

Manfred Rasche*

Der Zugscherversuch in der Klebtechnik

Kleberverbindungen werden häufig dem Zugscherversuch nach DIN 53 283, dem wohl wichtigsten Versuch der Klebtechnik, unterzogen. Die Belastung jedoch entspricht nicht den in der Praxis vorkommenden Bedingungen. Es stellt sich die Frage, ob die im Zugscherversuch ermittelten Kenndaten zur Dimensionierung von Kleberverbindungen überhaupt geeignet sind.

Der Zugscherversuch ist derzeit die am häufigsten angewendete Prüftechnik für Kleberverbindungen. Auf Ergebnissen, die mit diesem Versuch ermittelt worden sind, beruht der weit überwiegende Teil der veröffentlichten klebtechnischen Untersuchungen. Die im Zugscherversuch ermittelte Klebfestigkeit wird auch zur Charakterisierung von Klebstoffen herangezogen: die DIN 53 283, Zugscherversuch, hat den Untertitel „Prüfen von Klebstoffen und Kleberverbindungen“. Entsprechende Werte sind in vielen Prospekten über Klebstoffe enthalten. Weiterhin gab und gibt es Ansätze, die Ergebnisse des Zugscherversuches als Ausgangswerte für die Berechnung von Kleberverbindungen zu nutzen.

Da der Zugscherversuch in der Klebtechnik eine dominierende Rolle spielt, soll er hier einer kritischen Betrachtung bezüglich seiner Aussagekraft unterzogen werden.

Probengeometrie

In Bild 1 sind die Probenabmaße und die Probenanordnung für den Zugscherversuch nach DIN 53 283 dargestellt. Das Bild zeigt gleichzeitig die Verformung der Probe bei einer Belastung. Die Probenabmaße sind in DIN 53 281 genormt. Als Probenwerkstoff legt die Norm AlCuMg 2 pl fest, läßt jedoch auch andere Werkstoffe zu. Bei dem angegebenen Werkstoff handelt es sich um einen in der Luftfahrtindustrie verwendeten Werkstoff. Daraus folgt, daß diese Prüftechnik aus der Luftfahrtindustrie stammt.

Den Probenabmaßen kann man entnehmen, daß der Test aus dem englischsprachigen Raum übernommen worden ist, denn die Probenbreite von 25 mm entspricht genau einem Zoll und die Überlappungslänge von 12 mm entspricht ½ Zoll.

Den Abmaßen kann man wegen dieser „runden Maße“ aber auch ansehen, daß sie relativ willkürlich festgelegt worden sind, wobei eine gute Handhabbarkeit der Proben und die Abmessungen der Luftfahrtindustrie im Vordergrund gestanden haben dürften. Eine klebtechnische Notwendigkeit für diese Maße ist nicht gegeben. Weiterhin ist zu bemerken, daß sich die Norm nur auf metallische Werkstoffe bezieht. Kunst- und andere Werkstoffe werden von ihr nicht erfaßt.

Einflußfaktoren auf die Klebfestigkeit

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst das Ergebnis des Zugscherversuchs: Überlappungslänge, Klebschichtdicke, Fügeteil- und -festigkeit, freie Einspannlänge, Prüfgeschwindigkeit, der Oberflächenzustand der Proben, die Prüftemperatur und die Art der Klebstoffverarbeitung, beispielsweise die Aushärtung des Klebstoffes. Auf die Wiederga-

be von Diagrammen, die den Einfluß zeigen, muß aus Platzgründen an dieser Stelle verzichtet werden. Es wird auf die entsprechende Literatur verwiesen /1, 2, 3/.

Klebfestigkeit = Verbundfestigkeit: Anhand des vorher Gesagten kann festgestellt werden, daß die im Zugscherversuch ermittelte Klebfestigkeit nicht den Klebstoff charakterisiert, sondern daß es sich um eine Verbindungsfestigkeit handelt. Der Einfluß der Fügeteilabmaße und des Fügeteilwerkstoffs zeigen dies deutlich.

Klebfestigkeit und Bruchverhalten: Bei der Darstellung der Prüfergebnisse von Kleberverbindungen ist im allgemeinen lediglich die Klebfestigkeit angegeben. Auf das

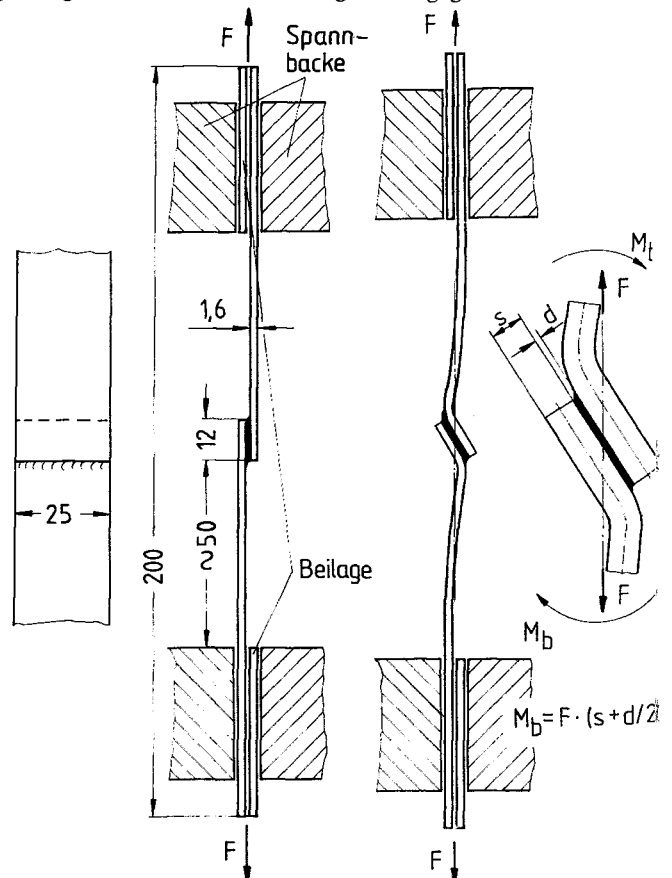


Bild 1: Proben für den Zugscherversuch nach DIN 53 283 und Verformung der Proben bei Belastung.

