten Wert oder Endpunkt, auf den Bezug genommen wird, einschließt.

[0030] Wenn Materialien, Verfahren oder Maschinen hier mit dem Ausdruck „Fachleuten bekannt“ oder einem synonymen Wort oder einer synonymen Wendung beschrieben werden, bedeutet der Ausdruck, dass Materialien, Verfahren und Maschinen, die bei der Einreichung der vorliegenden Anmeldung konventionell sind, durch diese Beschreibung umfasst sind. Auch umfasst sind Materialien, Verfahren und Maschinen, die gegenwärtig nicht konventionell sind, sondern in der Technik als geeignet für einen ähnlichen Zweck anerkannt werden.

[0031] Wie hier verwendet, beziehen sich die Ausdrücke „umfasst“, „umfassend“, „sind unter anderem“, „darunter“, „enthaltend“, „gekennzeichnet durch“, „hat“, „mit“ oder ein sonstiges Synonym oder eine Variation davon auf einen nicht-exklusiven Einschluss. Beispielsweise ist ein Prozess, ein Verfahren, ein Artikel oder eine Vorrichtung, der/die als eine bestimmte Liste von Elementen umfassend beschrieben wird, nicht unbedingt auf die besonders aufgelisteten Elemente beschränkt, sondern kann ferner andere Elemente aufweisen, die nicht ausdrücklich aufgelistet sind oder solch einem Prozess, einem Verfahren, einem Artikel oder einer Vorrichtung eigen sind.

[0032] Die Übergangswendung „bestehend im Wesentlichen aus“ beschränkt den Umfang eines Anspruchs auf die angegebenen Materialien oder Schritte und diejenigen, die die grundlegenden und neuartigen Merkmale der beanspruchten Erfindung nicht materiell beeinflussen. Ein Anspruch „bestehend im Wesentlichen aus“ nimmt eine mittlere Stellung ein zwischen geschlossenen Ansprüchen, die im Format „bestehend aus“ formuliert sind, und völlig offenen Ansprüchen, die im Format „umfassend“ formuliert sind.

[0033] Wenn eine Erfindung oder ein Teil davon mit einem offenen Ausdruck wie etwa „umfassend“ beschrieben wird, ist es so zu verstehen, dass diese Beschreibung, sofern unter bestimmten Umständen nicht anders angegeben, auch eine Beschreibung der Erfindung enthält, die den Ausdruck „im Wesentlichen bestehend aus“ enthält, so wie sie oben definiert sind.

[0034] Die unbestimmten Artikel „ein“ und „eine“ werden verwendet, um Elemente und Komponenten dieser Erfindung zu beschreiben. Der Gebrauch dieser Artikel bedeutet, dass eines oder mindestens eines dieser Elemente oder Komponenten vorhanden ist. Auch wenn diese Artikel konventionellerweise verwendet werden, um zu bedeuten, dass das modifizierte Substantiv ein Substantiv im Singular ist, schließen die Artikel „ein“ oder „eine“ auch den Plural ein, sofern in konkreten Fällen nicht anders angegeben. Genauso bedeutet der

bestimmte Artikel „der/die/das“, wie hier verwendet, auch, dass das modifizierte Substantiv Singular oder Plural sein kann, wieder sofern in konkreten Fällen nicht anders angegeben.

[0035] Die hier angegebenen Materialien, Verfahren und Beispiele sind nur veranschaulichend und sollen nicht einschränkend sein, außer wenn besonders angegeben.

[0036] Insbesondere bezieht sich der Ausdruck „monolithisch“, wie hier verwendet, auf eine Tafel, eine Schicht oder einen Block eines einzigen vollen Materials mit gleichmäßigen Eigenschaften durch seine gesamte Masse, beispielsweise eine Glasplatte, eine Betonschicht oder einen Metallblock.

[0037] Der Ausdruck „Laminat“, wie hier allein oder in kombinierter Form wie beispielsweise „laminiert“ oder „Laminierung“ verwendet, bezieht sich auf eine Struktur mit mindestens zwei Schichten, die fest aneinandergelastet oder -gebunden sind. Die Schichten können direkt oder indirekt aneinandergelastet werden. „Direkt“ bedeutet, dass sich kein zusätzliches Material wie etwa eine Zwischenschicht oder eine Haftschrift zwischen den zwei Schichten befindet, und „indirekt“ bedeutet, dass sich zusätzliches Material zwischen den zwei Schichten befindet.

[0038] Das Symbol „I“, wie hier verwendet, beispielsweise zur Beschreibung einer Laminatstruktur wie etwa „Glas/Zwischenschicht/Glas“ bezieht sich auf den direkten Kontakt zwischen der gesamten Fläche der zwei benachbarten Schichten im Laminat.

[0039] Der Ausdruck „Flächendichte“, wie hier verwendet, bezieht sich auf das Gewicht eines Laminats, dividiert durch seine projizierte Fläche. Beispielsweise ist bei einem Laminat, das die Form eines Rechteckprismas hat, die projizierte Fläche das Produkt aus der Länge und der Breite des Laminats und schließt nicht die Seiten- und Bodenflächen des Laminats ein.

[0040] Der Ausdruck „effektive Dicke“, wie hier verwendet, bezieht sich auf die reale Dicke eines monolithischen Glasbalkens mit einer Biegesteifigkeit, die gleich derjenigen eines laminierten Balkens mit der Struktur „Material/Zwischenschicht/Material“ ist. Die effektive Dicke kann anstelle der realen Dicke des Laminats in analytischen Gleichungen für die Verformung laminierten Balken verwendet werden.

[0041] Hier wird ein Verfahren zur Entwicklung fester leichter Laminare bereitgestellt. Bei diesem Verfahren werden die mechanischen Eigenschaften von Laminaten mit der Struktur „Material/Zwischenschicht/Material“ anhand der Prinzipien der effektiven Dicke modelliert. Insbesondere basieren die Prinzipien der effektiven Dicke auf der Scherverbindung Γ zwischen den beiden Materialschichten durch die Zwischenschicht. Die Scherverbindung Γ wiederum hängt primär von der Schersteifigkeit bzw. dem Schermodul der Zwischenschicht, den Materialeigenschaften der Zwischenschicht und der Geometrie und den Längenmaßen des Laminats ab. Allgemein ausgedrückt, ist bekannt, dass viele Zwischenschichten polymer und somit weniger dicht sind als viele Strukturmaterialien wie etwas Glas, Metalle und Keramik; deshalb sind Material/Polymer/Material-Laminare leichter als monolithische Tafeln mit derselben Dicke. Außerdem ist bekannt, dass die Material/Polymer/Material-Laminare und die monolithischen Tafeln mit derselben Dicke in der Biegesteifigkeit möglicherweise nicht gleich sind. Insbesondere wurden die Bedingungen, unter denen die Wölfel-Theorie anwendbar ist, nun gefunden. Konkret ist Gleichung (A) eine Bestimmungsgleichung, die die Beziehung zwischen dem Verhältnis s der Zwischenschicht/Material-Dicke und den Modulen der Zwischenschicht E_{int} und des Materials E_{mtl} beschreibt.

$$\frac{E_{int}}{E_{mtl}} \frac{s^3}{6s^2 + 12s + 8} \leq 0,03 \quad (A)$$

[0042] Es wurde nun jedoch überraschend festgestellt, dass der Betrag der Gewichtsreduktion, der durch Material/Polymer/Material-Laminare im Vergleich zu monolithischen Tafeln erreichbar ist, berechnet werden kann, wenn das Laminat die gleiche Festigkeit und ein leichteres Gewicht im Vergleich zu dem Soll-Monolithen aufweist.

[0043] Nun auf die Zeichnungen Bezug nehmend, bei denen gleiche Bezugsziffern die entsprechende Struktur in allen Ansichten bezeichnet, und insbesondere auf **Fig. A** Bezug nehmend, ist ein Monolith eines Grund- oder „Struktur“materials **100** dargestellt. Der Monolith **100** kann aus einem beliebigen Grund- oder „Struktur“material hergestellt sein, darunter ohne Einschränkung Glas; Metall; Keramik; Beton; Mineralien wie etwa Granit, Marmor, Kalk und Glimmer; Holz; Holzverbundstoffe mit Polymeren, beispielsweise Karton und Papier; Stoff; beispielsweise Vliesfasermatten; Polymere; und Verbundstoffe aus Mineralien und Polymeren.

[0044] In diesem Zusammenhang schließt der Ausdruck „Glas“, wie hier verwendet, Fensterglas, Plattenglas, Silikatglas, Tafelglas, eisenarmes Glas, gehärtetes Glas, gehärtetes CeO-freies Glas, Floatglas, Farbglas, Sonderglas (wie etwa Glas, das Steuerungszubehör enthält, z. B. Solarheizung), beschichtetes Glas (wie etwa Glas mit aufgestäubten Metallen (z. B. Silber oder Indiumzinnoxid) für solartechnische Steuerungszwecke, E-Glas, Toro-Glas und Solexia™-Glas (erhältlich bei PPG Industries, Inc., aus Pittsburgh, PA) ein. Solche Sondergläser sind beispielsweise in US-Patent Nr. 4,615,989; 5,173,212; 5,264,286; 6,150,028; 6,340,646; 6,461,736 und 6,468,934 offenbart.

[0045] Nun auf **Fig. B** Bezug nehmend, ist ein Material/Zwischenschicht/Material-Laminat **200** dargestellt. Im hier beschriebenen Verfahren sind die Außenschichten **21** und **23** des Laminats **200** aus demselben Strukturmaterial hergestellt, das im Monolith **100** verwendet wird. Glas ist ein bevorzugtes steifes Strukturmaterial. Das Laminat **200** muss nicht symmetrisch sein, d. h. die Dicke der ersten Außenschicht **21** muss nicht gleich derjenigen der zweiten Außenschicht **23** sein. Die Zwischenschicht **22** umfasst ein Material, dessen Eigenschaften in gewisser Weise diejenigen des Strukturmaterials in den Außenschichten ergänzen. Beispielsweise stellt eine polymere Zwischenschicht mit guter Zugfestigkeit die benötigte Zähigkeit für ein Sicherheitsglaslaminat bereit. Genauso kann eine polymere Zwischenschicht mit guter Viskoelastizität Sprödigkeit von Glasmaterialien kompensieren und ein Sicherheitsverhalten beim Verglasen einbringen, beispielsweise durch Verhindern eines Verstreuens von Glasstücken nach einem Bruch.

