

## Problematik der Prüfung von Polymer-Metall-Verbunden im Zugscherversuch

M. Rasche, Berlin

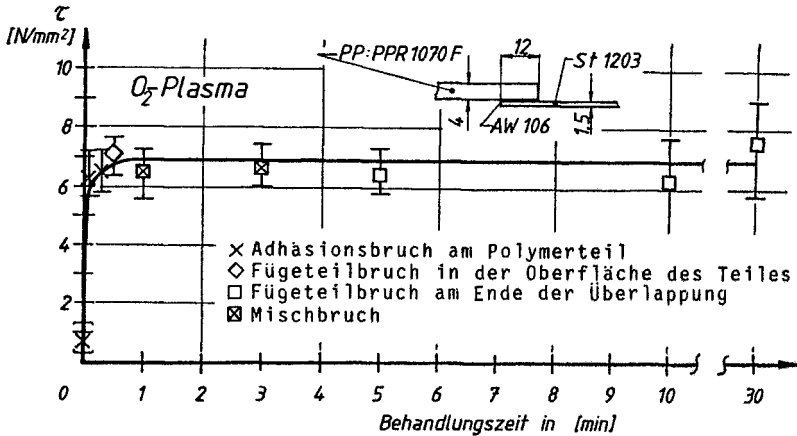
### Einleitung

Die Prüfung von Klebverbindungen erfolgt häufig im Zugscherversuch. Während ein entsprechender Versuch für Metallklebverbindungen genormt ist (1), wird diese Prüfmethode auch ohne Normung bei Polymer-Polymer- und Polymer-Metall-Klebverbindungen angewendet. Bei den Metallklebverbindungen sind meistens der Klebstoff oder der Adhäsionsbereich die schwächsten Teile der Verbindung. Im Gegensatz dazu erweist sich bei Polymer-Metall-Klebverbindungen häufig das Polymerfügeteil als schwächstes Glied der Zugscheprobe: Die Verbindungen versagen durch einen Bruch im Polymerteil.

Durch dieses Bruchverhalten wird die Aussagefähigkeit des Zugscherversuches stark eingeschränkt. Das gilt vor allem für die Optimierung der Oberflächenbehandlung der Polymerteile.

Bild 1 zeigt, wie sich die Klebfestigkeit von Polypropylen (PP)-Stahl-Klebverbindungen in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer des PP im Niederdruckplasma verändert. Bei einer Behandlungszeit von mehr als 5 min tritt keine Änderung in der Klebfestigkeit und im Bruchverhalten mehr ein, die PP-Teile brechen im Bereich des Endes der Überlappung durch das Stahlteil ab. Wegen der Brüche im Polymer kann jedoch nicht gesagt werden, ob zu diesem Zeitpunkt bereits die maximal mögliche Adhäsion zwischen dem PP und dem Klebstoff erreicht ist, oder nicht, da die Tragfähigkeit des Polymers nicht voll, sondern nur zu 80 % ausgenutzt wird.

Der Festigkeitsverlust ist bei sonst gleichen Versuchsbedingungen für andere Kunststoffe noch viel größer. Er beträgt bei glasfaserverstärktem Polyoximethylen (POM) 65% (2). Die Ursache für das Bruchverhalten ist der aufgrund der Gegebenheiten in der Probe entstehende ungleichförmige Belastungszustand.



**Bild 1** Klebfestigkeit von PP-Stahl-Kleilverbindungen mit Epoxidharz in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer des PP im Sauerstoffplasma

### Beanspruchung der Polymer-Metall-Kleilverbindungen im Zugscherversuch

Wird eine einschnittig überlappte Polymer-Metall-Kleilverbindung im Zugscherversuch geprüft, so entsteht in der Klebschicht und in den Fügeteilen eine inhomogene mehrachsige Belastung (3). Die örtlich vorhandene Beanspruchung ist in Teilbereichen der Klebschicht wesentlich höher, als die für diese Verbindung nach DIN 53 283 (1) ermittelte Klebfestigkeit. Das gleiche gilt für die Spannungen in den Fügeteilen. Auch hier treten starke Abweichungen von der fiktiven Mittelspannung auf.

