

Manfred Rasche

Vorschlag für ein Dimensionierungsverfahren elastischer Klebverbindungen

1. Einleitung

Die derzeit bestehenden Berechnungsverfahren und Konstruktionsrichtlinien für Klebverbindungen sind auf die hochfeste Metallklebverbindung zugeschnitten. Ausgehend von Kurzzeitversuchen (Zugscher- oder Druckscherversuch) werden die Verbindungen gestaltet und dimensioniert. Diese Vorgehensweise wirft, wie noch zu zeigen ist, jedoch etliche Probleme auf, da die Ergebnisse nur beschränkt verwendbar sind.

2. Berechnung von Klebverbindungen

Die Berechnungsverfahren für Klebverbindungen bauen auf die Ergebnisse von Kurzzeitversuchen auf. Das gilt sowohl für Verfahren, die auf den Gestaltfaktor aufbauen, als auch für die Berechnung mit Abminderungsfaktoren. Im folgenden wird die Berechnung von Wellen-Naben-Verbindungen mit Abminderungsfaktoren /1/ gezeigt. Die Formel zur Ermittlung der maximal übertragbaren Kraft in Achsrichtung lautet:

$$F = A * \tau_D * f_{ges}$$

F = maximale Axialkraft
A = Klebfläche
 τ_D = Druckscherfestigkeit nach DIN 54 452
f_{ges} = Gesamtheit der Korrekturfaktoren
f_{des} = f₁ * f₂ * ... * f_n
f₁ = Art des geklebten Materials
f₂ = Klebspaltbreite
f₃ = Oberflächenrauigkeit
f₄ = Einsatztemperatur
f₅ = Einsatzmedium
f₆ = Passungseinfluß
f₇ = Belastungseinfluß
f₈ = Aushärtungseinfluß

Der Klebstoffkennwert in dieser Formel ist die im Druckscherversuch ermittelte Klebfestigkeit. Ein Korrekturfaktor berücksichtigt andere als nach DIN 54 452 vorgeschriebene Klebschichtdicken, doch werden im allgemeinen nur Klebschichten bis 0,25 mm beachtet /1/.

Die Berechnung mit Hilfe des Gestaltfaktors, die für Blechklebverbindungen publiziert worden ist /2/, geht von Klebstoffkennwerten aus, die im Zugscherversuch ermittelt wurden.

Zugscher- und Druckscherversuch sind Kurzzeitprüfverfahren mit quasistatischer Belastung (zügige Belastung bis zum Bruch) die zu kurzen Prüfzeiten (Belastungsdauer) im Sekundenbereich füh-

ren. Bei beiden Prüfverfahren werden hohe Klebfestigkeiten mit dünnen Klebschichten von 0,05 bis 0,2 mm Dicke erzielt, Bild 1 und Bild 2. Damit sind diese dünneren Klebschichten in jeder Berechnung enthalten.

2. Das Kleben unterschiedlicher Werkstoffe

Beim Kleben werden häufig unterschiedliche Werkstoffschlüssig miteinander verbunden. Hier liegt der große Vorteil der Klebtechnik, auf den immer wieder hingewiesen wird. Klebverbindungen aus unterschiedlichen Werkstoffen weisen jedoch besondere Problematiken auf, die meistens nicht erwähnt werden. Diese Klebverbindungen verhalten sich teilweise anders als solche aus gleichartigen Werkstoffen, was es bei der Konstruktion und Dimensionierung zu berücksichtigen gilt.

Unterschiedliche Werkstoffe haben im Allgemeinen unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten. Unterliegt eine Klebverbindung aus Werkstoffen mit unterschiedlicher thermischer Ausdehnung einem Temperaturwechsel, beispielsweise beim Warmabbinden oder während des Betriebs, so kommt es zu unterschiedlichen Dehnungen der Teile. Diese führen zu Spannungen in der Klebfuge. Es ist zu beachten, daß Wärmedehnungen nicht verhindert werden können. Sie lassen sich allenfalls kanalisieren.

3. Einmalige Wärmebelastung

Die Auswirkung einer einmaligen Wärmebelastung auf eine Klebverbindungen aus unterschiedlichen Werkstoffen zeigt Bild 3.

Eine Kunststoff-Metall-Klebverbindung wurde aus Polyoxymetylen (POM) 4 mm dick, 112 mm lang und 25 mm breit und amorphen Metall hergestellt. Das amorphe Metall hatte eine Dicke von 25 µm und wurde vollflächig auf das Kunststoffteil geklebt. Als Klebstoff ist der relativ verformungsfähige Epoxidharzklebstoff ARALDIT AW 106 mit Härter HV 953 U verwendet worden, Mischungsverhältnis 100 : 80; Abbindebedingungen: 130 °C, 20 min. Nach Beendigung des Aushärtvorgangs und Abkühlung auf Raumtemperatur hatten sich die Teile, wie Bild 3 zeigt, stark verformt. Die Verformungen sind auf die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe zurückzuführen. Sie liegen für POM bei $90 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und für amorphes Metall bei $12,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Die durch das Kleben entstandene feste stoffschlüssige Verbindung des Kunststoffes mit dem amorphen Metall führt dazu, daß am Gesamtteil der bekannte Bimetalleffekt auftritt. Die starke Verformung des immerhin 4 mm dicken Kunststoffteiles zeigt, daß doch beträchtliche Spannungen auftreten.

In der Mikroelektronik wurde beim Kleben von Siliciumchips auf Träger aufgrund der Wärmespannungen Brüche in den Chips beobachtet, Bild 4.