[0046] Geeignete Materialien für die Zwischenschicht sind unter anderem Materialien, die zur Verwendung im Monolithen **100** geeignet sind. Auch geeignet sind weniger steife Materialien, wie etwa beispielsweise Polymere mit einem Modul von 200 MPa bis 600 MPa. Außerdem kann Gleichung (A) oben verwendet werden, um Materialien zu identifizieren, die zur Verwendung in den hier beschriebenen Verfahren geeignet sind. Insbesondere kann Gleichung (A) angewandt werden, um einen geeigneten Modulbereich für Kandidatenmaterialien zu identifizieren, basierend auf dem Modul eines ausgewählten Materials und angesichts des Parameters s , des Schichtdickenverhältnisses im Laminat **200**.

[0047] Polymere sind bevorzugte Zwischenschichtmaterialien, und besonders bevorzugt sind Polycarbonate; Polystyrole; Silikonelastomere; Epoxidharze; Polystyrole; Polyvinylchloride; Polyurethane; Polyethylen-Homopolymere und Ethylen-Copolymere mit anderen Alkenen, darunter Metallocen-katalysierte Materialien wie etwa lineare Polyethylene geringer Dichte; Polyolefin-Blockelastomere; Ethylensäure-Copolymere wie etwa die unter der Marke Nucrel® von E. I. du Pont de Nemours and Company of Wilmington, Delaware, (im Folgenden "DuPont") erhältlichen; Ionomere von Ethylensäure-Copolymeren wie die von DuPont unter der Marke SentryGlas® erhältlichen; Poly(vinylacetale), darunter Poly(vinylbutyrale) wie die von Kuraray America, Inc., aus Houston, Texas, unter der Marke Butacite® erhältlichen; Ethylen-Copolymere mit polaren Comonomeren wie etwa Vinylacetat (beispielsweise die von DuPont unter der Marke Elvax® erhältlichen) und Alkyl(meth)acrylate, darunter Methylacrylat und Butylacrylat (beispielsweise die von DuPont unter der Marke Elvaloy® erhältlichen).

[0048] Wie aus dem oben Gesagten ersichtlich ist, gelten die hier beschriebenen Prinzipien der effektiven Dicke für eine breite Vielfalt von Laminaten, die eine breite Vielfalt von Materialien umfassen. Der Bequemlichkeit halber konzentriert sich die folgende Erörterung auf Glaslaminat mit der Struktur „Glas/Zwischenschicht/Glas“, wobei die Zwischenschicht polymer ist.

[0049] Ferner wird hier ein Verfahren zur Entwicklung eines leichten Laminats **200** bereitgestellt, bei dem die Außenschichten **21** und **23** dieselbe Dicke aufweisen ($k = 1$). Zuerst wird der Scherungsübertragungskoeffizient Γ mithilfe der Gleichung (1) berechnet.

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9,6 \frac{E}{G l^2} \frac{h t}{2}} \quad (1)$$

[0050] In der Gleichung (1) und den anderen hier dargelegten Gleichungen werden die folgenden Variablen zugewiesen:

- t: Dicke der Zwischenschicht **22**,
- h: kleinere Dicke von Glas **21** oder **23**,
- k: Dickenverhältnis von zwei Glastafeln **21** und **23** (in diesem Fall $k = 1$),
- l: Längenskala (kürzeste Biegerichtung),
- E: Youngscher Modul des Glases,
- G: Schermodul einer Zwischenschicht **22**, die auf Eignung zu prüfen ist.

[0051] Der Schermodul der Zwischenschicht **22**, G , wird gewonnen durch eine dynamische mechanische Analyse (DMA), gefolgt von einer Zeit-Temperatur-Überlagerung und Berechnung des Scherrelaxationsmoduls. Eine spezifische Methodik zum Messen des Schermoduls ist beschrieben in S. J. Bennison, A. Jagota und C. A. Smith, "Fracture of glass/poly.vinyl butyral/ .Butacite®/laminates in biaxial flexure", J. Am. Ceram. Soc. 1999; 82 (7), 1761–1770.

[0052] Ferner werden in diesem Zusammenhang die Parameter h und t nicht in diesem Schritt bestimmt; jedoch haben sie keine starke Auswirkung auf den Scherungsübertragungskoeffizienten Γ . Deshalb erfolgen die Berechnungen anhand $1/3$ der Dicke des monolithischen Soll-Glases **100** als Versuchswerte für h und t .

[0053] Sobald der Wert Γ bestimmt ist, kann eine gewünschte Gewichtsreduktion anhand der Konstruktionskriterien ausgewählt werden. Die Gewichtsreduktion ist wieder die Differenz zwischen dem Flächengewicht des Laminats **200** und dem Flächengewicht des Monolithen **100**. Mithilfe des Scherungsübertragungskoeffizienten, der durch Gleichung (1) berechnet wird, und des angestrebten Prozentsatzes der Gewichtsreduktion kann ein Wert für das Dickenverhältnis s aus den Kurven in **Fig. 1** und **Fig. 2** ausgewählt werden. Um das Biegeverhalten gleich demjenigen des Monolithen **100** (Angleichung des Biegeverhaltens) zu halten, wenden Sie das Kurvendiagramm von **Fig. 1** an. Um die Bruchfestigkeit gleich derjenigen des Monolithen **100** (Angleichung des Belastungsverhaltens) zu halten, wenden Sie das Kurvendiagramm von **Fig. 2** an.

[0054] Die effektive Dicke der Kandidatenstrukturen kann nun berechnet werden, indem einige Kombinationen von h und t ausgewählt werden, die das aus dem entsprechenden Kurvendiagramm erhaltene Dickenverhältnis s ($= t/h$) erfüllen. Die effektive Dicke h_{ef} des Laminats **200** wird mithilfe der Gleichungen (2) und (3) bestimmt.

[0055] Für die Angleichung des Biegeverhaltens wenden Sie Gleichung (2) an.

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{6\Gamma ht^2 + 12\Gamma h^2 t + (6\Gamma + 2)h^3} \quad (2)$$

[0056] Für die Angleichung des Belastungsverhaltens wenden Sie Gleichung (3) an.

$$h_{ef;\sigma} = \sqrt{\frac{6\Gamma ht^2 + 12\Gamma h^2 t + (6\Gamma + 2)h^3}{\Gamma t + (1 + \Gamma)h}} \quad (3)$$

[0057] In einem alternativen Ansatz kann die angestrebte effektive Dicke h_{ef} dazu dienen, mithilfe der Gleichungen (2') und (3') die genaue Dicke der Außenschicht h zu berechnen, die notwendig ist, um die Soll-StEIFigkeit zu erreichen.

$$h = \frac{h_{ef;w}}{\sqrt[3]{6\Gamma s^2 + 12\Gamma s + (6\Gamma + 2)}} \quad (2')$$

$$h = h_{ef;\sigma} \sqrt{\frac{\Gamma s + (1 + \Gamma)}{6\Gamma s^2 + 12\Gamma s + (6\Gamma + 2)}} \quad (3')$$

[0058] Schließlich wird eine Struktur für das Laminat **200** ausgewählt, dessen effektive Dicke gleich oder größer als das monolithische Soll-Glas ist. Die Dicke t der Zwischenschicht kann aus der Beziehung $t = sh$ berechnet werden. Signifikanterweise sind jedoch h und t , die in diesem Ansatz bestimmt werden, im Hinblick auf kommerzielle Verfügbarkeit nicht unbedingt gangbar. Deshalb kann eine praktikable Konstruktionsstrategie es erforderlich machen, dass die Schichtdicken h und t durch einen iterativen Prozess bestimmt oder in sonstiger Weise feinabgestimmt werden.

[0059] Ferner wird hier ein Verfahren zur Entwicklung eines leichten Laminats **200** bereitgestellt, bei dem die Außenschichten **21** und **23** Dicken aufweisen, die durch das Verhältnis $k = 1,5$ miteinander in Zusammenhang stehen. Ohne zu wünschen, dies theoretisch nachweisen zu müssen, wird davon ausgegangen, dass $1,5$ nahe am maximalen Dickenverhältnis k liegt, das bei laminiertem Glas praktikabel ist. Zuerst wird der Scherungsübertragungskoeffizient Γ mithilfe der Gleichung (4) berechnet.

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9,6 \frac{E}{G l^2} \frac{k}{k+1} ht} \quad (4)$$

[0060] Erneut erfolgen Berechnungen anhand 1/3 der Dicke des monolithischen Soll-Glases **100** als Versuchswerte für h und t aus den oben dargelegten Gründen für das Laminat **200** mit k = 1.

[0061] Sobald der Wert Γ bestimmt ist, kann eine gewünschte Gewichtsreduktion anhand der Konstruktionskriterien ausgewählt werden. Mithilfe des Scherungsübertragungskoeffizienten, der durch Gleichung (4) berechnet wird, und des angestrebten Prozentsatzes der Gewichtsreduktion kann ein Wert für das Dickenverhältnis s aus den Kurvendiagrammen in **Fig. 3(a, b)** und **Fig. 4(a, b)** ausgewählt werden. Um das Biegeverhalten gleich demjenigen des Monolithen **100** (Angleichung des Biegeverhaltens) zu halten, wenden Sie das Kurvendiagramm von **Fig. 3(a)** und **Fig. 3(b)** an. Um die Bruchfestigkeit gleich derjenigen des Monolithen **100** (Angleichung des Belastungsverhaltens) zu halten, wenden Sie das Kurvendiagramm von **Fig. 4(a)** und **Fig. 4(b)** an.

[0062] Da die Dicken der Glasschichten **21** und **23** nicht gleich sind, hängt insbesondere die Belastung, bei der das Laminat **200** bricht, von der Richtung ab, aus der die Kraft aufgebracht wird. Entsprechend wird **Fig. 4(a)** für die Angleichung des Belastungsverhaltens angewandt, wenn die Last nur von der dickeren Glasseite des Laminats **200** aufgebracht wird. **Fig. 4(b)** wird angewandt, wenn die Last nur von der dünneren Glasseite aufgebracht wird. Wenn die Last von beiden Seiten des Laminats **200** aufgebracht wird, wenden Sie die Fläche über der „Unterscheidungslinie“ in **Fig. 4(a)** oder die Fläche unter der „Unterscheidungslinie“ in **Fig. 4(b)** an. Genauso wird für die Angleichung des Biegeverhaltens **Fig. 3(a)** angewandt, wenn die Last nur von der dickeren Glasseite des Laminats **200** aufgebracht wird. **Fig. 3(b)** wird angewandt, wenn die Last nur von der dünneren Glasseite aufgebracht wird. Wenn die Last von beiden Seiten des Laminats **200** aufgebracht wird, wenden Sie die Fläche über der „Unterscheidungslinie“ in **Fig. 3(a)** oder die Fläche unter der „Unterscheidungslinie“ in **Fig. 3(b)** an.