*Dr.-Ing. Manfred Rasche, beratender Ingenieur für Klebtechnik, Oberflächentechnik und Niederdruckplasmatechnologie.

MESSEN UND PRÜFEN

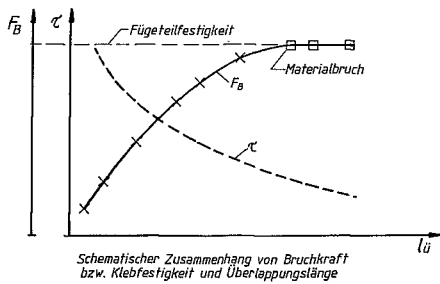


Bild 2: Schematischer Zusammenhang von Bruchkraft bzw. Klebfestigkeit und Überlappungslänge.

Bruchverhalten der Proben wird meistens nicht eingegangen. Dies ist aber unbedingt notwendig, um die Prüfergebnisse richtig interpretieren zu können. An einem Beispiel soll das gezeigt werden. In Bild 2 ist schematisch der Einfluß der Überlappungslänge auf die Bruchkraft und die Klebfestigkeit einer Klebverbindung dargestellt. Bei guter Adhäsion zwischen Klebstoff und Fügeteil steigt die Bruchkraft der Verbindung mit steigender Überlappungslänge an. Die Klebfestigkeit vermindert sich dabei. Ursache hierfür ist der ungleichmäßige Spannungszustand in der Zugscherprobe. Bei einer bestimmten Überlappungslänge wird die Tragfähigkeit des Fügeteiles erreicht, die Verbindung versagt durch einen Bruch im Fügeteil. Eine weitere Verlängerung der Überlappung kann die Bruchkraft nicht mehr erhöhen. Da die gleiche Bruchkraft jetzt jedoch auf eine vergrößerte Klebfläche bezogen wird, kommt rechnerisch eine verminderte Klebfestigkeit heraus, Bild 2, der Klebstoff wird vermeintlich „schlechter“. Ähnliches gilt auch, wenn die Verbindung kohäsiv im Klebstoff versagt.

Wird zusätzlich zur errechneten Klebfestigkeit das veränderte Bruchverhalten, im Beispiel das Eintreten von Fügeteilbrüchen, angegeben, so können Fehlinterpretationen vermieden werden.

Vergleich von Klebfestigkeiten: In Bild 3 ist für einen Klebstoff der Vergleich zwischen der Klebfestigkeit einer Metall-Metall-, einer Metall-Kunststoff- und einer Kunststoff-Kunststoff-Klebverbindung

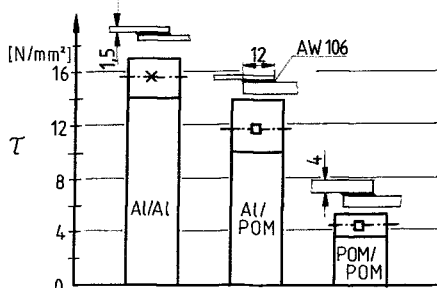


Bild 3: Festigkeit unterschiedlicher Klebverbindungen bei Verwendung des gleichen Epoxidharzes; o = Fügeteilbruch im Kunststoff, x = Bruch im Adhäsionsbereich.

dargestellt. Als Fügeteilwerkstoffe wurden Aluminium und Polyoximethylen (POM) verwendet. Die Probenabmessungen sind, bis auf die unterschiedliche Dicke der Metall- und Kunststoffteile, gleich: Breite = 25 mm, Überlappungslänge = 12 mm, Dicke, Al = 1,5 mm, POM = 4 mm.

Das Bild zeigt, daß mit der Metall-Klebverbindung die höchste Klebfestigkeit erreicht wird. Die Werte der Kunststoff-Klebverbindung sind die geringsten. Die Festigkeit der Kunststoff-Metall-Klebverbindung liegt dazwischen. Die unterschiedlichen Ergebnisse haben zwei Ursachen:

Durch die ungleiche Probendicke verändert sich die Biegebelastung. Das unterschiedliche Festigkeitsverhalten von Kunststoff und Metall.

Bild 4 zeigt für einen PUR- und einen EP-Klebstoff die nach DIN 53 283 ermittelte Normklebfestigkeit und die Klebfestigkeit, die mit POM-Stahl-Klebverbindungen erreicht werden. Während der Epoxidharzklebstoff im Normzugscherversuch die höhere Klebfestigkeit erreicht, führt bei den Metall-Kunststoff-Klebverbindungen der Polyurethanklebstoff zu den höheren Festigkeiten. Der Grund hierfür ist die unterschiedliche Belastbarkeit der Fügeteile sowie der sich verschiedenen ausbildende Spannungszustand in den Fügeteilen.

Bild 5 gibt für zwei anaerobe Klebstoffe die Prüfergebnisse des Zugscher- und des Druckscherversuches wieder. Es zeigt sich, daß im Zugscherversuch der Klebstoff 2100 die höheren Festigkeiten erbringt. Im Druckscherversuch können jedoch mit dem Klebstoff 2000 die höheren Festigkeiten erzielt werden. Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Belastungszustände, bei den beiden Prüfarrangements, auf die die Klebstoffe unterschiedlich reagieren.