Wärmespannungen können in Klebverbindungen aus unterschiedlichen Werkstoffen folgende Auswirkung haben:

- 1.) Wenn beide Fügeteile entsprechend verformungsfähig sind, verbiegen sie sich, es kommt zum dem bekannten Bimetalleffekt, Bild 3.
- 2.) Hat eines der Fügeteile nur eine geringe Festigkeit, bricht dieses, sobald die auftretenden Thermospannungen zu groß sind, Bild 4.
- 3.) Sind beide Teile steif, können durch Verschiebung in der Klebfuge die Spannungen ausgeglichen werden, wenn das Verformungsvermögen des Klebstoff dies zuläßt; es kommt zu keinem Bruch.
- 4.) Es kommt zum Bruch in der Klebschicht, wenn beide Fügeteile massiv sind und die Fuge wegen mangelnder Verformbarkeit nicht in der Lage ist, die auftretenden Dehnungswege auszugleichen.
- 5.) Wenn eine sehr verformungsfähige Deckschicht fest auf ein massives Fügeteil geklebt ist, wie dies beim Kaschieren der Fall ist, wird die Wärmedehnung im Klebbereich unterdrückt. Die Dehnung erfolgt nur in der unbehinderten Dickenrichtung der Deckschicht.
- 6.) Die Wärmespannungen addieren sich zu den von außen kommenden mechanischen Lasten und stellen somit an die Adhäsion der Verbindungen erhöhte Forderungen, was zu einem Versagen im Adhäsionsbereich führen kann.

Der Fall 5 kommt nur bei Kaschierungen etc. vor und braucht hier weiter nicht beachtet werden. Da im allgemeinen eine Verformung der Fügeteile nicht zugelassen werden kann und ein Bruch in der Klebschicht, im Fügeteil oder im Adhäsionsbereich die Verbindung zerstört, müssen die Klebverbindungen so ausgelegt werden, daß die Fuge in der Lage ist, die Wärmespannungen auszugleichen, Fall 3. Dazu braucht sie eine gewisse Verformbarkeit.

Es werden also nicht nur Klebverbindungen mit einer möglichst hohen Klebfestigkeit benötigt sondern auch solche, bei denen eine gewisse Verformbarkeit der Klebschicht für den Erfolg oder Mißerfolg verantwortlich ist. Das sind die sogenannten flexiblen Klebverbindungen denen bisher wenig Beachtung geschenkt wurde, die jedoch häufig vorkommen. Auf diese Verbindungen können die Konstruktions- und Dimensionierungsregeln für hochfeste Klebverbindungen nicht angewendet werden.

Der Verformbarkeit des Klebstoffes oder der Klebschicht wird bisher bei der Konstruktion und bei der Berechnung der Verbindungen nur wenig Beachtung geschenkt. Bruchverformungen oder ähnliche sich auf die Verformbarkeit der Klebschicht beziehenden Kenndaten finden in Veröffentlichungen über Ergebnisse von Klebversuchen keine Berücksichtigung. Gleiches gilt für die Charakterisierung der Klebstoffe. Auch hier werden le-

diglich die nach Norm ermittelten Klebfestigkeiten angeführt, die keinerlei Aussagen über die Verformbarkeit des Klebstoffes zuläßt. Zusätzliche Meßdaten zur Verformbarkeit sind nicht angegeben. Allenfalls findet man Angaben wie "flexible, halb-harte, spröde Klebschicht" oder ähnliche Bezeichnungen. Hierbei handelt es sich um subjektive Angaben, die nur schwer vergleichbar sind.

4. Beispiel: Eingeklebte Frontscheibe eines PKW

An einer thermisch belasteten Klebverbindung aus unterschiedlichen Werkstoffen sollen Problematik und Lösungsmöglichkeiten für flexible Klebverbindungen aufgezeigt werden. Daneben gibt es noch weitere Anwendungsfälle, wo an die Flexibilität von Klebverbindungen besondere Anforderungen gestellt werden. Am Beispiel der eingeklebten Frontscheibe eines PKW werden im folgenden die Überlegungen weitergeführt.

Die Frontscheiben von Kraftfahrzeugen werden heute in der Regel eingeklebt. Stahl und Glas haben unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten. Der Ausdehnungskoeffizient beträgt:

$$\begin{array}{l} \text{für Stahl } 11,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \\ \text{für Glas } \frac{8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}}{3,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}} \end{array}$$

ist die Differenz der Wärmedehnung der beiden Stoffe, die sich in Wärmespannungen auswirkt.

Es soll die Wärmebewegung in Breitenrichtung der Scheibe betrachtet werden, da hier die Scheibe die größte Länge aufweist. Damit treten in dieser Richtung auch die größten Bewegungen auf. Es kann nicht davon ausgegangen werden, daß die Wärmedehnung immer symmetrisch erfolgt, sondern im ungünstigsten Falle muß damit gerechnet werden, daß die Wärmedehnung nur in einer Richtung erfolgt. Ursache hierfür gibt es mehrere. Die Scheibe ist an einer Seite, aus welchen Gründen auch immer, verklemmt, liegt am Rahmen an oder hat einseitig eine dünne Klebschicht, was hier die Verformbarkeit erschwert, wie noch gezeigt wird. Die Wärmedehnung kann also nur in einer Richtung erfolgen. Damit ergibt sich eine Dehnlänge von 1400 mm. Das entspricht der Scheibenbreite.