[0063] Die effektive Dicke der Kandidatenstrukturen kann nun berechnet werden, indem einige Kombinationen von h und t ausgewählt werden, die das aus dem entsprechenden Kurvendiagramm erhaltene Dickenverhältnis s (= t/h) erfüllen. Die effektive Dicke h_{ef} des Laminats **200** wird mithilfe der Gleichungen (5) und (6) bestimmt.

[0064] Für die Angleichung des Biegeverhaltens wenden Sie Gleichung (5) an.

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{a_1 ht^2 + a_2 h^2 t + a_3 h^3} \quad (5)$$

[0065] Für Berechnungen der maximalen Glasbiegebelastung wenden Sie Gleichung (6) an,

$$h_{ef;\sigma} = \sqrt{\frac{a_1 ht^2 + a_2 h^2 t + a_3 h^3}{a_4 t + a_5 h}} \quad (6)$$

wobei

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{12k}{k+1} \Gamma, & a_2 &= 12\Gamma k, & a_3 &= (1+k^3) + 3\Gamma(1+k) \\ a_4 &= \frac{2k}{k+1} \Gamma, & a_5 &= \Gamma k + 1, & a_6 &= k + 1 \end{aligned} \quad (7)$$

[0066] Alternativ können a_4 und a_5 aus Gleichung (7') berechnet werden:

$$a_4 = \frac{2}{k+1} \Gamma, \quad a_5 = \Gamma + k, \quad (7')$$

[0067] Gleichung (7) wird angewandt, wenn die Last nur von der dickeren Glasseite des Glases aufgebracht wird. Gleichung (7') wird angewandt, wenn die Last nur von der dünneren Glasseite aufgebracht wird. Wenn die Last von beiden Seiten des Laminats aufgebracht wird, wenden Sie Gleichung (7) an, wenn s in der oberen Fläche über der „Unterscheidungslinie“ angewandt wird, oder wenden Sie Gleichung (7') an, wenn s in der unteren Fläche unter der „Unterscheidungslinie“ in **Fig. 4(b)** angewandt wird.

[0068] In einem alternativen Ansatz kann die angestrebte effektive Dicke h_{ef} dazu dienen, mithilfe der Gleichungen (5) und (6) die genaue Dicke der Außenschicht h zu berechnen, die notwendig ist, um die Soll-Stei-
 figkeit zu erreichen.

$$h = \frac{h_{ef;w}}{\sqrt[3]{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}} \quad (5')$$

$$h = h_{ef;\sigma} \sqrt{\frac{a_4 s + a_5}{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}} \quad (6')$$

[0069] Schließlich wird eine Struktur für das Laminat **200** ausgewählt, dessen effektive Dicke gleich oder größer als diejenige des angestrebten Glasmonolithen ist. Die Dicke t der Zwischenschicht kann aus der Beziehung $t = sh$ berechnet werden. Signifikanterweise sind jedoch h und t , die in diesem Ansatz bestimmt werden, im Hinblick auf kommerzielle Verfügbarkeit nicht unbedingt gangbar. Deshalb kann eine praktikable Konstruktionsstrategie es erforderlich machen, dass die Schichtdicken h und t durch einen iterativen Prozess bestimmt oder in sonstiger Weise feinabgestimmt werden.

[0070] Ferner wird hier ein Verfahren zur Entwicklung einer leichten Laminats **200** bereitgestellt, bei dem die Außenschichten **21** und **23** Dicken aufweisen, die durch das Verhältnis $k = 2$ miteinander in Zusammenhang stehen. Ohne zu wünschen, dies theoretisch nachweisen zu müssen, wird davon ausgegangen, dass 2 nahe am maximalen Dickenverhältnis k liegt, das bei laminiertem Glas praktikabel ist. Zuerst wird der Scherungsübertragungskoeffizient Γ mithilfe der Gleichung (4) berechnet, und zwar unter derselben Maßgabe, die in Bezug auf das angewandte Verfahren bei $k = 1,5$ dargelegt wurde.

[0071] Sobald der Wert Γ bestimmt ist, kann eine gewünschte Gewichtsreduktion anhand der Konstruktionskriterien ausgewählt werden. Mithilfe des Scherungsübertragungskoeffizienten Γ , der durch Gleichung (4) berechnet wird, und des angestrebten Prozentsatzes der Gewichtsreduktion kann ein Wert für das Dickenverhältnis s aus den Kurvendiagrammen in

[0072] Fig. 5(a, b) und Fig. 6(a, b) ausgewählt werden. Um das Biegeverhalten gleich demjenigen des Monolithen **100** (Biegeabgleich) zu halten, wenden Sie die Kurvendiagramme von Fig. 5(a) und Fig. 5(b) an. Um die Bruchfestigkeit gleich derjenigen des Monolithen **100** (Angleichung des Belastungsverhaltens) zu halten, wenden Sie die Kurvendiagramme von Fig. 6(a) und Fig. 6(b) an.

[0073] Da die Dicken der Glasschichten **21** und **23** nicht gleich sind, hängt insbesondere die Belastung, bei der das Laminat **200** bricht, von der Richtung ab, aus der die Kraft aufgebracht wird. Entsprechend wird Fig. 6(a) für die Angleichung des Belastungsverhaltens angewandt, wenn die Last nur von der dickeren Glasseite des Laminats **200** aufgebracht wird. Fig. 6(b) wird angewandt, wenn die Last nur von der dünneren Glasseite aufgebracht wird. Wenn die Last von beiden Seiten des Laminats **200** aufgebracht wird, wenden Sie die Fläche über der „Unterscheidungslinie“ in Fig. 6(a) oder die Fläche unter der „Unterscheidungslinie“ in Fig. 6(b) an. Genauso wird für die Angleichung des Biegeverhaltens Fig. 5(a) angewandt, wenn die Last nur von der dickeren Glasseite des Laminats **200** aufgebracht wird. Fig. 5(b) wird angewandt, wenn die Last nur von der dünneren Glasseite aufgebracht wird. Wenn die Last von beiden Seiten des Laminats **200** aufgebracht wird, wenden Sie die Fläche über der „Unterscheidungslinie“ in Fig. 5(a) oder die Fläche unter der „Unterscheidungslinie“ in Fig. 5(b) an.

[0074] Wie im Fall oben, in dem $k = 1,5$ ist, wird die effektive Dicke h_{ef} aus den Gleichungen (5), (6), (7) und (7') berechnet und einige Kombinationen von h und t , die das Dickenverhältnis $s (= t/h)$ erfüllen, werden aus dem entsprechenden Kurvendiagramm gewonnen. Gleichung (7) wird zu Grunde gelegt, wenn die Last nur von einer Seite des Laminats **200** aufgebracht wird, bei dem die Glasschicht **21** oder **23** die dickere Schicht ist, und Gleichung (7') wird zu Grunde gelegt, wenn die Last nur von der Seite aufgebracht wird, an der die Glasschicht **21** oder **23** die dünnere Schicht ist. Wenn die Last von beiden Seiten des Laminats **200** aufgebracht wird, gilt Gleichung (7), wenn s in der oberen Fläche über der „Unterscheidungslinie“ angewandt wird, oder wenden Sie Gleichung (7') an, wenn s in der Fläche unter der „Unterscheidungslinie“ in Fig. 6(b) angewandt wird.

[0075] In einem alternativen Ansatz kann die angestrebte effektive Dicke h_{ef} dazu dienen, mithilfe der Gleichungen (5') oder (6') die genaue Dicke der Außenschicht h zu berechnen, die notwendig ist, um die Soll-StEIFigkeit zu erreichen. Schließlich wird eine Struktur für das Laminat **200** ausgewählt, dessen effektive Dicke gleich oder größer als diejenige des angestrebten Glasmonolithen ist. Dieselben oben dargelegten Maßgaben in Bezug auf kleinere Werte von k gelten auch in diesem Fall.

[0076] Ferner wird hier ein Verfahren zum Erzeugen eines Kurvendiagramms von s in Bezug auf Γ für verschiedene Werte von k bereitgestellt. Wenn die Biegefestigkeit des Laminats **200** mit derjenigen des Monoliths

100 abgeglichen wird, erfüllen die Kurven für eine Gewichtsreduktion von $100(1 - W)\%$ auf einem Kurvendia-gramm von s in Bezug auf Γ Gleichung 8:

$$\rho_r^2 s^3 + (3\rho_r^2 a_4 - a_1 W^3) s^2 + (3\rho_r a_4^2 - a_2 W^3) s + a_4^3 - a_3 W^3 = 0 \quad (8)$$

[0077] Für den Abgleich des Belastungsverhaltens trifft Gleichung (9) zu:

$$\rho_r^2 a_4 s^3 + (2\rho_r a_6 a_4 + \rho_r^2 a_5 - 2a_1 W^2) s^2 + (2\rho_r a_6 a_5 + \rho_r^2 a_5 + a_6^2 a_4 - a_2 W^2) s + a_6^2 a_5 - a_3 W^2 = 0 \quad (9)$$

[0078] In den Gleichungen (8) und (9) werden a_1 bis a_6 mithilfe von Gleichung (7) oben berechnet. Das Verhältnis der Dichte der Zwischenschicht zur Dichte des Materials der Außenschicht, ρ_r^2 , d. h. (Dichte der polymeren Schicht)/(Dichte des Glases), beträgt normalerweise $(0,95 \text{ g/cm}^3)/(2,5 \text{ g/cm}^3) = 0,38$.

[0079] Wenn die Biegefestigkeit des Laminats **200** an die des Monolithen **100** angeglichen wird, sind die Kurven, die die maximal erreichbare Gewichtsreduktion angeben, in **Fig. 2** bis **Fig. 6(b)** als durchgezogene schwarze Linien gezeigt. Diese Kurven erfüllen Gleichung 10.

$$s = -\left(\frac{a_2}{a_1} - \frac{a_6}{\rho_r}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{a_2}{a_1} - \frac{a_6}{\rho_r}\right)^2 - 3\frac{a_3}{a_1} + \frac{a_2 a_6}{a_1 \rho_r}} \quad (10)$$

[0080] Für die Angleichung des Belastungsverhaltens trifft Gleichung (11) zu:

$$s^3 + 2\left(\frac{a_2}{a_1} - \frac{1}{\rho_r}\right) s^2 + \left(\frac{a_2 a_5}{a_1 a_4} + 3\frac{a_3}{a_1} - 4\frac{a_5}{a_4 \rho_r}\right) s + 2\left\{\frac{a_3 a_5}{a_1 a_4} + \frac{1}{\rho_r}\left(\frac{a_3}{a_1} - \frac{a_2 a_5}{a_1 a_4}\right)\right\} = 0 \quad (11)$$

[0081] Die Unterscheidungslinie bei der Angleichung des Belastungsverhaltens wird durch Gleichung 12 erzeugt.

$$\Gamma = \left(\frac{2s}{k+1} + 1\right)^{-1} \quad (12)$$

[0082] Unter dieser Unterscheidungslinie sollten die Werte von a_4 und $a_5 a_4$ and a_5 , abgeleitet aus Gleichung (7'), angewandt werden.