In Bild 6 ist für drei verschiedene Epoxidharzklebstoffe das Schubspannungs-Gleitungsverhalten dargestellt. Obwohl sich hier große Unterschiede ergeben, „erzielt man im Zugscherversuch mit Karosserieblechen üblicher Wandstärke Klebfestigkeiten gemäß DIN 53 283 in der gleichen Größenordnung“ /13/.

Die in den Bildern 3, 4, 5 und 6 dargestellten Vergleiche zeigen, daß die Ergebnisse des Zugscherversuches weder auf andere Werkstoffkombinationen noch auf andere Prüftechniken übertragen werden können.

Spannungen in der Zugscherprobe

Die Spannungsverteilung in einer Zugscherprobe ist sehr ungleichmäßig. Dies gilt besonders im Bereich der beiden Überlappungsenden.

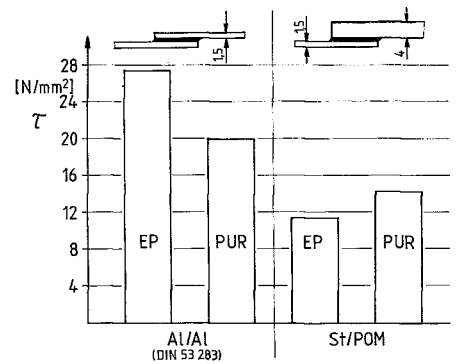


Bild 4: Vergleich der Normklebfestigkeit nach DIN 53 283 mit der Festigkeit von Stahl-POM-Klebverbindungen bei Verwendung eines EP- und eines PUR-Klebstoffes.

Omni Fit-UV		2000	2100
		N/mm ²	N/mm ²
Zugscherfestigkeit in Anlehnung DIN 53283			
Prüfstreifen: St 37 (100 x 25 x 1,5)			
Vorbehandlung: gestrahlt			
Oberfläche: 250 m ²		16	19
Aushärtezeit: 24 h RT			
Druckscherfestigkeit gem. DIN 54402			
Weichstoff: 9 SHu 28k			
Rauigkeit: R _a = 6-10 µm			
Passung: H7/f7			
Fläche: 1005 mm ²		30	28
Aushärtezeit: 24 h RT			

Bild 5: Prüfergebnisse des Zugscher- und des Druckscherversuches für zwei kombiniert und anaerob abbindende Klebstoffe /4/.

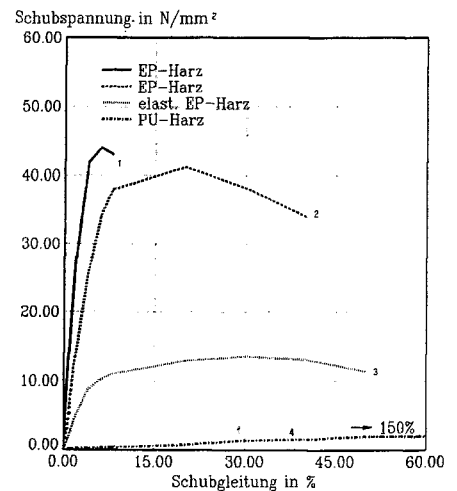


Bild 6: Schubspannungs-Gleitungsverhalten verschiedener EP-Klebstoffe für den Karosserierohbau /13/.

Spannungsverteilung in der Klebfuge: Bei der Belastung der Zugscherprobe ergibt sich ein ungleichmäßiger, aus Normal- und Schubspannungen zusammengesetzter Spannungszustand, der an den Überlappungsenden sein Maximum hat /5/. Der Normspannungsanteil ist höher als der Schubspannungsanteil und liegt um ein Mehrfaches über der errechneten mittleren Spannung. Im Zugscherversuch versagt die Verbindung, wenn an den Enden der Überlappung partiell die Tragfähigkeit

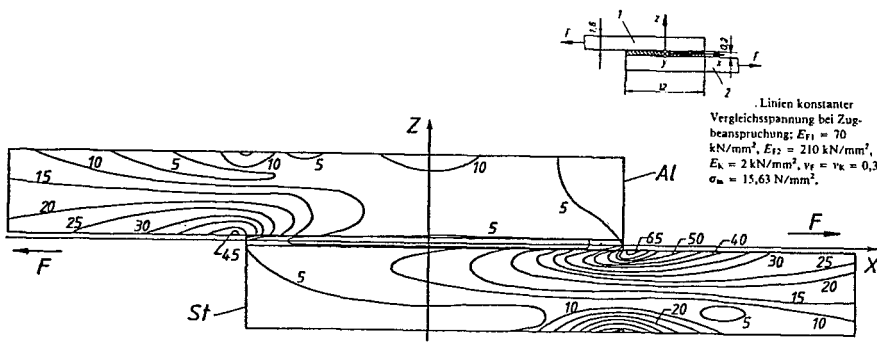


Bild 7: Spannungsverteilung in den Füge­teilen einer Kleb­verbindung /6/; dargestellt ohne Verformung. Klebstoff: Epoxidharz

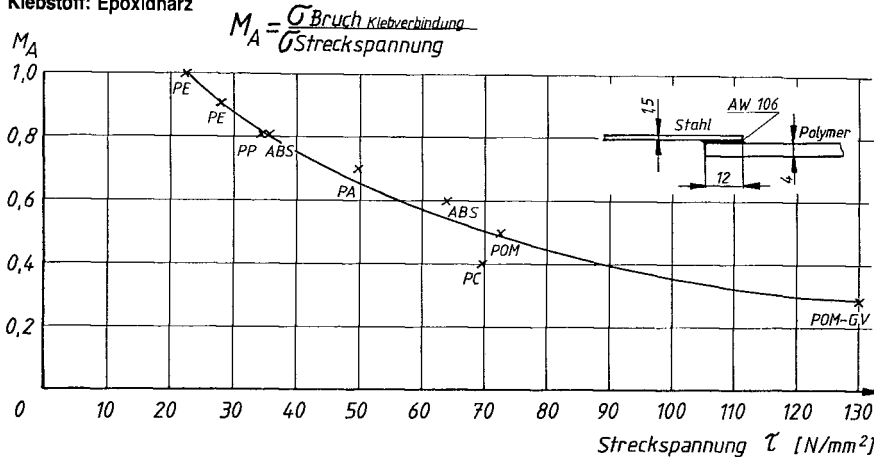


Bild 8: Materialausnutzungsfaktor für Kunststoff-Metall-Kleb­verbindungen. Klebstoff: Epoxidharz