Beim Klimawechseltest der Direktverglasung wird ein Temperaturwechsel zwischen $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ angewendet /7/. Eingeklebt wurde die Scheibe bei $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Es ergibt sich eine Temperaturdifferenz von $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mit der Formel

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha_{\text{Stahl}} (t_2 - t_1) - l_0 \cdot \alpha_{\text{Glas}} (t_2 - t_1)$$

läßt sich die Differenz der Wärmedehnungen ermitteln. Die unterschiedliche Längendehnung von Glas und Metall beträgt 0,22 mm.

Die Fahrzeugkarosserie ist im Bereich der Frontscheibe relativ steif ausgeführt. Der in Bild 3 gezeigte Bimetalleffekt kann daher nicht eintreten. Folglich müssen die unterschiedlichen Längendehnungen in der Klebschicht ausgeglichen werden. Es gilt zu prüfen, ob das machbar ist.

Bild 5 zeigt das Spannungs-Verformungsverhalten einer 0,13 mm dicken Klebschicht aus EP-Klebstoff /15/. Dieses Verhalten ist mit dem Spannungs-Dehnungsverhalten von Werkstoffen, z.B. von Stahl, vergleichbar, das die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe beschreibt.

Die Verformbarkeit einer Klebschicht ist, wie Bild 5 zeigt, begrenzt. Bei einer Verformung um 0,17 mm tritt der Bruch ein. Die für Bild 5 geprüfte Klebverbindung ist nicht in der Lage die notwendige Dehnung von 0,22 mm zu ertragen.

Das Verformungsvermögen eines Klebstoffes ist eine atypische Eigenschaft. So sind Cyanacrylatklebstoffe sehr spröde, PU-Klebstoffe hingegen hoch verformbar. Bild 6 zeigt das Schubspannungs-Gleitungsverhalten verschiedener Epoxidharze. Unter der Gleitung einer Klebschicht, bzw. einer Klebverbindung wird der Tangens aus Klebschichtdicke und Verformung verstanden.

5. Einfluß der Klebschichtdicke auf das Verformungsverhalten

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, daß die Verformbarkeit einer Klebschicht lediglich vom Klebstoff selbst bestimmt wird, was zur Aufstellung der Schubspannungs-Gleitungs-Diagrammen führte. Neuere Untersuchungen haben jedoch ergeben, daß das Verformungsverhalten des Klebstoffes in einer Klebfuge auch von der Fugendicke abhängig ist. Bild 7 zeigt das Schubspannungs-Verformungsverhalten von verschieden dicken Polyurethanklebschichten /10/, nach DIN 54 451 /11/ - Polyurethanklebstoffe werden für flexible Klebverbindungen z.B. zum Einkleben der Frontscheiben bei PKWs verwendet -. Wie dem Bild zu entnehmen ist, weisen dünne Klebschichten eine höhere Bruchspannung und eine niedrigere Bruchdehnung als dickere auf. Die Verformbarkeit der Klebschicht kann folglich auch durch eine dicke Schicht gesteigert werden.

Weiterhin zeigt sich, daß bei dünnen Klebschichten der Spannungsanstieg infolge der Verformung steiler als bei dickeren ist. So führt bei einer 1 mm dicken Klebschicht eine Verformung von 0,07 mm zu einer Spannung von 15 N/mm². Bei der 0,05 mm dicken Schicht reicht hingegen schon ein Zehntel dieser Verformung aus, um diese Spannungsniveau zu erzeugen.

Wenn dieser Klebstoff zum Einkleben einer PKW-Frontscheibe verwendet wird, dann kann, wie aus Bild 7 zu entnehmen ist, die oben für den Temperaturwechseltest auftretende erforderliche Dehnung von 0,22 mm mit dünnen Klebschichten von 0,1 bis 0,2 mm Schichtdicke nicht erreicht werden. Die Bruchdehnung ist überschritten, derartige Klebverbindungen würden aus diesem Grunde versagen. Erst Klebverbindungen mit einer

Schichtdicke, die stärker als 0,2 mm sind, weisen eine ausreichende Verformbarkeit aus.

(Wegen der hohen induzierten Spannungen würde wahrscheinlich vorher bereits das Glas brechen, was jedoch außer acht gelassen werden soll.)

Es zeigt sich deutlich, daß beim vorgestellten Beispiel nach den Regeln der hochfesten Klebverbindungen nicht gearbeitet werden darf.

Der Einfluß der Klebschichtdicke auf das Verformungsverhalten wird natürlich auch vom Klebstoff selbst mit beeinflußt. In Bild 8 ist der Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und der Bruchverformung für drei Klebstoffe aufgezeigt.

6. Dynamische Belastung von Klebverbindungen

Treten die Wärmespannungen nur einmal, z.B. beim Warmabbinden der Fügeteile auf, so kann als maximale zulässige Dehnung in der Fuge die Bruchdehnung des Klebstoffes angesetzt werden. Erfolgt kein Bruch, so baut sich die Spannung im Laufe der Zeit aufgrund von Kriechvorgängen ab. Wird eine Fuge jedoch mehrfach thermisch belastet, so liegt eine dynamischen Belastung der Klebverbindung vor, da bei jeder Temperaturänderung erneut Spannungen auftreten. Die Frequenz dieser Belastung ist vom Zyklus der Aufwärmung bzw. Abkühlung der Fügeteile abhängig. Dynamische Wechselbelastungen vermindern die Tragfähigkeit von Klebverbindungen in beträchtlichem Maße, Bild 9.