[0083] Ferner werden hier die Artikel bereitgestellt, die die Lamine **200** umfassen, die mit den hier bereitgestellten Verfahren konstruiert wurden. Die Artikel sind unter anderem Gebäude; sonstige architektonische Strukturen; Gebäudeplatten; sonstige Komponenten architektonischer Strukturen; Lagertanks; Fahrzeuge wie Schiffe, Züge, Flugzeuge, Automobile und Lastkraftwagen und Komponenten der Fahrzeuge wie beispielsweise Türplatten; und Glaslamine zur Verwendung bei Windschutzscheiben, architektonischem Sicherheitsglas, Photovoltaikmodulen und Strukturglas, ohne darauf beschränkt zu sein. Kleinere Gegenstände wie etwa Gehäuse für Computeranlagen und Haushaltsgeräte wie etwa Mikrowellenherde können Lamine der Erfindung umfassen. Auch bereitgestellt werden Handgegenstände wie etwa Smartphones und Tabletcomputer, bei denen die Lamine Touchscreens oder sonstige Komponenten sein können, wie etwa Gehäuse oder Leiterplatten.

[0084] Die folgenden Beispiele werden bereitgestellt, um die Erfindung detaillierter zu beschreiben. Diese Beispiele, die einen bevorzugten Modus darlegen, der gegenwärtig zur Durchführung der Erfindung betrachtet wird, sollen die Erfindung veranschaulichen und nicht einschränken.

BEISPIELE

[0085] Stimmigkeit der Theorie mit den Experimenten: Es wurden in Tabelle 1 gezeigte Prüflinge von Glaslaminaten vorbereitet. Für die Glaslagen wurde Kalknatron-Floatglas verwendet und als Zwischenschicht wurde SentryGlas® von DuPont™ verwendet. Eine Vier-Punkt-Biegeprüfung (**Fig. 8**) wurde mit einer allgemeinen universellen Prüfmaschine (Instron 5965) durchgeführt. Die Biegung wurde durch einen linearen variablen Differenzialtransformator (LVDT) (Instron 2601-093) gemessen und die Belastung wurde durch Dehnungsmessstreifen (Kyowa) in der Mitte der Probe am Boden der unteren Glasfläche gemessen. Die maximale Hauptbelastung wurde durch die Rosette-Analyse berechnet. Die Geschwindigkeit des Lastarms beträgt 1 mm/min.

[0086] Der vergleichbare Prozentsatz der Gewichtsreduktion wurde durch die Gleichungen oben aus dem Dickenverhältnis s und dem Scherungsübertragungskoeffizienten Γ berechnet. Für den Schermodul von SentryGlas® wurden 200 MPa (24°C, 1 s Lastdauer) zur Berechnung angewandt.

[0087] Der Scherungsübertragungskoeffizient s und die Prozentsätze der Gewichtsreduktion der Lamine Nr. 1 und 5 in der Tabelle 1 fallen in den Bereich von **Fig. 1** und **Fig. 2**, was die Stimmigkeit der hier vorgestellten Methodik mit den Ergebnissen der realen Experimente zeigt.

Tabelle 1: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den berechneten Ergebnissen

Nr.	Glasdicke einer Glaslage	Dicke der Zwischenschicht	s	Scherungsübertragungskoeffizient	Effektive Dicke (Experiment)		Prozentsatz der Gewichtsreduktion (%) (Experiment)	
					Biegung	Belastung	Biegung	Belastung
1	0,55	0,97	1,76	0,98	1,95	1,90	24,7	22,6
2	0,55	2,53	4,60	0,95	3,14	2,99	34,4	31,1
3	0,55	4,31	7,84	0,91	4,19	3,73	34,7	26,5
4	1,10	1,75	1,59	0,93	3,73	3,71	23,2	22,9
5	1,10	3,55	3,23	0,86	5,08	4,95	30,1	28,3
6	1,10	6,20	5,63	0,78	6,51	6,46	30,0	29,5

ANWENDUNGSBEISPIEL: ERSATZ EINES 4 MM DICKEN MONOLITHISCHEN GLASES DURCH EIN GLASLAMINAT MIT 25% GEWICHTSREDUKTION

[0088] Hier nehmen wir einen Ersatz eines 4 mm dicken monolithischen Glases durch ein leichteres Glaslaminat an, wodurch sich das Gewicht um ca. 25% reduziert. Weitere Annahmen sind unter anderem:

- Die Größe des Monolithen und Laminats beträgt 1000 mm.
- Das Laminatglas sollte gleichwertige Eigenschaften der Belastungsfestigkeit wie 4 mm dickes Glas aufweisen, d. h. Bedingungen der Angleichung des Belastungsverhaltens.
- Die Dicke der Glas-Außenschichten des Laminats sollte gleich sein ($k = 1$), so dass die Steifigkeit des Laminats gegenüber einer Belastung mit einer positiven und einer negativen Last konstant ist.
- Die Zwischenschicht ist SentryGlas® von DuPont und der Schermodul 200 MPa (24°C, 1 s Lastdauer) wird zur Berechnung angewandt.

[0089] Der Scherungskoeffizient wird berechnet. Obwohl er für die Glas- und Zwischenschichtdicke variiert, ist er in jedem Fall fast 1.

[0090] Aus **Fig. 2** können wir ermitteln, dass s mehr als 2 sein sollte, um mehr als 25% Gewichtsreduktion zu erzielen. Mögliche Strukturen werden in Nr. 1 bis 4 von Tabelle 1 gezeigt. Die Gewichtsreduktion gegenüber einem monolithischen Glas mit gleichwertiger Steifigkeit beträgt in jedem Fall ca. 26%. Von diesen hat Nr. 4 eine Steifigkeit, die annähernd dem 4 mm dicken monolithischen Glas entspricht.

[0091] Dann wird eine geringfügige Anpassung vorgenommen, um die effektive Dicke von 4 mm in realistischen Strukturen zu erreichen. Da 1,1 mm dünnes Glas kommerziell erhältlich ist und die Dicke der Zwischenschicht flexibel angepasst werden kann oder aus einer Vielzahl kommerzieller Angebote ausgewählt werden kann, wird 1,1 mm dickes Glas/2,1 mm dickes SentryGlas®/1,1 mm dickes Glas als beste Struktur ausgewählt. Ca. 25% Gewichtsreduktion gegenüber einem 4 mm dicken monolithischen Glas wird aus der folgenden Berechnung bestätigt.

[0092] Im alternativen Ansatz mithilfe der Gleichungen (2') und (3') werden h und t als $h = 1,05$, $t = 2,09$ berechnet. Hier wird Γ als ca. 1 angenommen. Eine konservative Konstruktionsstrategie ergibt die Struktur „1.1 mm dickes Glas/2,1 mm dickes SentryGlas®/1,1 mm dickes Glas.“

- Gewicht des 4 mm dicken monolithischen Glases: 10 kg/m²
- Gewicht des 1,1 mm dicken Glases/2,1 mm dicken SentryGlases®/1,1 mm dicken Glases: 7,50 kg/m²
- Gewichtsreduktion (gegenüber 4 mm dickem monolithischem Glas): 25,05%
- Gewichtsreduktion (gegenüber 4,04 mm dickem monolithischem Glas*): 27,0%

*Gleichwertiges monolithisches Glas zu dem Laminat aus „1,1 mm dicken Glas/2,1 mm dicken SentryGlas®/1,1 mm dickem Glas“ in Bezug auf die Belastungsfestigkeit.

Tabelle 2: Kandidatenstrukturen für Glaslaminat, das 4 mm dickes monolithisches Glas ersetzt.

Nr.	l: Größe (mm)	h: Glasdicke (mm)	k	G: Schermodul der Zwischenschicht (MPa)	t: Dicke der Zwischenschicht (mm)	Γ : Scherungsübertragungskoeffizient	h; ef; s: Effektive Dicke für Belastung (mm)	s = t/h	Gew. (kg/m ²)	Gewicht des monolithischen Glases mit derselben Steifigkeit (kg/m ²)	Gew.-Red. (%)
1	1000	0,3	1,0	200	0,6	1,000	1,12	2,00	2,07	2,81	26,2
2	1000	0,5	1,0	200	1,0	0,999	1,87	2,00	3,45	4,68	26,2
3	1000	0,7	1,0	200	1,4	0,998	2,62	2,00	4,83	6,55	26,2
4	1000	1,0	1,0	200	2,0	0,997	3,74	2,00	6,90	9,35	26,2
5	1000	1,1	1,0	200	2,1	0,996	4,04	2,20	7,50	10,1	27,0

[0093] Während bestimmte der bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung oben beschrieben und konkret beispielhaft dargestellt wurden, soll die Erfindung durch solche Ausführungsformen nicht eingeschränkt werden. Stattdessen ist es so zu verstehen, dass die Offenbarung, auch wenn zahlreiche Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung in der obigen Beschreibung zusammen mit Details der Struktur und der Funktion der Erfindung dargelegt wurden, nur veranschaulichend ist und Änderungen im Detail vor allem hinsichtlich der Form, Größe und Anordnung der Teile innerhalb der Erfindungsprinzipien vorgenommen werden können, die in vollem Umfang durch die breite allgemeinen Bedeutung der Ausdrücke, in denen die angehängten Ansprüche ausgedrückt sind, angegeben sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Konstruktion eines festen leichten Laminats, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- a. Auswählen eines Grundmaterials und einer Dicke eines Monolithen des Grundmaterials;
- b. Auswählen eines Zwischenschichtmaterials;
- c. Berechnen eines Scherungsübertragungskoeffizienten Γ eines Laminats mit der Struktur „Material/Zwischenschicht/Material“, wobei „Material“ eine Außenschicht des Grundmaterials darstellt und die beiden Außenschichten dieselbe Dicke aufweisen und wobei „Zwischenschicht“ eine Schicht des Zwischenschichtmaterials mit einer Dicke darstellt;
- d. Auswählen eines Prozentsatzes der Soll-Gewichtsreduktion und einer effektiven Soll-Dicke;
- e. Anwenden des Kurvendiagramms von **Fig. 1** zum Auswählen eines Verhältnisses der Dicke der Zwischenschicht zur Dicke der Außenschicht für ein Laminat mit demselben Biegeverhalten wie der Monolith;
- f. alternatives Anwenden des Kurvendiagramms von **Fig. 2** zum Auswählen eines Verhältnisses der Dicke der Zwischenschicht zur Dicke der Außenschicht für ein Laminat mit derselben Bruchfestigkeit wie der Monolith;
- g. Anwenden der Gleichungen 2' und 3' zum Berechnen der Dicke der Außenschichten und der Dicke der Zwischenschicht.