von Klebschicht oder Füge­teil oder die Haftung des Klebstoffes überschritten wird. Besonders bei Metall-Metall-Kleb­verbindungen kann unter bestimmten Voraussetzungen allerdings auch ein Füge­teilversagen außerhalb der Kleb­stelle eintreten.

Der Normalspannungsanteil führt zu einer Schälbelastung am Überlappungs­ende. Verformbare Klebstoffe können aufgrund ihres Verhaltens die Schälkraft auf einen größeren Bereich verteilen. Dadurch werden mit diesen Klebstoffen bei gleicher Adhäsion höhere Kleb­festigkeiten erzielt als mit spröderen.

Spannungsverteilung in den Füge­teilen:

Eine ungleichmäßige Spannungsverteilung gibt es jedoch nicht nur in der Klebschicht, sondern auch in den Füge­teilen. In Bild 7 wird die errechnete Spannungsverteilung /6/ in einer Aluminium-Stahl Kleb­verbindung gezeigt. Es zeigen sich Spannungsspitzen im Bereich der Überlappungs­enden, die die mittlere Spannung in den Füge­teilen von 15,63 N/mm² um ein Mehr­faches übersteigen. Die mittlere Spannung in der Klebfuge beträgt bei dieser Belastung lediglich 2 N/mm², was weit unterhalb der Kleb­festigkeit hochfester Kleb­verbindungen liegt.

Verformungsfähige Werkstoffe wie Stahl und Aluminium können diese Spannungsspitzen ertragen. Durch Fließvor-

gänge und die Stützwirkung weniger belasteter Bereiche des Füge­teiles werden die Spannungen abgebaut, so daß das Teil in diesem Bereich nicht versagt. Das Füge­teilversagen tritt in der freien Einspan­länge ein.

Bei kerbempfindlichen Werkstoffen, wie es viele Kunststoffe sind, können die Spannungsspitzen jedoch nicht abgebaut werden. In diesem Falle kommt es zum Bruch der Verbindung im Kunststoffteil. Dieses Verhalten führt zu einer verminderten Tragfähigkeit kerbempfindlicher Polymerteile in Kleb­verbindungen.

Die verminderte Tragfähigkeit läßt sich durch den Materialausnutzungsfaktor erfassen. Er gibt das Verhältnis zwischen der mittleren Bruchspannung des Füge­teiles einer Kleb­verbindung und der Bruch- oder Streckspannung dieses Werkstoffes im Zugversuch an.

Bild 8 zeigt den Materialausnutzungsfaktor für verschiedene Kunststoffe in einer Kunststoff-Metall-Kleb­verbindung. Während ein stark verformbares Polyethylen (PE) geringer Festigkeit voll ausgenutzt werden kann, kann das hochfest glasfaserverstärkte Polyoximethylen (POM) nur noch ein Drittel der im Zugversuch erreichbaren Kraft übertragen. Ursache hierfür ist die mit steigender Festigkeit zunehmende Kerbempfindlichkeit der Polymere.

Die gezeigte Materialausnutzung gilt in

dieser Form nur für die angegebene Proben­geometrie, den verwendeten EP-Klebstoff und die angewendeten Prüf­bedingungen. Veränderte Bedingungen führen zu einer anderen Materialausnutzung. Tendenziell dürfte das gezeigte Verhalten jedoch auf andere Gegebenheiten übertragbar sein. Es wird dabei vorausgesetzt, daß eine gute Haftung zwischen Klebstoff und Metall- oder Kunststoff­füge­teil besteht, so daß die Proben im Kunststoffteil versagen.

Oberflächenprüfung mit dem Zugscherversuch

Mit dem Zugscherversuch werden auch die Auswirkungen von Oberflächen­vor­behandlungen auf die Kleb­festigkeit untersucht. Dies gilt auch für die Vor­behandlung von Polymeren. Bei verlängerter Oberflächen­behandlung und damit verbesserter Haftung, tritt bei der Zugschervprüfung häufig ein Bruch im Polymerteil ein. Ursache hierfür ist die eben beschriebene Spannungs­konzentration in den Füge­teilen. Tritt diese Versagensform auf, so kann mit dem Zugscherversuch nicht mehr festgestellt werden, ob eine weitere Verbesserung der Oberflächen­qualität zu einer erhöhten Haftung führt, da die Füge­teile abbrechen, obwohl die maximal mögliche Haftung an der Oberfläche noch nicht erreicht ist.

Dies soll an einem Beispiel gezeigt werden. In Bild 9 ist die Kleb­festigkeit von PP-Stahl-Kleb­verbindungen in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer im Nieder­druckplasma dargestellt.