Zur Spannungsverteilung in der Klebschicht und in den Fügeteilen einschnittig überlappter Metall-Kleilverbindungen beim Zugscherversuch sind mehrfach Berechnungen und Untersuchungen durchgeführt worden. Neuere Arbeiten, bei denen von linear-elastischen Werkstoffverhalten ausgegangen wird, wurden von G. Otto (3) und von O. Hahn und B. Wender (4) veröffentlicht. Letztere gehen

bei ihren Berechnungen auch auf das Kleben verschiedener Metalle ein. Auf die angeführten Arbeiten soll im folgenden Bezug genommen werden.

Die Spannungsverteilung in der Klebschicht zeichnet sich dadurch aus, daß an den Überlappungsenden Spannungsspitzen sowohl der Normal- als auch der Schubspannung auftreten. In Bild 2 sind die von O. Hahn und B. Wender (4) ermittelten Vergleichsspannungen in den Fügeiteilen einer Stahl-Aluminium-Klebverbindung wiedergegeben. Deutlich zeigen sich Spannungsmaxima im Bereich der Überlappungsenden, wobei das Spannungsniveau im Teil mit dem geringen E-Modul niedriger ist.

Bei Polymer-Metall-Klebverbindungen sind qualitativ ähnliche Spannungsverteilungen zu erwarten. Ihre Form und Höhe ist jedoch gegenüber den für Metallklebverbindungen ermittelten Spannungsspitzen verändert, weil sich ein Polymerteil in der Klebverbindung anders verformt als ein Metallteil (2).

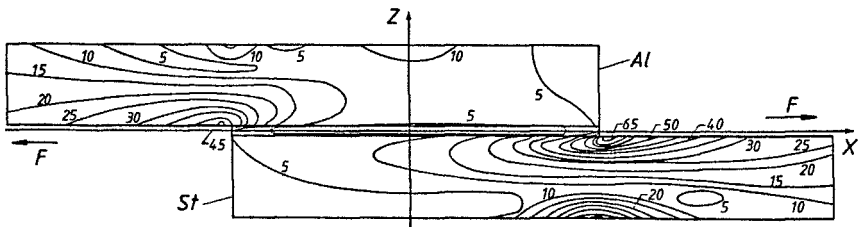


Bild 2 Fügeiteilspannungen in Metallklebverbindungen nach O. Hahn und B. Wender (4)

Mit den ermittelten Vergleichsspannungen allein kann jedoch das Bruchverhalten der Polymerfügeteile nicht erklärt werden. In die Überlegungen muß das Werkstoffverhalten mit einbezogen werden. Wie Versuche gezeigt haben, gibt es Werkstoffe, die in der Lage sind, die Spannungsspitzen im Bereich der Überlappungsenden zu ertragen, ohne daß der Bruch an dieser Stelle eintritt. Die Verbindungen versagten außerhalb des Fügebereiches im Fügeiteil. Zu

diesen Werkstoffen gehört AlMg1 F10 in Stahl-Aluminium-Klebverbindungen (5) und Polyethylen in PE-Stahl-Klebverbindungen (2).

Da das Bruchverhalten von Polymer-Metall-Klebverbindungen, z.Z. rechnerisch nicht erfaßt werden kann, müssen die Einflußparameter auf das Tragverhalten dieser Verbindungen experimentiell unter-



Bild 3 Zugscherprobe mit prinzipiellem Verlauf des Kraftflusses

sucht werden. Das Bild 3 zeigt eine Zugscherprobe und den prinzipiellen Verlauf des Kraftflusses. Die Spannungen in der Probe werden durch:

- das **Verformungsverhalten** der Fügepartner Polymer, Klebstoff und Metall,
- und durch die **Fügeteilgeometrie**: Überlappungslänge  $l_{\bar{u}}$ , Fügeteildicke  $a$ , Fügeteilbreite  $b$ , Klebschichtdicke  $d$  sowie die Form der Fügeteile am Überlappungsende beeinflusst.

Die Probenform und das unterschiedliche Werkstoffverhalten der Fügeteile führen dazu, daß bei Belastung

- die von Volkersen (6) beschriebene ungleichmäßige Spannungsverteilung entsteht,
- aufgrund der außermittigen Krafteinleitung eine Biegebeanspruchung eintritt,
- die Formdiskontinuität zur Umlenkung des Kraftflusses und damit zu Kerbwirkung führt,
- die Stoffdiskontinuität eine Verformungsbehinderung im Polymeren erzeugt.