2. Verfahren zur Konstruktion eines festen leichten Laminats, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- a. Auswählen eines Grundmaterials und einer Dicke eines Monolithen des Grundmaterials;
- b. Auswählen eines Zwischenschichtmaterials;
- c. Berechnen eines Scherungsübertragungskoeffizienten Γ eines Laminats mit der Struktur „Material/Zwischenschicht/Material“, wobei „Material“ eine Außenschicht des Grundmaterials darstellt, wobei die beiden Außenschichten verschiedene Dicken aufweisen und das Verhältnis der beiden Dicken 1,5 beträgt und wobei „Zwischenschicht“ eine Schicht des Zwischenschichtmaterials mit einer Dicke darstellt;
- d. Auswählen eines Prozentsatzes der Soll-Gewichtsreduktion und einer effektiven Soll-Dicke;
- e. Anwenden des Kurvendiagramms von **Fig. 3** zum Auswählen eines Verhältnisses der Dicke der Zwischenschicht zur Dicke der Außenschicht für ein Laminat mit demselben Biegeverhalten wie der Monolith;

- f. alternativ für ein Laminat mit derselben Bruchfestigkeit wie der Monolith Anwenden des Kurvendiagramms von **Fig. 4(a)** für Kräfte, die auf die dickere Außenschicht ausgeübt werden, oder des Kurvendiagramms von **Fig. 4(b)** für Kräfte, die auf die dünnere Außenschicht ausgeübt werden, um ein Verhältnis der Dicke der Zwischenschicht zur Dicke der Außenschicht auszuwählen;
- g. Anwenden der Gleichungen 5' und 6' zum Berechnen der Dicke der Außenschichten und der Dicke der Zwischenschicht.

3. Verfahren zum Konstruieren eines festen leichten Laminats, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- a. Auswählen eines Grundmaterials und einer Dicke eines Monolithen des Grundmaterials;
- b. Auswählen eines Zwischenschichtmaterials;
- c. Berechnen eines Scherungsübertragungskoeffizienten Γ eines Laminats mit der Struktur „Material/Zwischenschicht/Material“, wobei „Material“ eine Außenschicht des Grundmaterials darstellt, wobei die beiden Außenschichten verschiedene Dicken aufweisen und das Verhältnis der beiden Dicken 2 beträgt und wobei „Zwischenschicht“ eine Schicht des Zwischenschichtmaterials mit einer Dicke darstellt;
- d. Auswählen eines Prozentsatzes der Soll-Gewichtsreduktion und einer effektiven Soll-Dicke;
- e. Anwenden des Kurvendiagramms von **Fig. 5** zum Auswählen eines Verhältnisses der Dicke der Zwischenschicht zur Dicke der Außenschicht für ein Laminat mit demselben Biegeverhalten wie der Monolith;
- f. alternativ für ein Laminat mit derselben Bruchfestigkeit wie der Monolith Anwenden des Kurvendiagramms von **Fig. 6(a)** für Kräfte, die auf die dickere Außenschicht aufgebracht werden, oder des Kurvendiagramms von **Fig. 6(b)** für Kräfte, die auf die dünnere Außenschicht aufgebracht werden, um ein Verhältnis der Dicke der Zwischenschicht zur Dicke der Außenschicht auszuwählen;
- g. Anwenden der Gleichungen 5' und 6' zum Berechnen der Dicke der Außenschichten und der Dicke der Zwischenschicht.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 unter Auslassung des Schrittes (g.) des Anwendens der Gleichungen 2' und 3' oder der Gleichungen 5' und 6' zum Berechnen der Dicke der Außenschichten und der Dicke der Zwischenschicht, und ferner umfassend die folgenden Schritte:

- h. Einstellen der Gesamtdicke des Laminats gleich der Dicke des Monolithen;
- i. Berechnen der relativen Dicken der Außenschichten und der Zwischenschicht basierend auf ihrem Verhältnis s , wie im relevanten Kurvendiagramm identifiziert;
- j. Berechnen der Dicken der Außenschichten basierend auf dem Verhältnis der beiden Dicken.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, ferner umfassend den Schritt des Anwendens von Gleichung (A) zum Auswählen der physikalischen Eigenschaften des Grundmaterials und des Zwischenschichtmaterials.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei das Grundmaterial ausgewählt wird aus einer Gruppe bestehend aus Glas; Metall; Keramik; Beton; Mineralien; Polymeren; Holz; Verbundstoffe aus Holz mit Polymeren; Stoff; und Verbundstoffe aus Mineralien und Polymeren.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Zwischenschichtmaterial ausgewählt wird aus einer Gruppe bestehend aus Glas; Metall; Keramik; Beton; Mineralien; Polymeren; Holz; Verbundstoffe aus Holz mit Polymeren; Stoff; und Verbundstoffe aus Mineralien und Polymeren.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Zwischenschichtmaterial ein Polymer mit einem Modul von 200 MPa bis 600 MPa oder ein Polymer ist, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Polycarbonaten; Polystyrolen; Silikonelastomeren; Epoxidharzen; Polystyrolen; Polyvinylchloriden; Polyurethanen; Polyethylen-Homopolymeren und Ethylen-Copolymeren mit anderen Alkenen; Polyolefin-Blockelastomeren; Ethylensäure-Copolymeren; Ionomeren von Ethylensäure-Copolymeren; Poly(vinylacetalen) und Ethylen-Copolymeren mit polaren Comonomeren.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Grundmaterial Glas ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei das Zwischenschichtmaterial ein Polymer ist, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Ethylensäure-Copolymeren, Ionomeren aus Ethylensäure-Copolymeren, Ethylen- und Vinylacetat-Copolymeren und Poly(vinylbutyralen).

11. Verfahren des Anwendens einer oder mehrerer Gleichungen (1) bis (12) zum Konstruieren eines festen leichten Laminats.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