Wird die Wirkung der Vor­behandlung mit dem Zugscherversuch geprüft, so ist bereits nach sechs Sekunden Behandlungsdauer die maximale Kleb­festigkeit erreicht. Längere Behandlungszeiten führen zu keinen höheren Festigkeiten und scheinen somit nicht notwendig zu sein. Allerdings lassen Veränderungen des Bruch­verhaltens – längere Behandlungszeiten führen zum Versagen der Polypropyleneile –

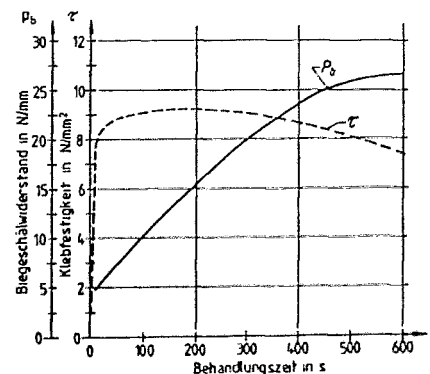


Bild 9: Kleb­festigkeit und Biegeschäl­widerstand von PP-Stahl-Kleb­verbindungen in Abhängigkeit von der Behandlungszeit im Sauerstoffplasma /7/. Klebstoff: Epoxidharz

MESSEN UND PRÜFEN

auf eine, durch längere Behandlung verbesserte Haftung schließen. Dies ist tatsächlich der Fall, wie der Einsatz einer anderen Prüftechnik bestätigt. Wird mit dem Biegeschälversuch geprüft /7/, so kann bei einer Behandlungszeit von mehr als sechs Sekunden eine verbesserte Haftung gemessen werden.

Verformung der Fügeiteile

Das Biegemoment führt am Ende der Überlappung zu einer Verformung der Fügeiteile, Bild 1. Schon bei Klebfestigkeiten unter 10 N/mm^2 kommt es bei metallischen Fügeiteilen zu einer bleibenden Verformung. Zusätzlich zu dem am Überlappungsende vorhandenen Spannungsmaximum tritt dadurch eine hohe Dehnung auf. Sie führt zu einer weiteren Belastung des Klebstoffes. Er muß am Überlappungsende nicht nur hohe Belastungen ertragen, sondern gleichzeitig noch sehr verformungsfähig sein.

Eine Belastung, die dieser Prüfbelastung entspricht, kommt in der Praxis bei geklebten Teilen nicht vor. Derart hohe plastische Dehnungen würden Bauteile wegen zu großer Vorformung unbrauchbar machen. Die Prüftechnologie entspricht somit nicht den Gegebenheiten der Praxis.

Werkstoffmechanische Eigenschaften des Klebstoffes

Die meisten Klebstoffe sind Kunststoffe. Althof hat in zahlreichen Versuchen nachgewiesen, daß diese Klebstoffe auch in einer Metallklebverbindung das werkstoffmechanische Verhalten eines Kunststoffes beibehalten. Die Versuchsergebnisse sind in /8/ zusammenfassend dargestellt worden. Diese Erkenntnis hat Folgen für die Berechnung von Klebverbindungen. Kunststoffe zeigen ein anderes werkstoffmechanisches Verhalten als Metalle, hier besonders Stahl. So neigen Kunststoffe stark zum Kriechen, ein Verhalten, das bei Stählen erst bei erhöhter Temperatur eintritt, normalerweise jedoch nicht berücksichtigt werden muß. Damit lassen sich die vielfach auf das werkstoffmechanische Verhalten des Stahles aufbauenden Festigkeitsregeln bei Kunststoffen nicht anwenden. Die Dimensionierung von Kunststoffteilen muß mit Hilfe von Langzeitfestigkeitswerten (Zeitstandsfestigkeit, dynamische Festigkeit) erfolgen /9/. Da Klebstoffe Kunststoffe sind, gelten diese Regeln somit auch für das Dimensionieren von Klebverbindungen.

Der Zugscherversuch geht von einer Kurzzeitbelastung der Fügeiteile aus. Er erfüllt daher nicht die Bedingungen, die für das Konstruieren von Kunststoffteilen

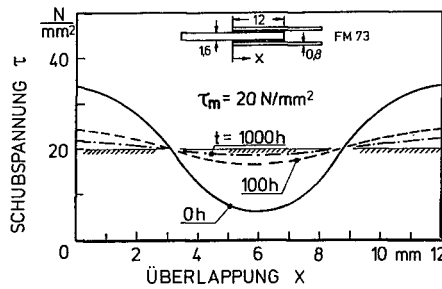


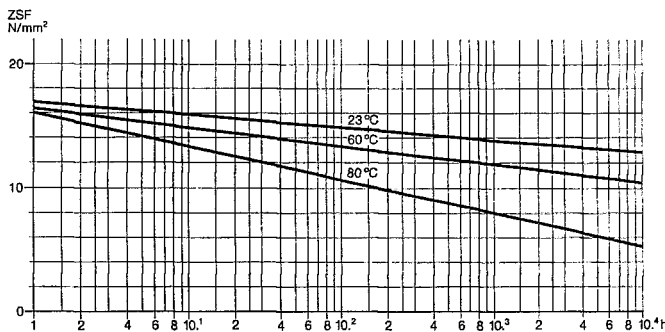
Bild 10: Veränderung der Spannungsverteilung in der Klebfuge bei länger dauernder statischer Last/8/.

gestellt werden. Somit sind die im Zugscherversuch ermittelten Kenndaten zur Dimensionierung von Klebverbindungen nicht geeignet. Die verschiedenen, auf den Zugscherversuch aufbauenden Berechnungsverfahren bewähren sich alle nur für eine Kurzzeitbelastung.

Wird eine Zugscherverbindung einer länger dauernden statischen Belastung ausgesetzt, so verändert sich im Laufe der Zeit die Spannungsverteilung in der Fuge. Die hohen Spannungsspitzen am Überlappungsende bauen sich aufgrund des Relaxationsverhaltens des Klebstoffes ab. Die Veränderungen der Spannungsverteilung zeigt Bild 10. Dargestellt ist allerdings keine einschnittig überlappte Klebverbindung, sondern eine zweiseitig überlappte. Tendenziell ist die Spannungsveränderung bei einer einschnittig überlappten Zugscherversuchprobe jedoch die gleiche.