Damit der Bruch der Klebverbindung aufgrund einer einmaligen Verformung um 0,22 mm vermieden wird, muß bei dem in Bild 7, gezeigten Klebstoff eine Klebschichtdicke von 0,3 mm gewählt werden. Die Verformung aufgrund der Wärmedehnung um 0,22 mm führt jedoch zu sehr hohen Spannungen in der Fuge. In diesem Falle treten Spannungen im Bereich von 20 N/mm^2 auf. Dies führt auch zu einer hohen Belastung der Fügeteile, was in mehrfacher Hinsicht negative Auswirkungen hat. So besteht die Gefahr, daß bei dieser Spannung die Scheibe zu Bruch geht. Weiterhin ist zu erwarten, daß ein Steinschlag bei einer vorgespannten Scheibe eher zum Bruch führt, als wenn die Scheibe spannungsfrei bzw. spannungsarm ist.

Es gilt aber auch die Auswirkungen auf die Klebschicht selbst zu berücksichtigen. Wie Bild 9 zeigt, versagen Klebverbindungen, die dynamisch hoch belastet sind, bereits nach wenigen Lastspielzahlen. Eine Verminderung der Belastung durch eine dickere Klebschicht, ist notwendig.

Weiterhin gilt es die Belastungsfrequenz zu berücksichtigen. Im genannten Beispiel liegt eine hohe Spannung in der Klebschicht bei einer niedrigen Belastungsfrequenz vor. Derartige Systeme haben jedoch, wie Bild 10 zu entnehmen ist, nur eine sehr geringe Bruchlastspielzahl. Folglich muß die Belastung in

der Fuge vermindert werden. Eine reduzierte Belastung ist im vorliegenden Fall nur durch eine weiter erhöhte Klebschichtdicke möglich. Bild 7 zeigt, daß erst wesentlich dickere Schichten größere Verformungen in der Klebschicht zulassen, ohne daß dabei hohe Spannungen in der Klebschicht entstehen.

Ursache für den Frequenzeinfluß auf das Tragverhalten ist, daß Klebstoffe Kunststoffe sind und das typische Kunststoffverhalten zeigen. Das trifft auch auf die dünnen Klebschichten in hochfesten Metallklebverbindungen zu. Althoff /8/ hat dies eindeutig mit Aluminiumklebverbindungen nachgewiesen: Das Festigkeitsverhalten der nach DIN 54 451 /11/ hergestellten Verbindungen war von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig und es konnte das für Kunststoffe typische Relaxations- und Retardationsverhalten aufgezeigt werden.

Bei einer dynamischen Belastung steckt in der Belastungsfrequenz die Belastungsgeschwindigkeit. Es zeigte sich, daß niedrige Belastungsfrequenzen zu einer wesentlich stärkeren Verminderung der ertragbaren Last führen als hohe, Bild 10. Als niedrige Frequenzen müssen auch Lastwechsel von einmal pro Stunde und darunter betrachtet werden. Daher müssen die durch den Temperaturwechsellast auftretenden Spannungen als dynamische Belastung betrachtet werden. Durch weitere Erhöhung der Klebschichtdicke muß die Spannung weiter vermindert werden. Dickere Klebschichten haben allerdings ein schlechteres dynamisches Verhalten als dünne, die Bruchlastspielzahl wird vermindert, Bild 11. Ursache für dieses Verhalten ist die bei langsamen Lastwechseln verstärkt auftretende Kriechneigung der Klebstoffe.

In den bisherigen Betrachtungen wurden Umwelteinflüsse noch nicht berücksichtigt. So führt eine erhöhte Luftfeuchtigkeit zu einer verminderten dynamischen Belastbarkeit, Bild 12. Auch hier stellt sich wiederum die Forderung nach verminderten Spannungen in der Fuge.

Die geschilderte Vorgehensweise hat einen Fehler. Das Spannungs-Verformungs-Diagramm, Bild 7, wurde bei Raumtemperatur aufgenommen. Bei einer Temperaturänderung kommt es jedoch zu einem veränderten mechanischen Verhalten, Bild 13, Die aus Bild 7 entnommene Spannung ist folglich zu hoch.

Weiterhin gilt es zu berücksichtigen, daß die Alterung im Klebstoff zu einer veränderten Verformungsfähigkeit führen kann. Auch hierfür müssen entsprechende Reserven in das System eingebaut werden, d.h. die Klebschicht muß noch dicker gestaltet werden.

7. Zusammenfassung der Belastung

Grundsätzlich gilt, daß die Ergebnisse von Kurzzeitversuchen, wie es der Zug- und der Druckscherversuch sind, nur dann auf praktische Anwendungen übertragen werden können, wenn es sich hier ebenfalls um eine Kurzzeitbelastung handelt /13/. Derartige Belastungen kommen in der Praxis jedoch kaum vor.

Kleberverbindungen werden üblicherweise statisch oder dynamisch belastet oder gemischt statisch mit einem überlagerten dynamischen Anteil.

Die Aussagen von Zug- und Druckscherversuche machen ebenfalls keine Aussagen über die Verformungsfähigkeit des Klebstoffes. Folglich können deren Ergebnisse auch nicht zur Klebstoffauswahl flexibler Kleberverbindungen herangezogen werden.

Die Konsequenz ist, daß für flexible Kleberverbindungen ein Dimensionierungsverfahren entwickelt und Klebstoffkenndaten gefunden werden müssen, welche die oben angeführten Einflüsse auf das Verhalten der Kleberverbindungen berücksichtigt.

8. Dimensionierungsverfahren

Nachdem das grundsätzliche Verhalten des Klebstoffes in Kleberschichten bekannt ist, kann hierauf aufbauend ein Dimensionierungsverfahren für flexible Kleberverbindungen entwickelt werden.