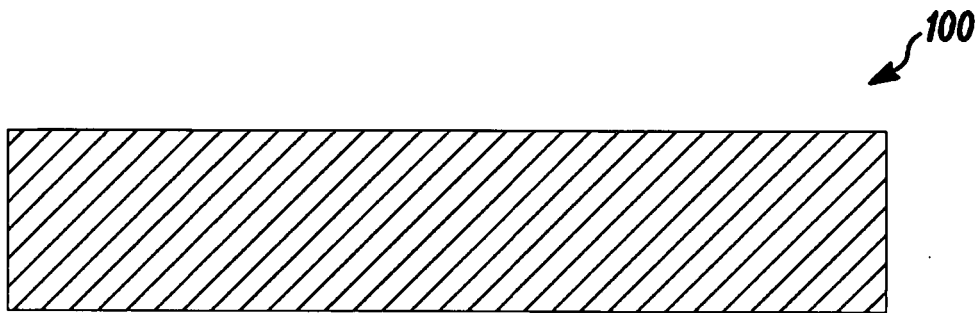


FIG. A

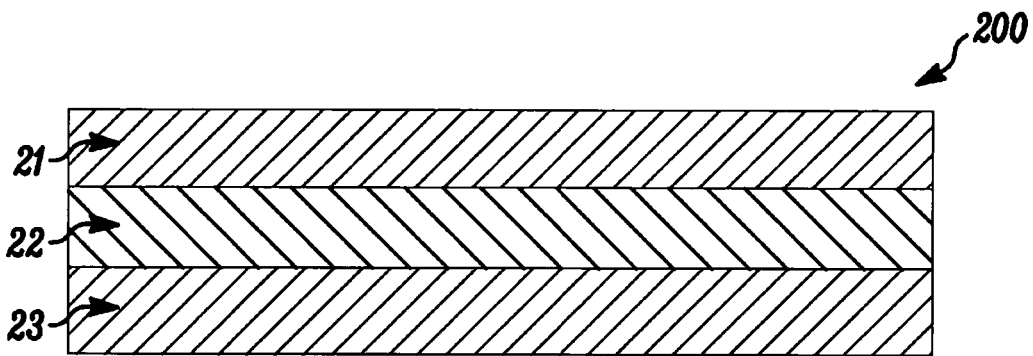


FIG. B

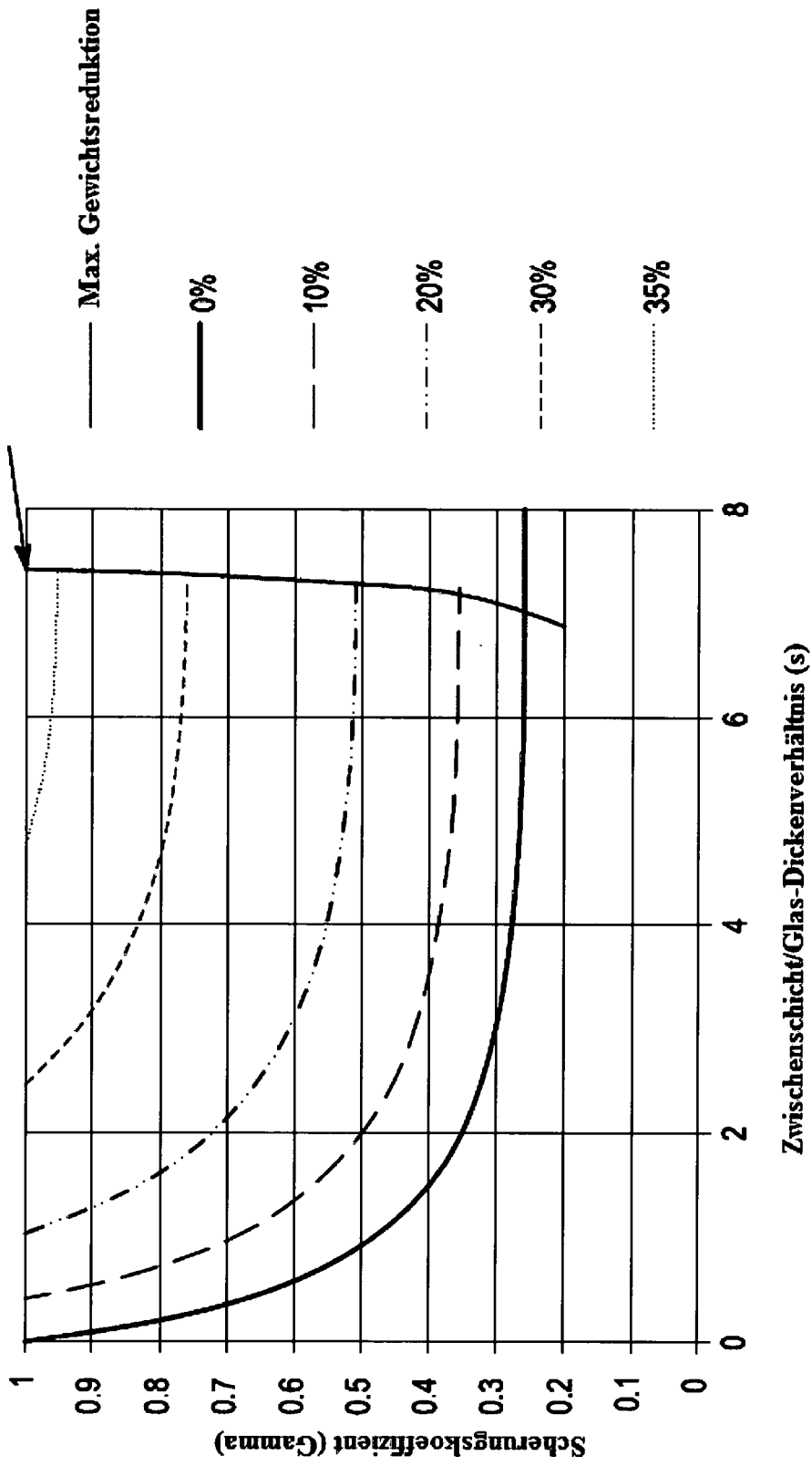


FIG. 1

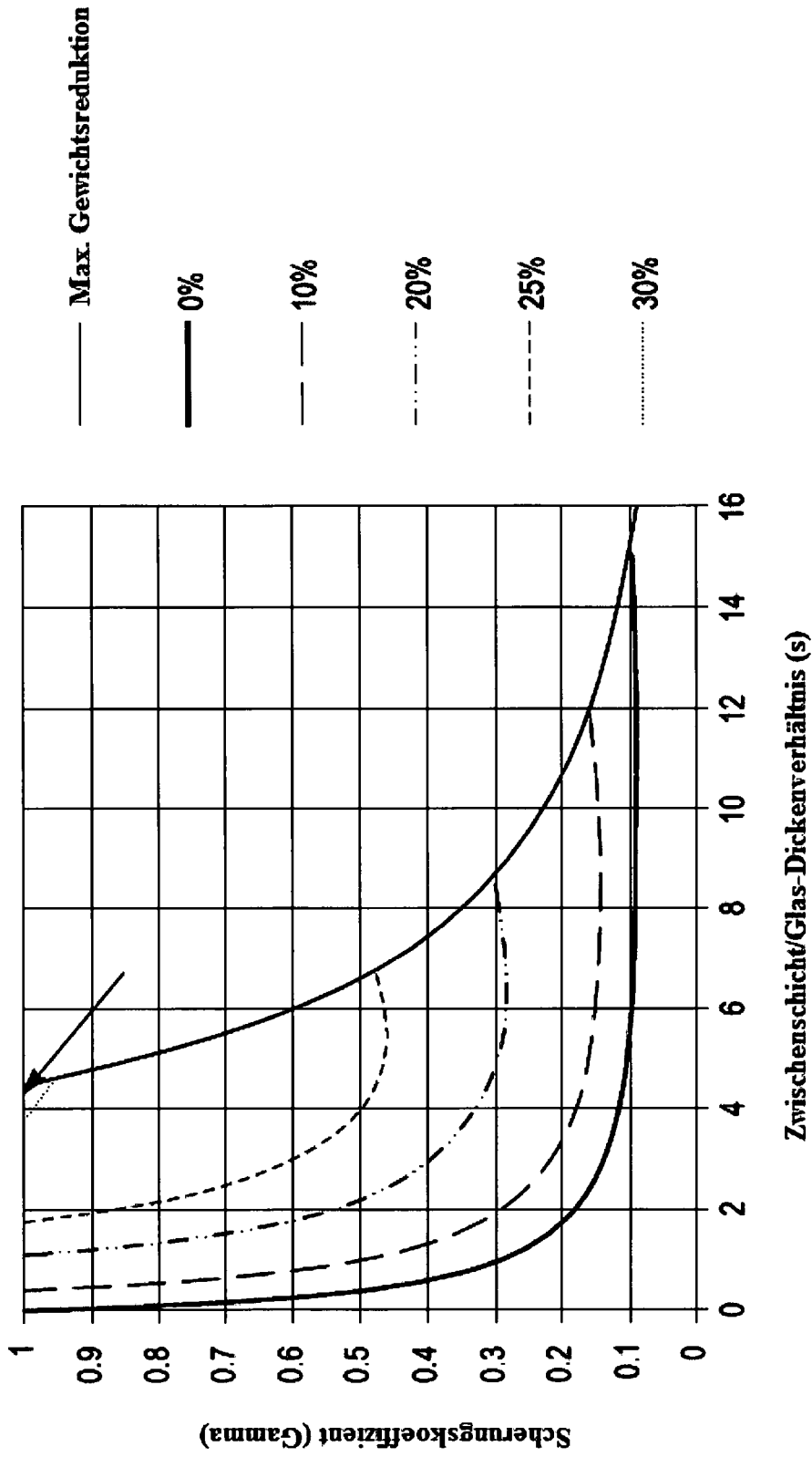


FIG. 2