Zeitstandsversuch nach DIN 53284 über 10'000 Std.

Araldite: AV 138 - HV 998 (100 : 40)
 Härtung: 30 min. 100 °C Tg: 88 °C
 Prüftemperaturen: 23, 60 und 80 °C



Araldite: AW 106 - HV 953 U (100 : 80)
 Härtung: 30 min. 100 °C Tg: 80 °C
 Prüftemperaturen: 23, 40 und 60 °C

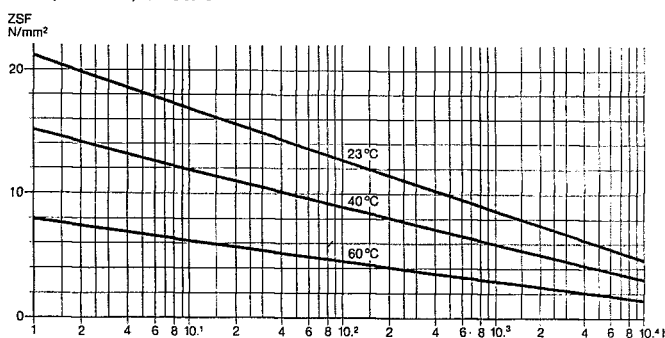


Bild 11: Ergebnisse des Zeitstandsversuches bei unterschiedlichen Temperaturen für zwei Epoxidharzklebstoffe /10/.

Im folgenden soll das veränderte Festigkeitsverhalten bei Langzeitbelastung gezeigt werden.

Zeitstandsfestigkeit, Kriechen:

Bild 11 zeigt für zwei Klebstoffe das Zeitstandsverhalten. Es ergeben sich gegenüber dem Kurzzeitversuch zum Teil beträchtlich verminderte Tragfähigkeiten. Beim Zeitstandsversuch tritt ein anderes Versagenskriterium auf als beim Zugscherversuch. Versagensursache ist hier nicht das Überschreiten einer maximal ertragbaren Belastung an den Überlappungsenden der Probe, sondern das Kriechen der Klebschicht.

Interessant ist, daß der Klebstoff AW 106 trotz seiner höheren Anfangsfestigkeit eine wesentlich geringere Zeitstandsfestigkeit als der Klebstoff AW 136 aufweist. Für den Einsatz eines Klebstoffes ist jedoch die Langzeitfestigkeit der bestimmende Wert und nicht die Anfangsfestigkeit.

Bei dem Vergleich eines PUR- mit einem EP-Klebstoff ergab sich bei Kunststoff-Metall-Verbindungen, daß im Zugscherversuch mit dem PUR-Klebstoff die höheren Klebfestigkeiten erreicht wurden. Die bessere Zeitstandsfestigkeit wies jedoch der EP-Klebstoff auf /16/.

Somit kann festgestellt werden, daß sich die Ergebnisse des Zugscherversuches auch nicht auf das Zeitstandsverhalten von Klebverbindungen übertragen lassen.

Abschließend bleibt noch anzumerken, daß die Klebschichtdicke nicht nur die Zugscherefestigkeit sondern auch die Zeitstandsfestigkeit beeinflusst. Bild 12 zeigt den Einfluß der Klebschichtdicke auf die Zeitfestigkeit.

Während eine Belastung in Höhe von 75 Prozent der Zugscherefestigkeit bei Schichtdicken von 1/10 mm zu einer Zeitfestigkeit von über 500 Stunden führt, versagen Klebschichten von 2/10 mm schon nach sechs Minuten. Ein Vergleich des Klebschichtdickeneinflusses auf die Zugscherefestigkeit und die Zeitstandsfestigkeit ergibt, daß der Festigkeitsverlust im Zeitstandsversuch um ein Viel-

MESSEN UND PRÜFEN

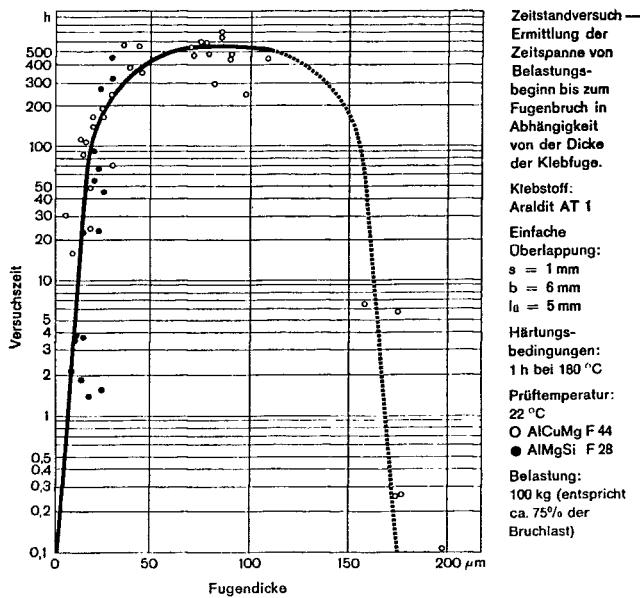


Bild 12: Einfluß der Klebschichtdicke auf die Zeitstandfestigkeit einer AL-EP-Kleberbindung /11/.