Während die von Volkersen beschriebene ungleichmäßige Spannungsverteilung, die Biegebeanspruchung, die Kerbwirkung und die

Verformungsbehinderung den Spannungszustand und die Spannungsverteilung qualitativ beeinflussen, bestimmen die Parameter Füge- teilgeometrie und Verformungsverhalten die Höhe der Belastung. Die Auswirkung einer Kerbe (Formdiskontinuität) und einer Verformungsbehinderung (Stoffdiskontinuität) sind in ihrer Wirkung auf Spannungen tendenziell gleich (7). Beide führen zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung mit Spannungsspitzen. Außerdem wird aus einem einachsigen Spannungszustand ein mehrachsiger.

Der Einfluß der Biegung, der Kerbwirkung und der Verformungsbehinderung auf die Klebfestigkeit und das Bruchverhalten sollen im Folgenden dargestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich die Auswirkungen der oben aufgeführten Einflußgrößen gegenseitig verstärken können.

### Kerbwirkung

Bei Polymeren muß, je nach Werkstoff, mit zum Teil beträchtlichen Festigkeitsverlusten infolge von Kerbwirkung gerechnet werden. Um den Einfluß der durch die Fügeteilgeometrie entstehenden Kerbwirkung auf die Klebfestigkeit zu klären, wurde das Stahlteil in POM-Stahl-Klebverbindungen am Überlappungsende schrittweise immer mehr zugespitzt. Mit zunehmender Anchrägung des Stahlteiles änderte sich sowohl die Kerbwirkung als auch die Verformbarkeit der Spitze des Stahlteiles. Mit zunehmender Anchrägung nimmt die Kerbwirkung ab. Es stellt sich jedoch heraus, daß die Klebfestigkeit durch das Anchrägen des Stahlfügeteiles nicht beeinflußt wird.

Als Ergebnis dieses Versuches läßt sich sagen, daß die Kerbwirkung bei den gegebenen Bedingungen keinen Einfluß auf die Klebfestigkeit hat. Es kann jedoch nicht gefolgert werden, daß bei POM in Klebverbindungen keine Kerbwirkung auftritt. Vielmehr ist zu vermuten, daß der Einfluß der geometrischen Kerbwirkung von anderen Einflüssen überdeckt wird.

Kerbwirkung tritt jedoch nicht nur in den bisher behandelten Fällen ein. Auch Materialanhäufungen am Werkstück können zu Kerbwirkung führen (8). Eine Materialanhäufung bei einer Polymer-Metall-Klebverbindung ist der Klebstoffwulst auf dem Füge teil. Bei Polystyrol (PS)-Stahl-Klebverbindungen mit Epoxidharz wurde festgestellt, daß hier der Füge teilbruch am ausgeprägten Klebstoffwulst entlanglief (2). In einem Versuch konnte gezeigt werden, daß eine Klebstoffraupe auf einem PS-Teil das Bruchverhalten des Polymers während der Zugprüfung beeinflussen kann. Der Einfluß der Raupe ist von der Verformungsfähigkeit des Klebstoffes abhängig.

#### Verformungsbehinderung des Polymerteiles

Polymere und Metalle haben ein sehr stark voneinander abweichendes Verformungsverhalten. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) der Metalle ist um den Faktor 100 größer als der E-Modul der Polymere (9), d.h. bei gleichem Querschnitt und gleicher Last ist die Dehnung eines Polymers einhundertmal größer als die Dehnung eines Metalls.

In einer Klebverbindung sind Polymere und Metalle durch den Klebstoff stoffschlüssig miteinander verbunden. Sie können sich daher bei einer Belastung nicht mehr so verformen, wie es ihrem Spannungs-Dehnungs-Verhalten entspricht, sondern sie beeinflussen einander. Während das Metall mit dem größeren E-Modul die Verformung des Polymers behindert, geht vom Polymerteil mit dem geringeren E-Modul eine verformungsverstärkende Wirkung auf das Metallteil aus. Dieser Effekt der behinderten bzw. verstärkten Verformung tritt nicht nur in Lastrichtung auf. Wegen der unterschiedlichen Querkontraktionen kommt es auch in dieser Querrichtung zur Verformungsbehinderung bzw. -verstärkung.