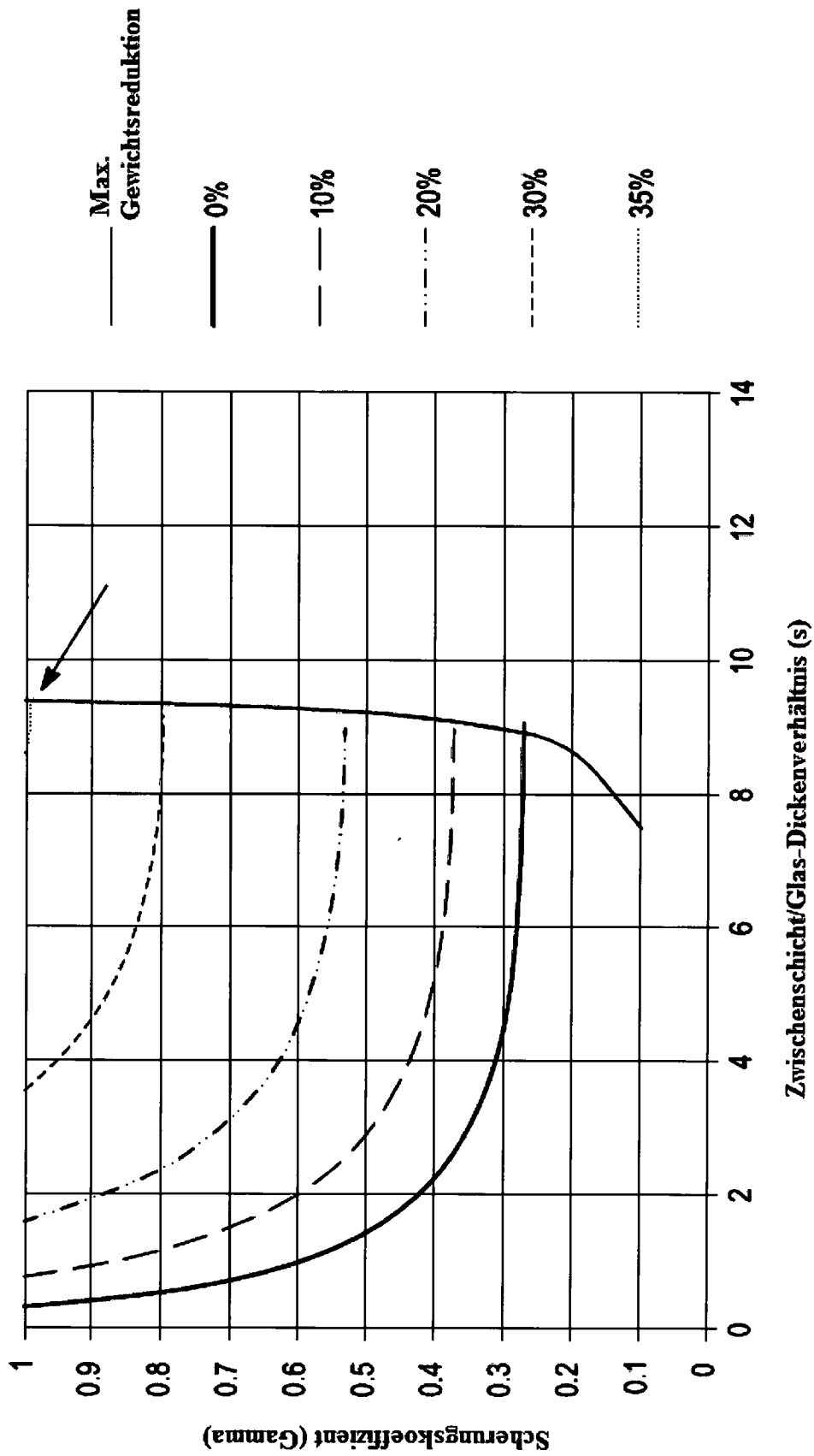


FIG. 3

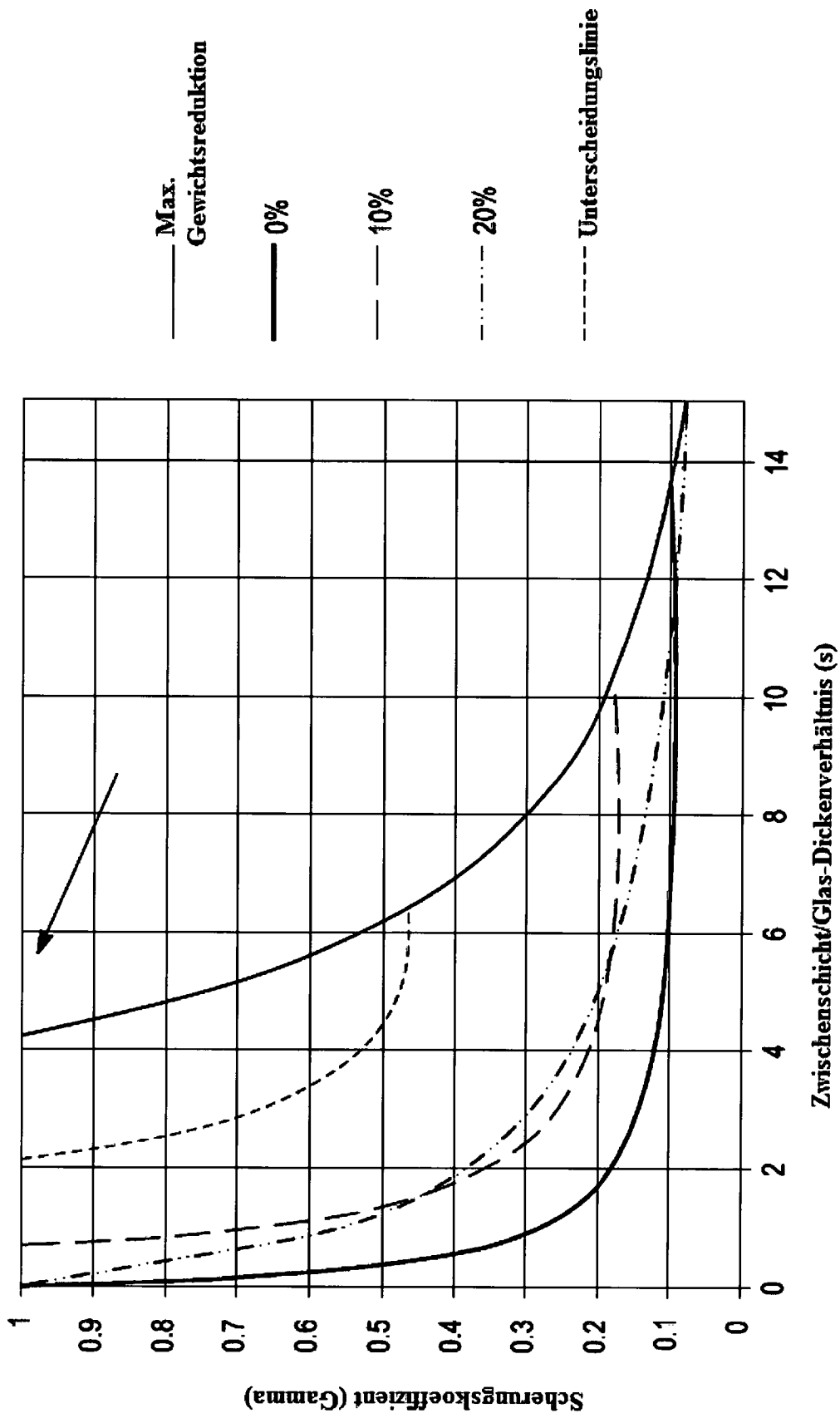


FIG. 4A

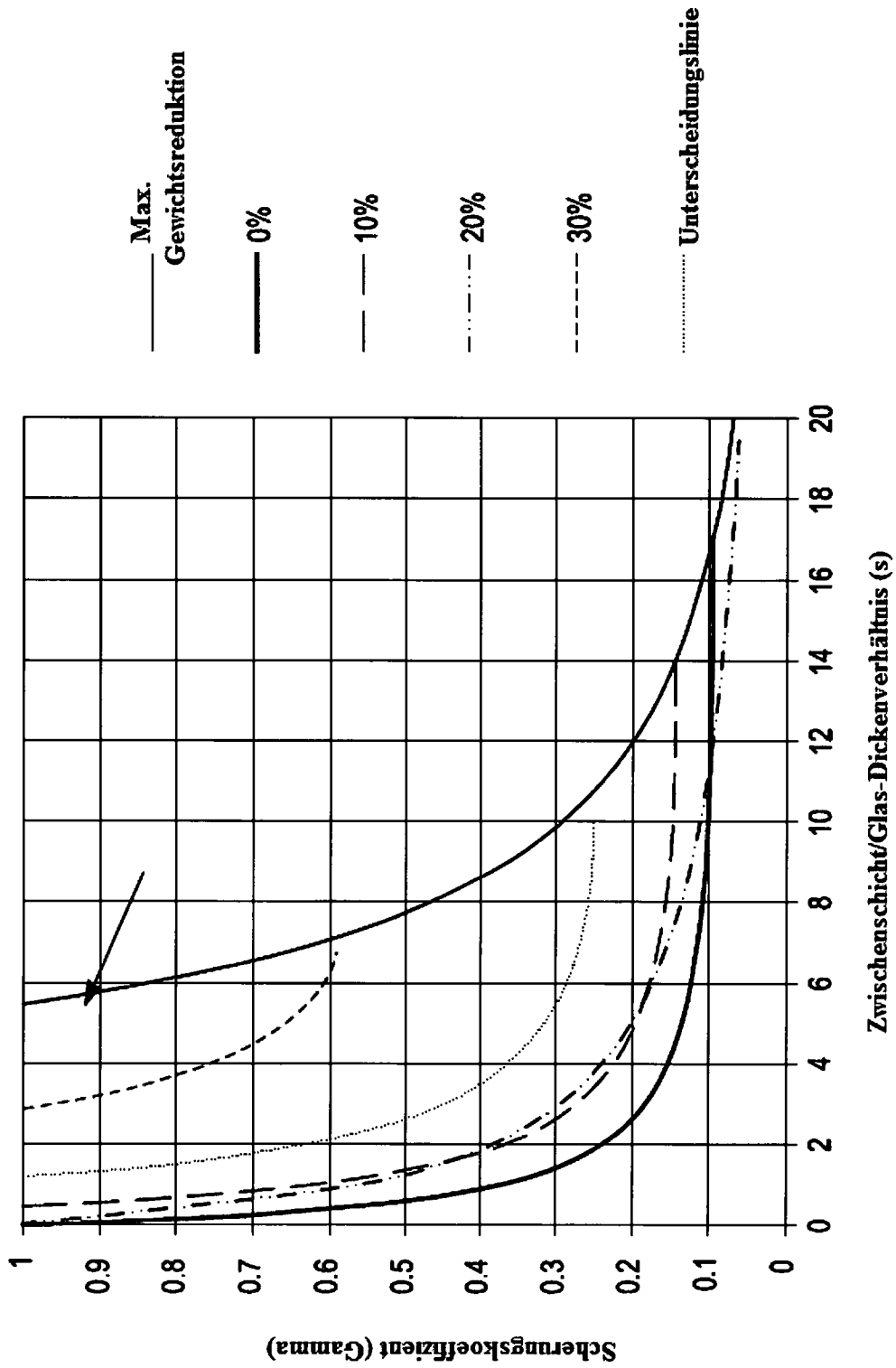
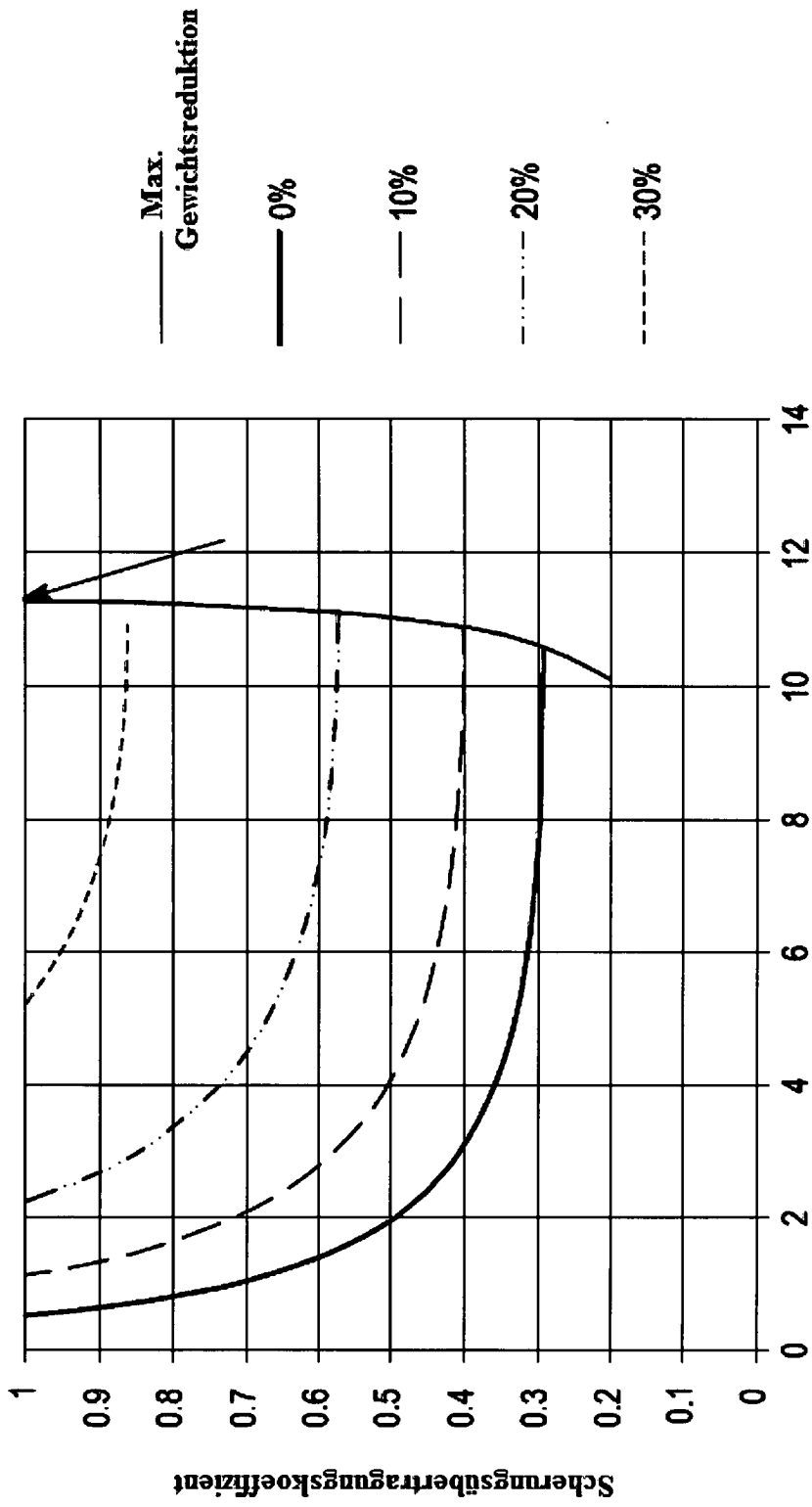


FIG. 4B



Zwischenschicht/Glas-Dickenverhältnis (s)