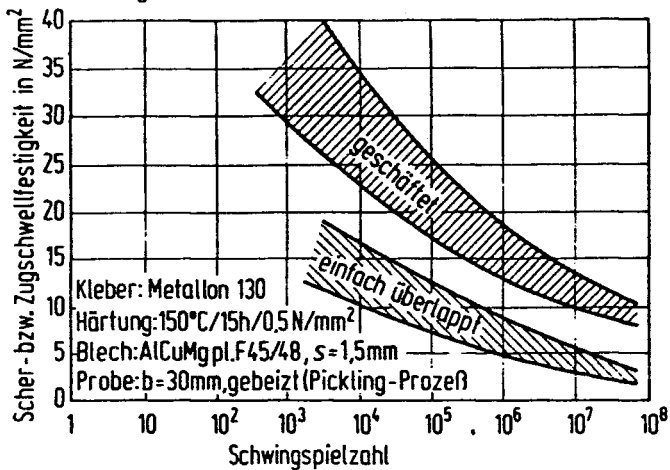


Bild 13: Scherzugschwellfestigkeit von Kleberverbindungen /12/.

faches höher ist. Dies kann gesagt werden, auch wenn unterschiedlicher Prüfgeometrien kein direkter Vergleich möglich ist. Hier ist weiter zu beachten, daß es sich bei dem in Bild 12 dargestellten Klebstoff um einen relativ spröden Epoxidharzklebstoff handelt. Bei verformungsfähigen Klebstoffen dürfte die Verminderung der Zeitstandfestigkeit noch stärker sein.

Dynamische Festigkeit: Bild 13 zeigt den Einfluß einer Schwellbelastung auf die Klebfestigkeit. Auch hier sind, genau wie bei der Zeitstandfestigkeit, beträchtliche Festigkeitsverluste gegenüber der im Zugversuch ermittelten Klebfestigkeit festzustellen. Das Diagramm zeigt weiterhin, daß Kleberverbindungen keine Dauerfestigkeit besitzen.

Im Gegensatz zu Bild 13 ist vielfach in Darstellungen der dynamischen Tragfähigkeit von Kleberverbindungen eine Dauerfestigkeit angegeben. Dies steht im Wider-

spruch zu der Erkenntnis, daß Kunststoffe im Gegensatz zu den Metallen keine Dauerfestigkeit besitzen. Nach den bisherigen Ausführungen müßte dies auch für den Klebstoff in einer Metallkleberverbindung gelten. Ursache der hiervon abweichenden Darstellungen dürfte sein, daß es sich um ältere Darstellungen handelt, denen man das bekannte Schwingungsverhalten von Stahl zugrundegelegt hat. Das abweichende Verhalten der Kunststoffe ist nicht berücksichtigt worden. Ursache könnte aber auch eine hochfrequente Prüfung sein. Hierbei kommt es unterhalb eines bestimmten Belastungsniveaus zum Versagen in den Metallfügeteilen

und nicht im Klebbereich. In diesem Fall wird dann nur das Schwingverhalten des Metalls gezeigt.

Weiterhin ist zu beachten, daß die Schwingfrequenz der Prüfung ebenfalls einen Einfluß auf das Prüfergebnis hat. Kleberverbindungen können höherfrequente Schwingungen besser ertragen als niederfrequente. Ursache hierfür ist das von der Belastungsgeschwindigkeit abhängige Festigkeitsverhalten der Kunststoffe.

Werden einschnittig überlappte Metallkleberverbindungen mit hoher Schwingfrequenz geprüft, so tritt häufig ein Bruch im Fügeteil auf. Wird die Schwingfrequenz erniedrigt, verlagert sich das Bruchgeschehen in die Klebfuge. Jetzt tritt Versagen im Klebstoff oder im Adhäsionsbereich auf. Die Tragfähigkeit der Kleberverbindung nimmt mit fallender Schwingfrequenz ab. Extrem niederfrequente Schwingungen mit Frequenzen von einem Lastwechsel pro Tag müssen als Schwingbelastung angesehen

werden. Sie führen zu einer stark verminderten Tragfähigkeit der Verbindung /8/.

Verformbare Klebstoffe

Bei bestimmten Anwendungen des Klebens wird keine feste, sondern eine verformungsfähige Kleberverbindung benötigt. So muß der Klebstoff, mit dem die Scheiben in Kraftfahrzeuge eingeklebt werden, die Bewegung ausgleichen, die durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen von Scheibe und Karosserie entstehen. Eine starre, nach den Regeln hoher Klebfestigkeit ausgeführte Verbindung müßte sich infolge der Wärmespannungen verformen (Bimetalleffekt). Da dies bei steifen Fügeteilen (Karosserie) nicht möglich ist, tritt ein Versagen in der Klebschicht oder im Fügeteil (Scheibe) ein.

Über die Verformbarkeit eines Klebstoffes macht der Zugversuch keine Aussagen, so daß er hier als Auswahlkriterium nicht herangezogen werden kann. Gleiches gilt auch für die Schlag- und Stoßempfindlichkeit eines Klebstoffes. Dies zeigt ein Beispiel: Cyanacrylate und kalthärtende Epoxidharze haben im Zugversuch etwa die gleiche Klebfestigkeit, scheinen somit gleichwertig zu sein. Bei einem Fallversuch auf einen harten Untergrund versagen mit Cyanacrylaten geklebte Metallteile jedoch vielfach. Mit Epoxidharz geklebte Teile überstehen die Belastung hingegen problemlos.

Zusammenfassung

Bei näherer Betrachtung erweist sich die Zugversuchprüfung von Kleberverbindungen als eine wenig aussagefähige Prüfung. Die Belastung entspricht nicht den in der Praxis vorkommenden Bedingungen. Als Ausgangswert für Berechnungen ist das Ergebnis des Versuches nicht geeignet, da im Kurzzeitversuch ermittelte Werte bei Kunststoffen einer Berechnung nicht zugrunde gelegt werden dürfen. Vielfach wird versucht, mit sogenannten Abminderungsfaktoren den Festigkeitsverlust bei einer Langzeitbelastung zu erfassen, um mit diesem Wert dann zu rechnen /2/. Dies ist jedoch problematisch. Das Bild 11 zeigt beispielhaft, wie unterschiedlich sich die Klebstoffe im Zeitstandsversuch verhalten, was zu verschiedenen Abminderungsfaktoren führt. Diese sind, von Ausnahmen abgesehen, jedoch nicht ermittelt worden. Der Versuch macht weiterhin keine Aussagen über die Verformbarkeit eines Klebstoffes.