Bei der gegebenen Geometrie der Klebverbindungen ist das Metallteil wesentlich höher belastbar als das Polymerteil. Dies wird auch daran deutlich, daß bei keinem der Versuche ein Bruch

im Metallteil aufgetreten ist. Daher wird die Auswirkung der Verformungsverstärkung auf die Tragfähigkeit der Metallteile nicht untersucht. Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf die Verformungsbehinderung im Polymer.

Verformungsbehinderungen erzeugen im Bauteil bei Belastung zusätzliche Spannungen. "Diese Spannungen können recht beträchtliche Werte annehmen und eine nicht unerhebliche Wirkung auf die Haltbarkeit oder Steifigkeit einer Konstruktion ausüben." (10)

Für eine Aluminium-POM-Klebverbindung soll die Verformungsbehinderung erläutert werden. In Bild 4 ist für die Fügeworkstoffe AlMg3F26 und POM C 9021 das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aufgezeigt. Beim POM wurde wegen der hohen Bruchdehnung auf die Gesamtdarstellung der Kurve verzichtet. Gestrichelt sind die Mittelspannungen und die mittleren Dehnungen eingezeichnet, die in den Fügeteilen herrschen, wenn die oben rechts skizzierte Klebverbindung eine Klebfestigkeit von  $\tau = 8 \text{ N/mm}^2$  aufweist. Bei dieser Spannung kommt es häufig zum Bruch im POM-Fügeteil.

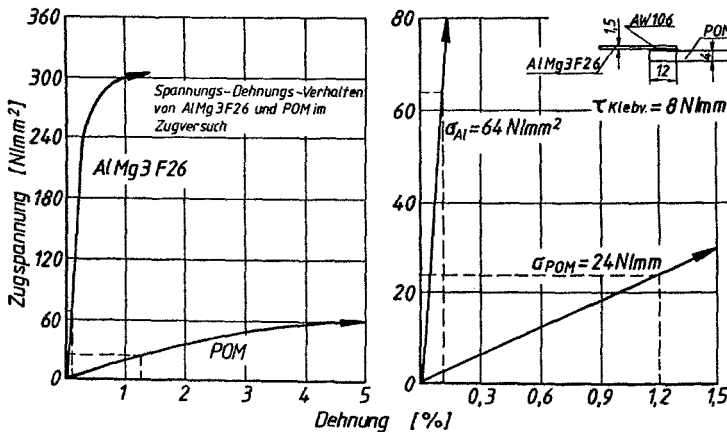
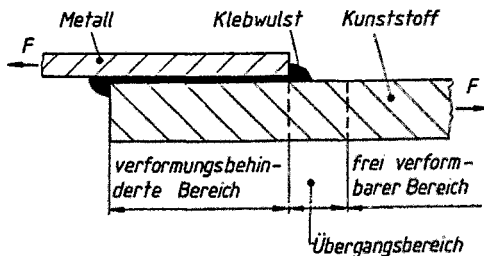


Bild 4 Darstellung der Spannungen in den Fügeteilen und der Verformungsbehinderung des POM beim Bruch einer POM-AlMg3F26-Klebverbindung

Um die Verformungsbehinderung deutlich zu zeigen, ist der Anfang des Spannungs-Dehnungs-Verlaufes im rechten Teil des Bildes noch einmal vergrößert dargestellt. Bei einer Klebfestigkeit von  $\tau = 8 \text{ N/mm}^2$  ist im Aluminiumteil eine mittlere Spannung von  $\sigma = 64 \text{ N/mm}^2$  und im POM-Teil von  $\sigma = 24 \text{ N/mm}^2$  vorhanden. Bei diesen Spannungen dehnt sich bei freier Dehnung das Aluminiumteil um 0,1% und das POM-Teil um 1,2 %. Da das Polymer durch den Klebstoff mit dem Aluminium relativ fest verbunden ist, entsteht im Bereich der Überlappung im POM-Teil eine Verformungsbehinderung. Sie ist dort am größten, wo im POM-Teil noch die gesamte Spannung vorhanden ist und das Aluminiumteil nur eine geringe Belastung hat, also auch nur eine geringe Dehnung aufweist. Das ist am Beginn der Überlappung des Aluminiums auf dem POM der Fall. Die Verformungsbehinderung tritt hier nicht nur in Längsrichtung des Polymererteiles auf, sondern auch in der Breite des Fügeteiles, da auch die Querkontraktion behindert wird.