FIG. 5

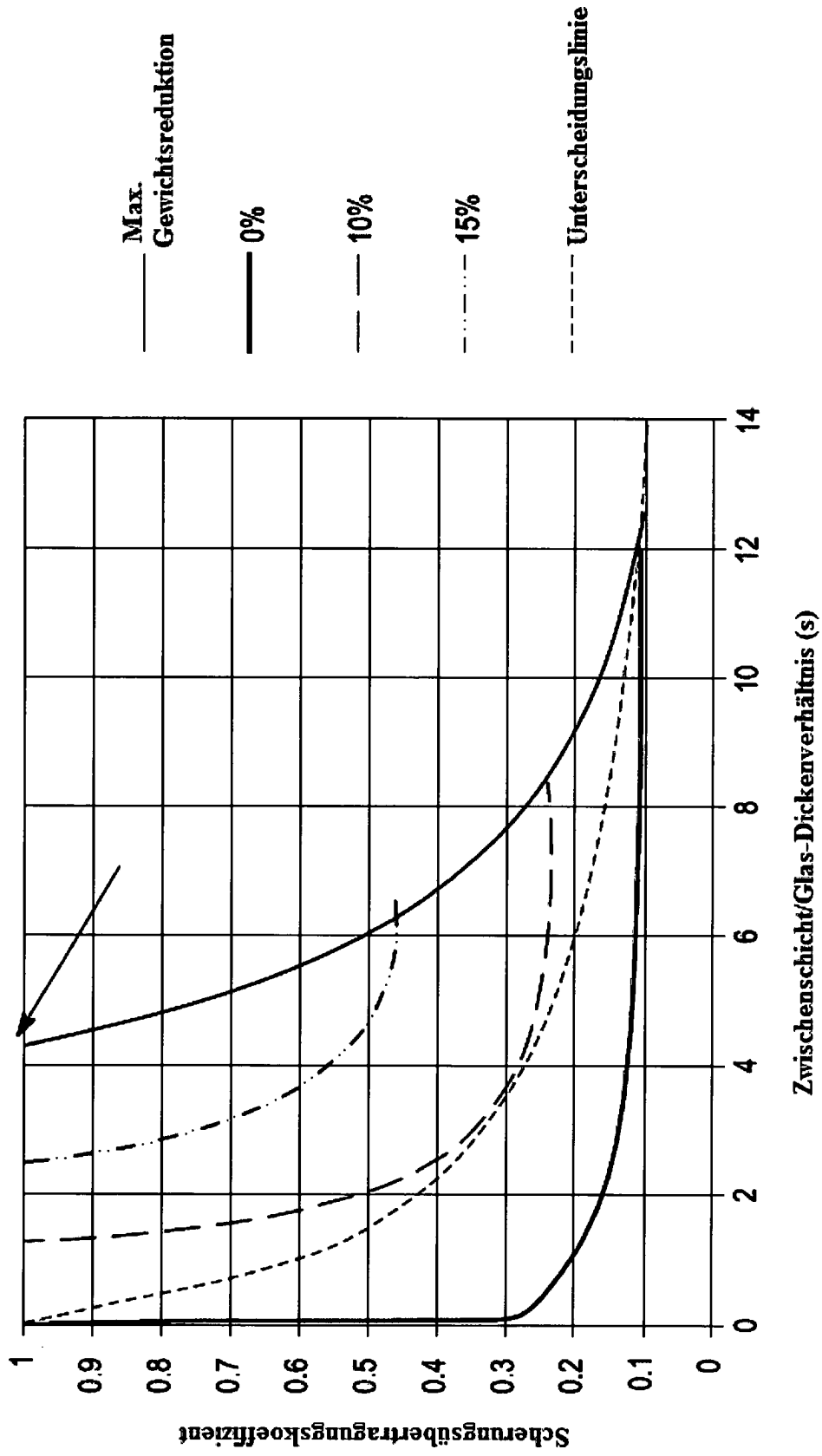


FIG. 6A

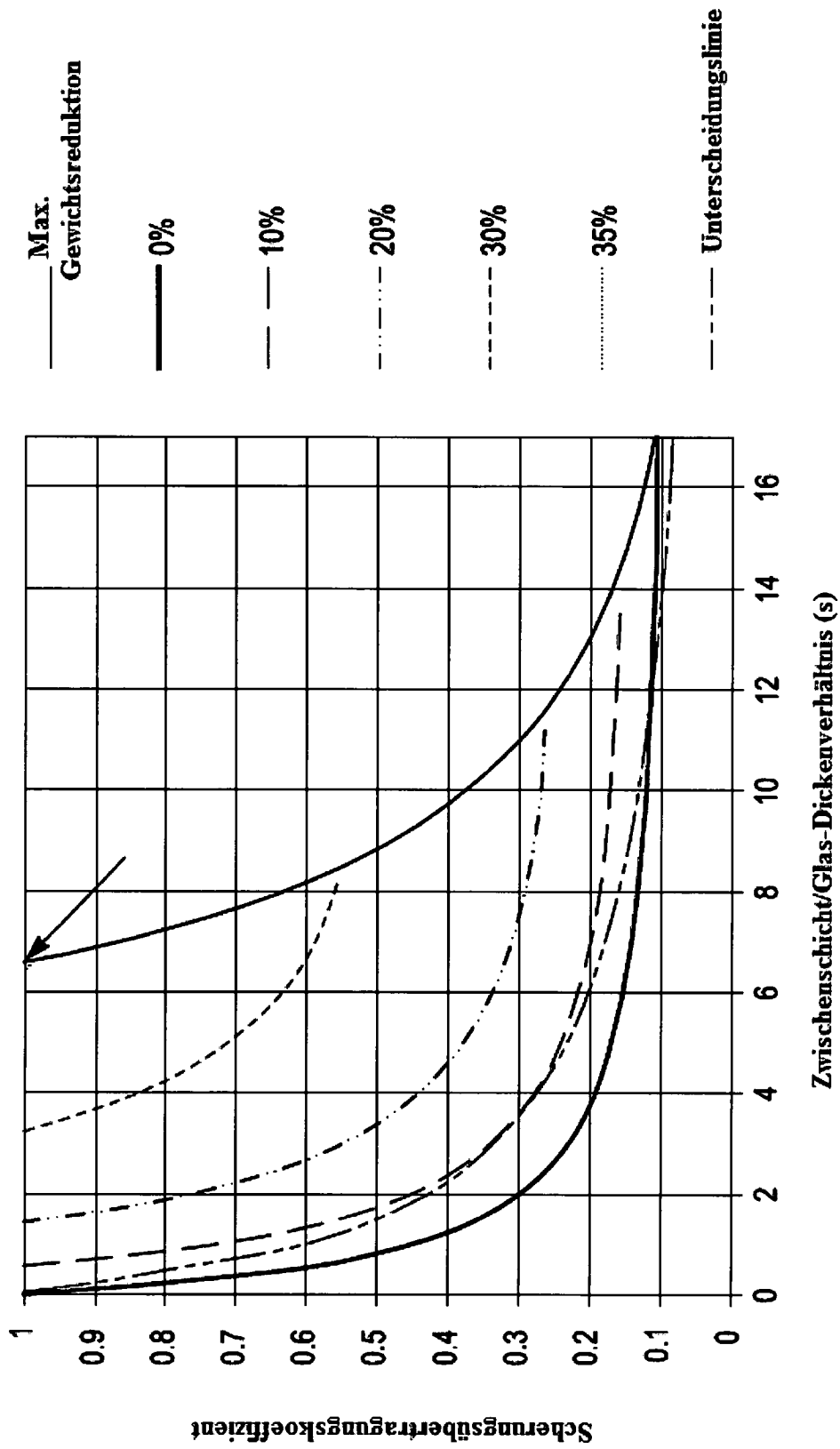


FIG. 6B

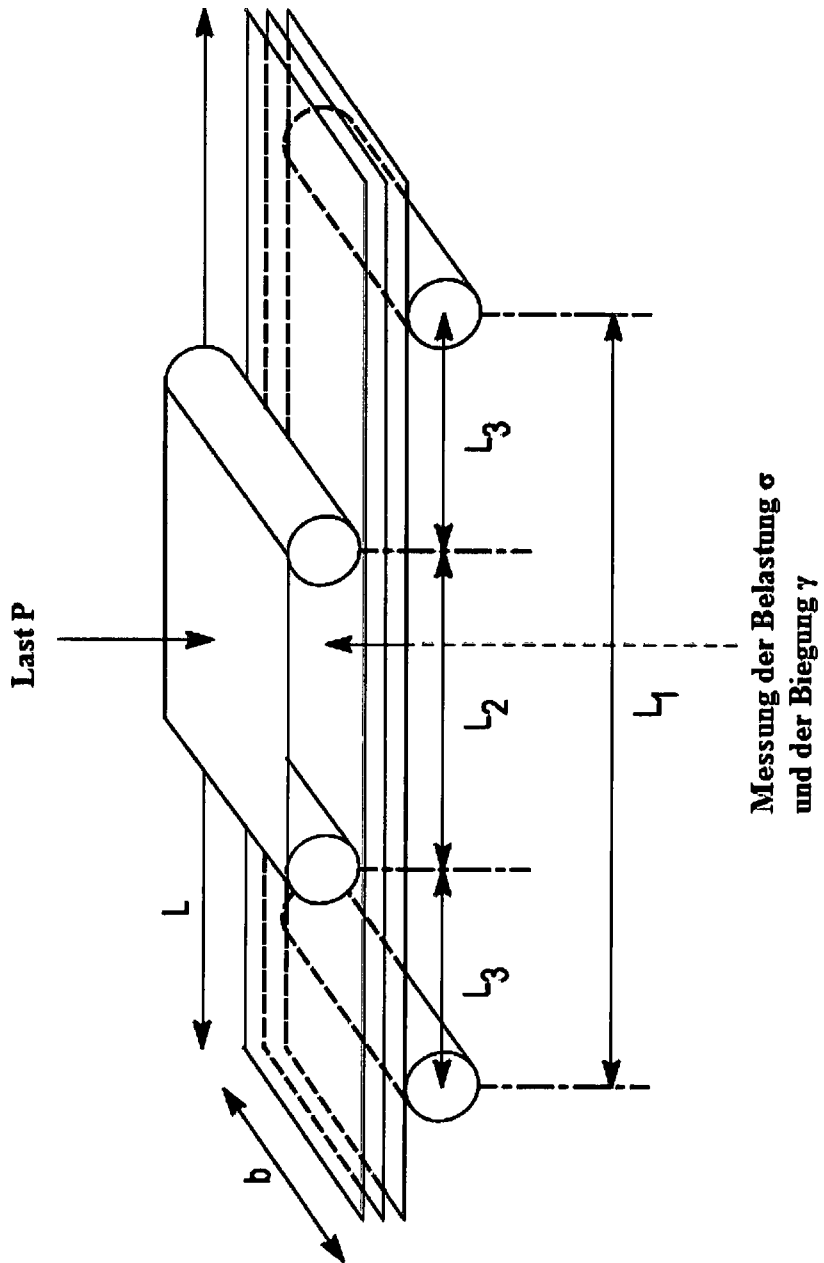


FIG. 7