Der Zugversuch läßt nur eine vergleichende Beurteilung von Proben zu, die unter gleichen Bedingungen hergestellt worden sind. So lassen sich beispielsweise qualitative Einflüsse auf das Alterungsverhalten von Kleberverbindungen erfassen. In

diesem Bereich dürfte der Zugscherversuch weiter mit Erfolg eingesetzt werden.

Seine große Bedeutung hat der Zugscherversuch nur deshalb erlangt, weil er einfach durchzuführen ist.

Ausblick

Da Kenndaten zur Dimensionierung von Klebverbindungen benötigt werden, die der Zugscherversuch nicht liefern kann, gilt es nach anderen Wegen zu suchen. Den nach DIN 54 454 ermittelten Schubspannungs-Gleitungs-Diagrammen kann nur ein Teil der benötigten Kennwerte entnommen werden. Das Diagramm gibt zwar einen guten Einblick in das Spannungs-Dehnungs-Verhalten einer Klebschicht, doch auch hier ist ein starker Einfluß der Klebschichtdicke auf das Prüfergebnis vorhanden /14, 15/. Außerdem handelt es sich wiederum nur um eine Kurzzeit- und nicht um eine Langzeitprüfung.

Viele Festigkeitsbetrachtungen sind auf die hochfesten Klebverbindungen mit 0,1 mm Klebschichtdicke ausgerichtet. Derartige Schichten lassen sich jedoch im allgemeinen nur mit hohem Aufwand erreichen. Wegen der Toleranzen der Füge-teile und der Probleme beim gleichmäßigen Klebstoffauftrag muß meistens auch mit dickeren Schichten gerechnet werden. Dickere Schichten führen jedoch bei einer Langzeitbelastung zu beträchtlichen Festigkeitsverlusten, Bild 12, da die Verbindung in steigendem Maße nur noch vom Klebstoff selbst bestimmt wird. Bei dickeren Schichten dürfte den mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes selbst, wie Bruchfestigkeit und -gleitung, E-Modul, Kriechmodul, Ermüdungsfestigkeit und so weiter, eine stärkere Bedeutung zukommen. Klebstoffeigenschaften lassen sich in vielen Fällen jedoch besser und einfacher an einer Substanzprobe ermitteln. Das dürfte auch für ein infolge von Wasseraufnahme und ähnlichem verändertes Verhalten gelten. Natürlich muß durch eine andere Prüftechnik, zum Beispiel durch Schälversuche, abgesichert werden, daß die notwendige Adhäsion dauerhaft erhalten bleibt. □

Literatur

- /1/ Matting, A.: *Metallkleben*, Springer Verlag, Berlin 1969
- /2/ Habenicht, Gerd: *Kleben, Grundlagen, Technologie, Anwendungen*; Berlin 1986
- /3/ Der Dubbel, *Taschenbuch für den Maschinenbau*, 13. Auflage 1974, Berlin
- /4/ N.N.: *UV-härtbare anaerobe Einkomponenten-Klebstoffe*, Firmenschrift der Omnitechnik, Hannover, 7/1986
- /5/ Otto, Günther: *Untersuchungen der Spannungen, Verformungen und Beanspruchungsgrenzen von Kunststoffschicht und Füge-teil bei einschneidig überlappten Metallklebverbindungen*, Diss, RWTH Aachen, 1978
- /6/ Hahn, O., Wender, B.: *Beanspruchungsanalyse von geometrisch und werkstoffmechanisch „unsymmetrischen“ Metallklebverbindungen mit der Finite-Element-Methode*, *Schweißen und Schneiden* 37 (1985) 2, S. 74-79
- /7/ Bischoff, Reinhard: *Einfluß unterschiedlicher Oberflächenbehandlungen auf Klebbarkeit, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit von Polypropylen*, Dissertation TU Berlin 1988, Hinterwaldner Verlag München 1988
- /8/ Althof, Walter: *Verformungs- und Festigkeitsverhalten von Klebverbindungen bei Kurz- und Langzeit-Beanspruchung*, *Fachtagung Fertigungssystem Kleben, TUB Dokumentation Kongresse und Tagungen, Heft 21*
- /9/ Schreyer: *Konstruieren mit Kunststoffen*, München, 1972
- /10/ Lehmann, H.: *Wichtige Einflußfaktoren für den praktischen Einsatz von Klebstoffen*, *Tagungsband Kleben Swiss Bonding 1987*, Darmstadt 1987
- /11/ Wellinger, K., Rembold, U.: *Verhalten von Metallklebverbindungen*, VDI-Z. 100 (1958) S. 41-48
- /12/ Matting, A., Draugelates, U.: *Die Schwingfestigkeit von Metallklebverbindungen*, *Adhäsion* 12 (1968) 5-22, 110-132, 161-176
- /13/ Kötting, Gerhard und Singh, Sunanjit: *Anforderungen an Klebstoffe für Strukturverbindungen im Karosseriebau*, *Adhäsion* 09 (1988) S. 19-26
- /14/ Wahono, Wiyu: *Untersuchung von geometrischen Einflußfaktoren auf das Festigkeitsverhalten überlappter Kunststoff-Metall-Klebverbindungen*, Diplomarbeit TU 1987
- /15/ Yi Xiao-Su: *Beitrag zum strukturabhängigen mechanischen Verhalten von Klebstoffschichten*, *Schweißtechnische Forschungsberichte Band 19*, Düsseldorf 1988
- /16/ Dorn, L. und Moniatis, G.: *Untersuchungen zum Zeitstandverhalten von Kunststoff-Metall-Klebeverbindungen*, *Konstruktion* 41 (1989) S. 245-249