Zunächst gilt es die erforderliche Verformung der Kleberschicht aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungen der geklebten Teile und der Temperaturdifferenz zu ermitteln. Dann müssen die Anzahl der Lastwechsel erfaßt werden, denen die Kleberverbindung im Laufe ihres Lebens ausgesetzt ist. Dieses ist bei einer thermisch belasteten Kleberverbindung die Häufigkeit der Temperaturwechsel. Ausgehend von der Lastwechselzahl kann in der Wöhlerkurve der Kleberverbindung die maximal zulässige Spannung ermittelt werden. Mithilfe dieser Spannung und einer vorgegebenen maximalen Verformung läßt sich aus Schubspannungs-Verformungs-Diagrammen (wie Bild 7) die Mindestkleberschichtdicke ermitteln.

Voraussetzung für dieses Verfahren ist, daß sowohl die Wöhlerkurve als auch das Schubspannungs-Verformungsverhalten des Klebstoffes bei gleichen geometrischen Abmessungen ermittelt wurden. Weiterhin gilt es zu bedenken, daß eine Wöhlerkurve nur für eine Kleberschichtdicke und eine Belastungsfrequenz gilt. Es müssen folglich in einem iterativen Verfahren neue Wöhlerkurven für die entsprechende Kleberschichtdicke und die geplante Belastungsfrequenz aufgestellt werden.

Damit kann das Verfahren sehr aufwendig werden da die hierzu notwendigen Erkenntnisse über das Verformungsverhalten der Klebstoffe nicht vorliegen, sondern selbst erarbeitet werden müssen. Es können daher mehrere Iterationsschritten mit neu zu erstellenden Kurven notwendig sein.

Für sehr dicke Kleberschichten, wie sie beispielsweise beim Kleben der Autoscheibe angewendet werden, dürfte jedoch ein einfacheres Verfahren möglich sein. Aufgrund der großen Schichtdicke tritt der Stützeffekt der Metall- bzw. Glasteile nur noch sehr wenig in Erscheinung. Bei diesen dicken Kleberschichten kann sicherlich vom Verformungsverhalten der Kleber-

stoffsubstanz selbst ausgegangen werden. Es brauchen folglich keine Klebverbindungen geprüft werden, sondern es dürften Substanzprüfungen an Gießlingen ausreichend sein. Allerdings gilt es auch hier den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit (Belastungsfrequenz) zu berücksichtigen. Daneben muß noch sichergestellt werden, daß die Adhäsion erhalten bleibt. Dies muß durch andere Prüfungen, beispielsweise durch Schältests, nachgewiesen werden.

Zusammenfassung

Für eine Dimensionierung flexibler Klebverbindungen sind mehr und andere Kenndaten als die im Kurzzeitversuch ermittelte Klebfestigkeiten notwendig. Das wirkt abschreckend, da ein beträchtlicher Aufwand notwendig ist. Jedoch zeigt ein Blick auf andere Bereiche, zum Beispiel auf Berechnungsverfahren für Bauteilen aus Stahl, daß auch hier nicht mehr mit Ergebnissen des Zugversuches dimensioniert wird. Nur dank aufwendigerer Verfahren, beispielsweise der Benutzung von Smith-Diagrammen, ist hier das exakte Dimensionieren möglich.

Literaturangaben

- / 1/ Der Loctite
Ausgabe 1990/91
Firmenschrift Loctite Deutschland GmbH, München
- / 2/ Habenicht, Gerd
Kleben
Berlin 1986
- / 3/ Matting, A.
Metallkleben
Berlin 1969
- / 4/ Leyh, Hans
Drehmomentübertragung mit geklebten Wellen-Naben-
Verbindungen
Dissertation Stuttgart 1963
- / 5/ Rasche, Manfred
Qualitätsbestimmende Einflußgrößen bei Kunststoff-
Metall-Klebverbindungen
Schweißtechnische Forschungsberichte Band 5
Düsseldorf 1986
- / 6/ Kühnlein, Gerd
Elektrisch leitfähige Klebstoffe für die Halbleiter-
technik
Tagungsband 11. Klebtechnik Seminar Rosenheim
Verbund- und Vergußtechnik in der Elektrotechnik
München 1989

- / 7/ Cordes, H.-G.
Alterung von Klebverbindung - realistische Prüfung oder Philosophie ?
DECHEMA Monographien Vol. 119, Frankfurt/M. 1990
- / 8/ Althof, Walter
Verformungs- und Festigkeitsverhalten von Klebstoffen bei Kurz- und Langzeitbeanspruchung
Fachtagung Fertigungssystem Kleben
TUB-Dokumentation Kongresse und Tagungen Heft 21, Berlin 1984
- / 9/ Mittrop, F.
Metallklebverbindungen und ihr Festigkeitsverhalten bei verschiedenen Beanspruchungen
Schweißen und Schneiden 14 (1962) 9 S.395-401
- /10/ Wahono, Wiyu
Untersuchung von geometrischen Einflußfaktoren auf das Festigkeitsverhalten überlappter Kunststoff-Metall-Klebverbindungen
Diplomarbeit TU 1987
- /11/ DIN 54 451
Zugscher-Versuch zur Ermittlung des Schubspannungs-Gleitungs-Diagramms eines Klebstoffs in einer Klebung
November 1978
- /12/ Xiao-Su, Yi
Beitrag zum strukturabhängigen mechanischen Verhalten von Klebstoffschichten
Schweißtechnische Forschungsbericht Band 19, Düsseldorf 1988
- /13/ Rasche, Manfred
Schwache Basis; Ergebnisse aus Zugscherversuch wenig aussagefähig beim Dimensionieren von Klebverbindungen
Maschinenmarkt, 95 (1989) 3 S.30-33
- /14/ Wegman, R.F.
The Effect of Evironmental Exposure on the Endurance of Bonded Joints in Army Helicopters
Picatinny Arsenal Technical Report 4744, (May 1975)
- /15/ Scotch Weld AF 163-2
Firmenschrift 3 M Deutschland, Ausgabe November 1986