In ausreichender Entfernung vom Ende der Überlappung ist das POM-Teil wieder frei verformbar und gehorcht in diesem Bereich seinem Spannungs-Dehnungs-Gesetz. Zwischen dem verformungsbehinderten und dem frei verformbaren Bereich befindet sich ein Übergangsbereich, in dem die Verformungsbehinderung und ihre spannungserhöhende Wirkung abklingt. In diesem Übergangsbereich kann sich der



**Bild 5** Schematische Darstellung der unterschiedlichen Verformungsbereiche in einer Polymer-Metall-Klebung



Klebwulst einer Klebverbindung befinden. In diesem Falle addieren sich die Auswirkung der Verformungsbehinderung und die Kerbwirkung des Klebwulstes. Bild 5 zeigt schematisch die drei Verformungsbereiche einer Klebverbindung.

Durch die Verformungsbehinderung kommt es jedoch nicht nur zu einer Erhöhung der Spannungen, sondern auch zu einer Veränderung des Spannungszustandes. So kann durch die Verformungsbehinderung aus einem einachsigen ein mehrachsiger Zugspannungszustand werden (10). Ein mehrachsiger Spannungszustand hat im Werkstoff eine gleitungsbehindernde Wirkung (11), was einer Versprödung des Werkstoffes gleichkommt. So wurde an Metallen festgestellt, daß bei einem mehrachsigen Zug- bzw. Druckspannungszustand der Gewaltbruch in der Regel als Trennbruch erfolgt (11); ein deutliches Zeichen dafür, daß die Verformung der Bauteile stark behindert war.

An einigen Versuchen sollte der Einfluß der Verformungsbehinderung des Polymers durch das aufgeklebte Metallteil aufgezeigt werden. Auf 250 mm langen, 25 mm breiten und 4 mm dicken Teilen aus POM sind in der Mitte 50 mm lange Metallteile aufgeklebt worden, Bild 6. Diese Teile wurden in der Zugprüfmaschine unter gleichen Bedingungen wie Zugscherproben geprüft. Bei dieser Probenanordnung muß ein Teil des Kraftflusses von den Polymerteilen in die aufgeklebten Metallteile übergeleitet werden. Hierbei nehmen die Metallteile wegen des höheren E-Moduls den größeren Teil der Prüfkraft auf. Das in seiner Verformung behinderte Polymerteil kann nur einen kleineren Anteil der Prüfkraft übernehmen. Von besonderem Interesse ist das Verhalten der Polymerteile am Beginn bzw. Ende des aufgeklebten Stahlteiles, da hier der größte Teil der Kraft umgelenkt werden muß.

Es wurden 3 unterschiedliche Anordnungen der Metallteile untersucht:

- 1) einseitig gedoppelt mit 1 mm dickem Blech,
- 2) beidseitig gedoppelt mit 1 mm dickem Blech und
- 3) beidseitig gedoppelt mit 50 µm dickem amorphen Metall.

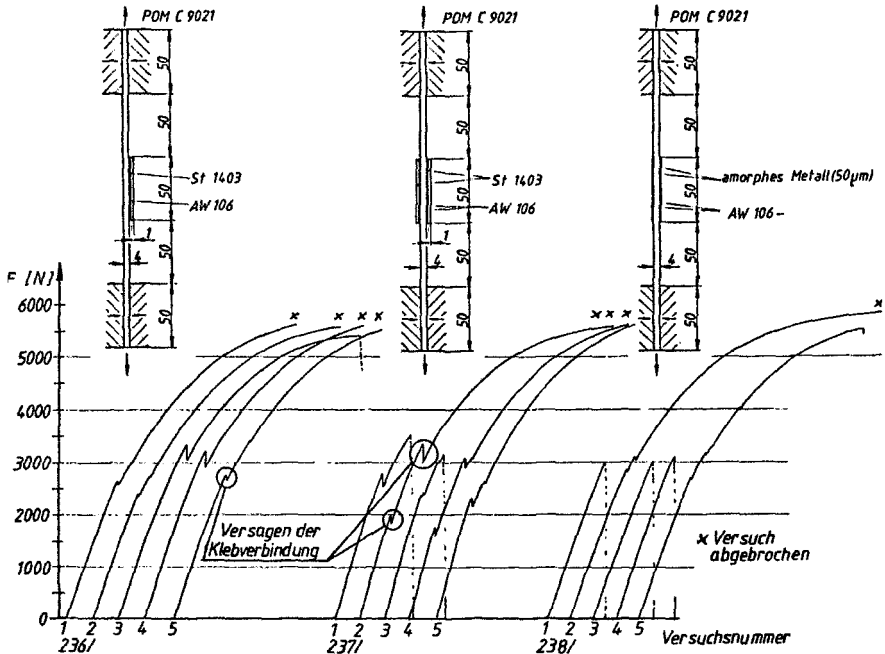
Bei den einseitig gedoppelten Proben ist mit einem inneren Biegemoment in der Probe zu rechnen, welches gegebenenfalls zu einer Verbiegung des Prüfteiles führen kann. Die doppelt gelaschten Proben können diese Verformung nicht zeigen, da sich die inneren Momente, wegen der symmetrischen Anordnung der Metallteile gegenseitig aufheben.

Das amorphe Metall wurde verwendet, weil wegen der geringen Dicke der Folie keine geometrische Kerbwirkung vorhanden ist. Außerdem ist hier die Behinderung der Querkontraktion des Polymers vermindert, da sich das amorphe Metall gegebenenfalls auffalten kann, siehe Bild 7. Die Verformungsbehinderung in Probenlängsrichtung bleibt jedoch erhalten. Somit kann an diesen Proben die Auswirkung einer Verformungsbehinderung auf das Polymerteil gut dargestellt werden. Das Ergebnis dieser Versuche zeigt Bild 6.

Unter den Probenanordnungen sind die Kraft-Verlängerungs-Verläufe für die einzelnen Proben abgebildet. An den Stellen, wo die Kurven einen Knick aufzeigen, hat eine Klebverbindung versagt, so daß die Verformungsbehinderung ganz oder teilweise aufgehoben wurde. Da sich jetzt das Polymer in diesem Bereich frei dehnen kann, fällt die Kraft schlagartig ab. - Die Zugprüfmaschine arbeitet mit kontinuierlicher Prüfgeschwindigkeit; somit kann sich die Aufhebung der Vorformungsbehinderung des Polymers nur in einem Abfall der Prüfkraft äußern.

Bei den einfach gedoppelten Polymerteilen versagten die Klebverbindungen im Bereich um 3000 N Prüfkraft. Bei allen 5 Proben löste sich während der Prüfung das Metallteil vom Polymerteil ab. Somit kam es nicht zum Fügeteilbruch im Polymerteil und die Versuche wurden abgebrochen. In diesen Fällen wurden die Polymerteile durch die aufgeklebten Blechteile kaum beeinträchtigt. Lediglich beim Teil 236/3 trat, allerdings bei einer sehr hohen Prüfkraft, ein Bruch im Polymerteil ein. Bei diesem Teil hatte die Klebverbindung erst bei einer hohen Belastung versagt. Hierbei ist offensichtlich das Polymerteil geschädigt worden, was dann zum Bruch führte.

Bei den beidseitig gedoppelten Proben versagen die Klebverbindungen auf einem niedrigeren Niveau als die einseitig gedoppelten Proben. Hier brechen sogar zwei Proben im Polymerenteil ab.



**Bild 6:** Prüfanordnung und Kraft-Verlängerungs-Diagramme von gedoppelten POM-Teilen

Von den mit amorphem Metall gedoppelten Proben brechen 3 Proben im Polymer bei  $F_B = 3000$  N, eine Probe bei  $F_B = 5000$  N, während eine Probe nicht versagt. Bei den beiden zuletzt erwähnten Proben hatte jedoch vorher bei einer geringeren Prüfkraft die Klebverbindung versagt. Wie Bild 7 zeigt, brechen die 3 Proben, bei denen sich die Klebverbindung nicht gelöst hat am Überlappungs-ende durch das amorphe Metall ab.