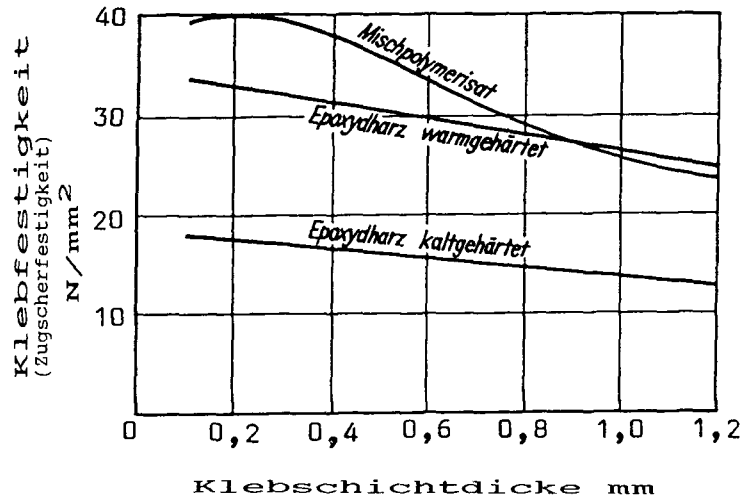


Bild 1: Einfluß der Klebschichtdicke auf die Klebfestigkeit (Zugscherfestigkeit) /3/

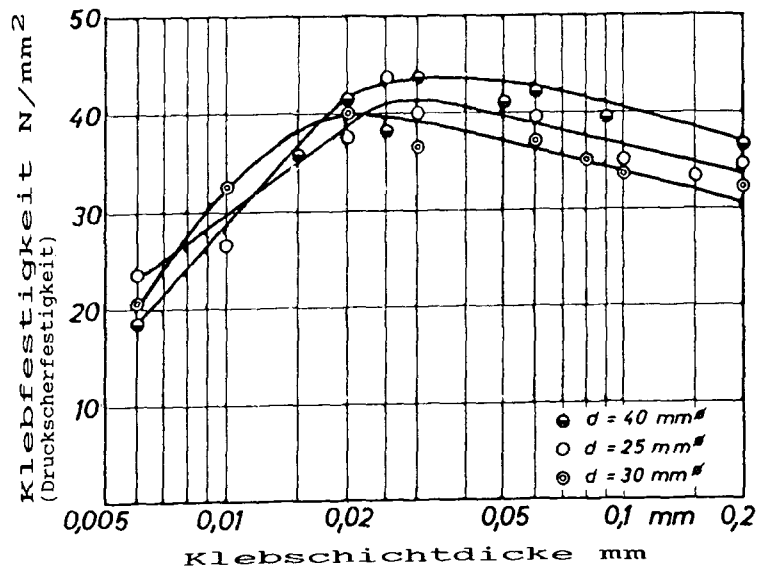


Bild 2: Einfluß der Klebschichtdicke auf die Klebfestigkeit (Druckscherfestigkeit) /4/

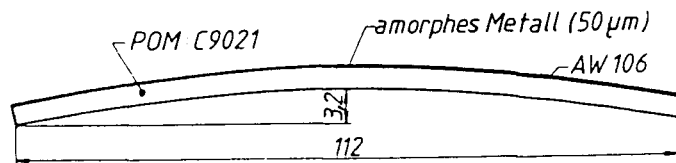


Bild 3: Auswirkung einer erhöhten Abbinde­temperatur auf eine verformbare Kunststoff-Metall-Kleb­verbindung /5/

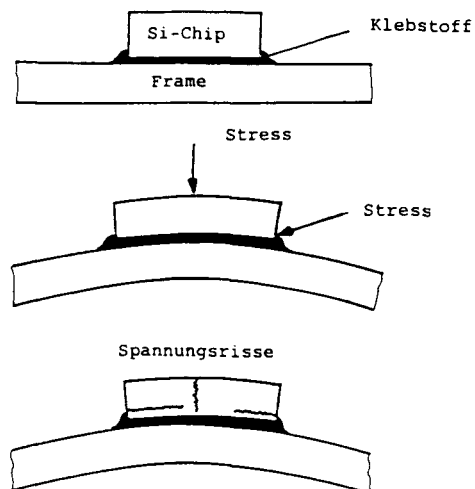


Bild 4: Prinzipielle Darstellung der Verformung des Frames und der Brüche in Si-Chips infolge von Wärmespannungen beim Abbindevorgang /6/