Ein ähnlich "konkurrierendes Bruchverhalten" bei dem, wie bei den dargestellten Proben, der Füge teilbruch entweder im Oberflächen-

bereich des Polymers verläuft oder quer durch das Polymer geht, ist auch bei Zugscherproben festgestellt worden (2).

Die mit 1 mm dickem Blech gedoppelten POM-Teile brechen bei einer geringeren Belastung, als die mit amorphem Metall gedoppelten Teile. Da die geometrische Kerbwirkung der dickeren Blechteile,



Bild 7: Bruchstellen von mit amorphem Metall gedoppeltem POM

wie oben festgestellt wurde, offensichtlich keinen Einfluß auf die Bruchkraft hat, muß das verringerte ertragbare Belastungsniveau auf die erhöhte Verformungsbehinderung durch die dickeren Blechteile zurückgeführt werden, die auch zu einer Behinderung der Querkontraktion im Polymer führt.

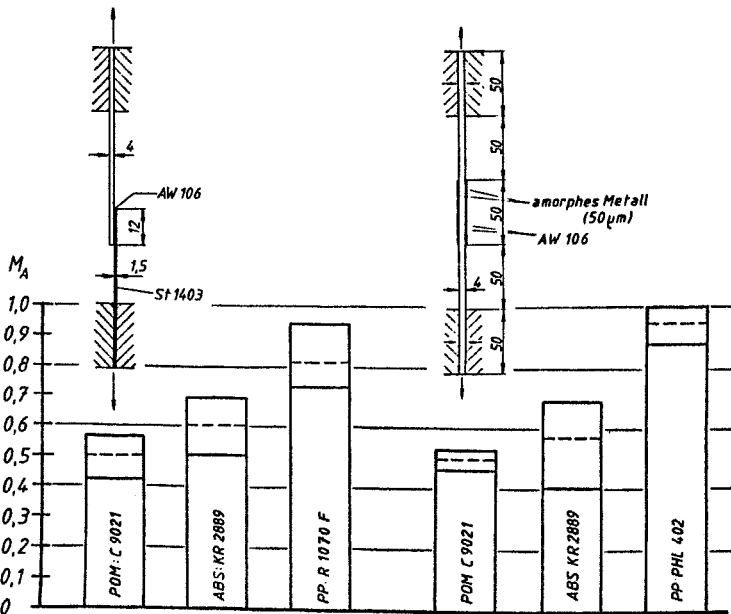
### Biegung

Das innere Biegemoment in den gedoppelten Proben, welches dadurch entsteht, daß die Prüfkraft vom Polymer in das Metallteil übergeleitet werden muß, hat bei den einseitig gedoppelten PP-Proben zu einer bleibenden Verformung von Polymerteil und aufgeklebten Blechen geführt.

Bei den oben vorgestellten Versuchen versagten diejenigen Proben, die sich biegen können erst bei einer höheren Belastung, als Proben, bei denen keine Biegung auftritt. Das Ergebnis deckt sich mit dem anderer Versuche (2). Die Ursache für dieses Verhalten dürfte auf einer Stützwirkung der geringer belasteten Bereiche des Teiles beruhen, die sich nur dann einstellen kann, wenn sich die Teile verformen können.

### Vergleich

Bei einem Vergleich der Materialausnutzung von Zugscherproben und von den mit amorphem Metall gedoppelten Proben, Bild 8, stellt sich heraus, daß in beiden Fällen für die drei untersuchten



**Bild 8:** Vergleich der Materialausnutzung von einschnittig überlappten Klebverbindungen mit zweiseitig gedoppelten (amorphes Metall) Klebproben

Polymere werkstoffabhängig die gleiche Tendenz vorhanden ist. Hieraus kann gefolgert werden, daß die Verformungsbehinderung des Polymerteiles, auch bei einschnittig überlappten Polymer-Metall-Klebverbindungen, der dominierende Faktor ist. - Beim Vergleich der für PP ermittelten Werte muß beachtet werden, daß hier zwei unterschiedliche PP-Typen vorliegen.