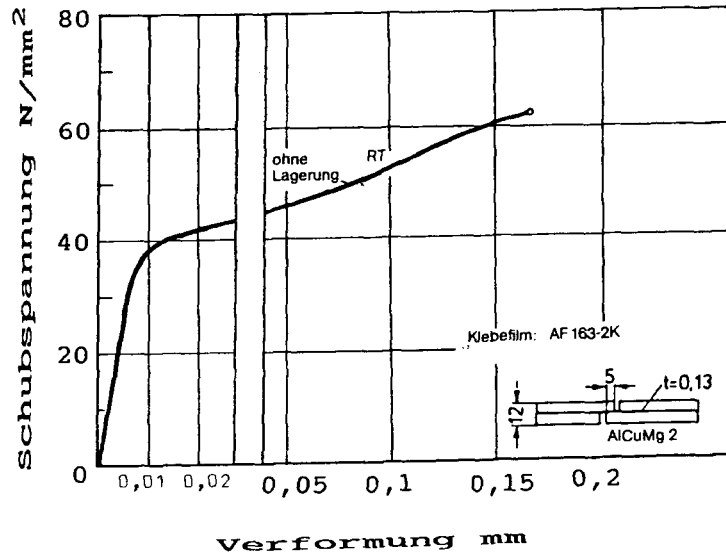


Bild 5: Spannungs-Verformungs-Verhalten einer 0,1 mm dicken Klebschicht eines Epoxidharz-Klebstoffes /15/ nach DIN 54 451 /11/

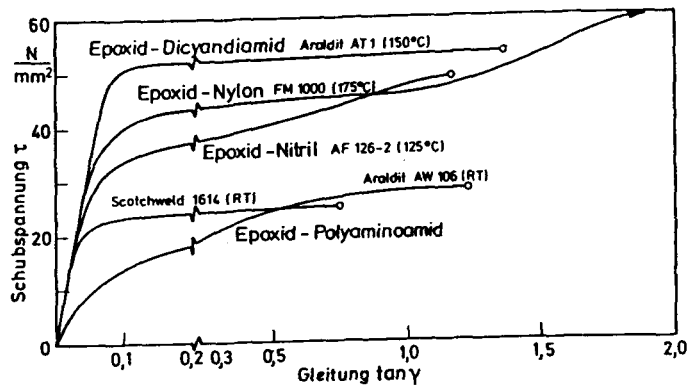


Bild 6: Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten einschließlich der maximal möglichen Verformung, der Bruchverformung, für verschiedene Epoxidharzklebstoffe /8/.

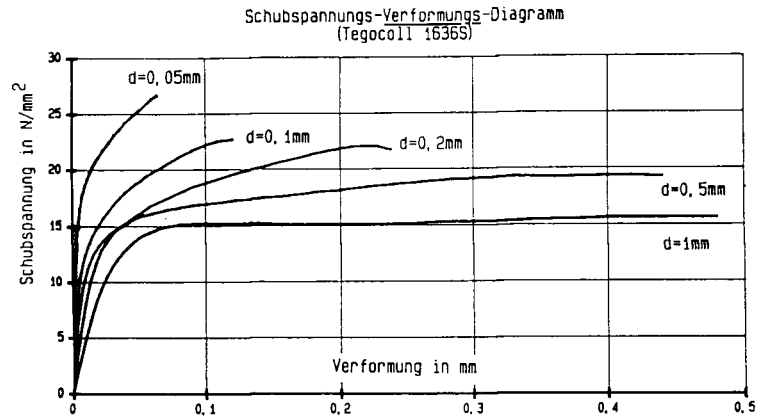


Bild 7: Schubspannungs-Verformungs-Diagramm bei unterschiedlicher Klebschichtdicke nach DIN 54 451, Fügeteilwerkstoff St 37 k, PUR-Klebstoff Tegocoll 1636S /10/

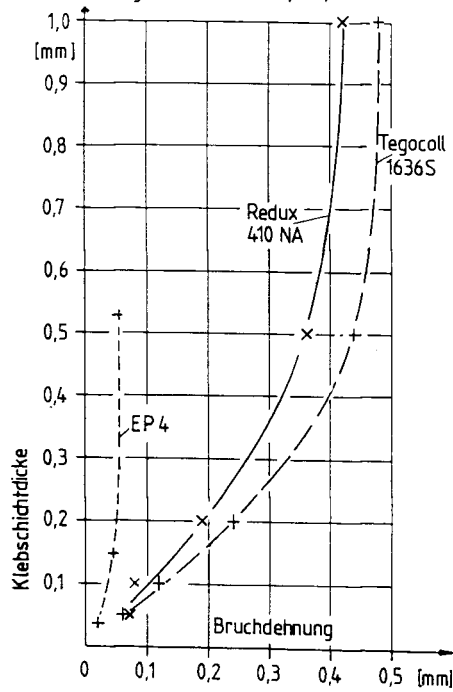


Bild 8: Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und Bruchverformung bei verschiedenen Klebstoffen

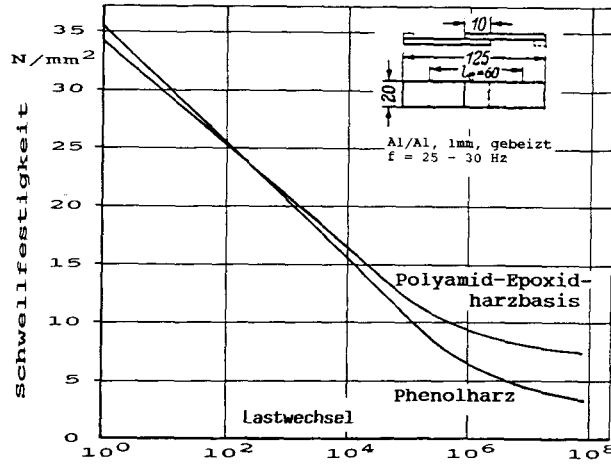


Bild 9: Wöhlerkurve von Klebverbindungen = Zusammenhang zwischen Lastwechselzahl und Belastungsniveaus /9/

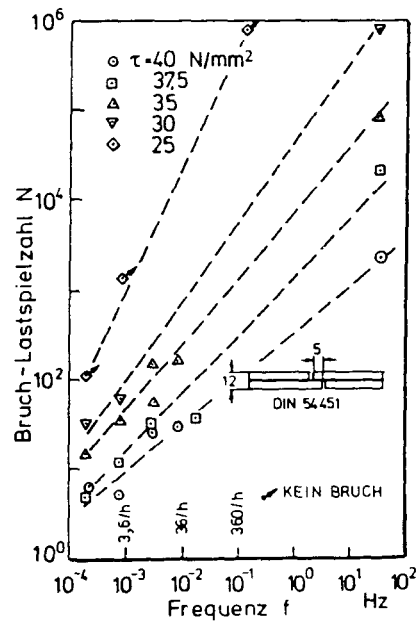


Bild 10: Einfluß von Belastungsfrequenz und Belastungsniveau auf die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel /8/

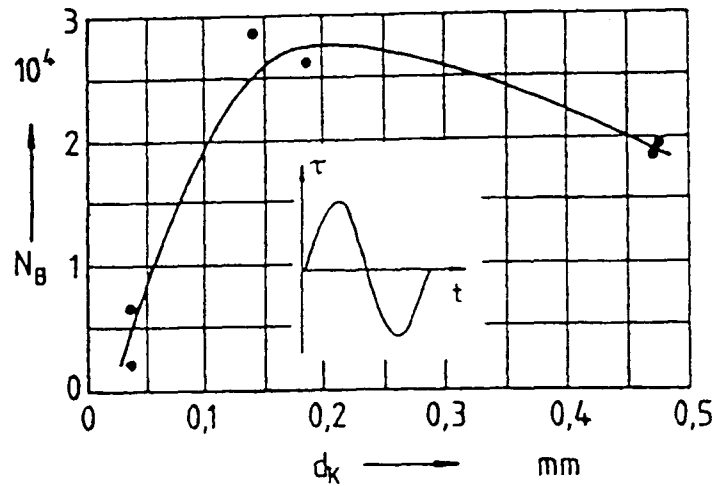


Bild 11: Einfluß der Klebschichtdicke auf die ertragbare Zahl der Lastwechsel /12/

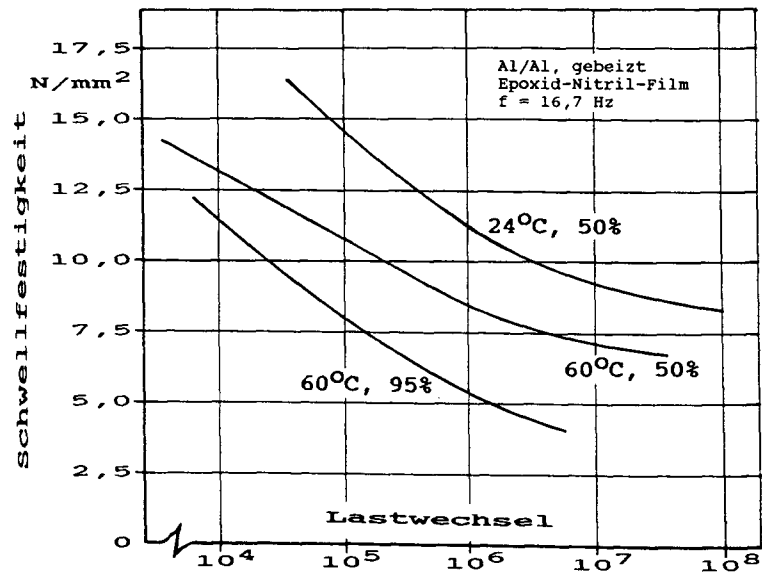


Bild 12: Einfluß von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf das dynamische Verhalten von Klebverbindungen /14/

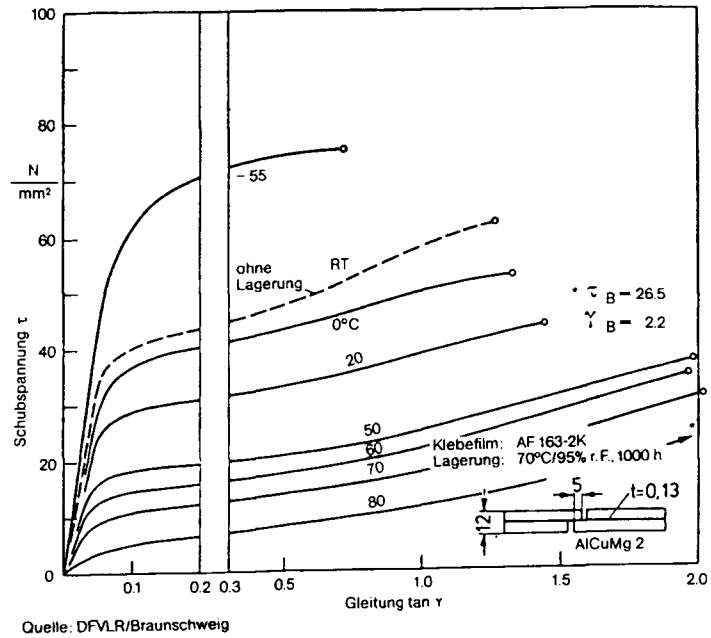


Bild 13: Einfluß der Temperatur auf das Schubspannungs-Gleitungsverhalten einer Klebschicht /15/