### Bruchverhalten

Abschließend soll noch ein Bruch im PP bei einer zweifachen Doppelung mit 1 mm dickem Blech besprochen werden. Bild 9 zeigt den Riß im PP, der, von der Kante des Bleches ausgehend, ins PP hineingelaufen ist. An diesem Riß wird dreierlei deutlich:

1. Der Riß läuft durch PP, das keine Crazes aufweist. Nur an der Rißspitze haben sich Crazes gebildet, die von dort aus strahlenförmig in das Polymer hineinreichen. Da sich bei PP, das sich frei verformen kann, vor dem Bruch Crazes bilden, kann geschlossen werden, daß hier ein verformungsbehinderter Bruch eingetreten ist. Das hier beschriebene Bruchverhalten deckt sich mit dem bereits beschriebenen Bruchverhalten von Metallen bei verformungsbehindertem Bruch (11). Erst nachdem durch den Riß die Verformungsbehinderung des aufgeklebten Metallteiles aufgehoben ist, bilden sich bei weiterer Belastung



Bild 9: Anriß in einem zweifach gedoppelten PP-Teil

an der Rißspitze Crazes. Die Verformungsbehinderung macht sich auch an der Bruchdehnung bemerkbar. Der gezeigte Bruch ist bei einer Dehnung von etwa 8 % eingetreten. Dies ist nur ein kleiner Teil der Bruchdehnung von 165 % im Zugversuch. Die verformungsbehindernde Wirkung des aufgeklebten Metallteiles wird hier im Bruchverhalten des PP sichtbar.

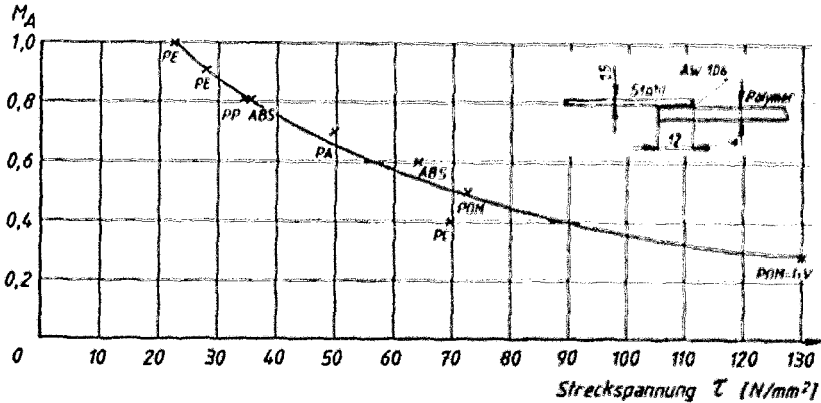
2. Der Riß geht nur von einem der beiden aufgeklebten Bleche aus und ist lediglich auf dieser Seite der Probe vorhanden. Damit zeigt sich deutlich, daß die aufgeklebten Bleche die Verformung des Polymerteiles unterschiedlich stark behindern. Da sonst alle Parameter gleich sind, kann eine unterschiedlich dicke Klebschicht und/oder der unterschiedlich ausgebildete Klebwulst für dieses Verhalten verantwortlich sein.
3. Der Riß ist am Überlappungsende durch das Stahlteil entstanden obwohl ein sehr dicker Klebwulst vorhanden ist. In diesem Fall war die Verformungsbehinderung immer noch größer als die entlastende Wirkung des Klebwulstes.

### Werkstoffeinfluß

Den Einfluß des Polymerwerkstoffes auf die Tragfähigkeit von Polymer-Metall-Klebverbindungen zeigt Bild 10. Hier ist die Materialausnutzung der Polymere in Abhängigkeit von ihrer Streckspannung aufgetragen.

Die Materialausnutzung beträgt bei einem PE-Typ 100 %. Pe weist eine geringe Festigkeit und eine hohe Bruchdehnung auf. Dieser Werkstoff ist offensichtlich in der Lage, die örtlich auftretenden Spannungsspitzen aufzunehmen, ohne daß die Tragfähigkeit des Kunststoffes beeinträchtigt wird. Mit steigender Polymerfestigkeit und vermindertem Verformungsvermögen wird die Materialausnutzung schlechter. Bei glasfaserverstärktem POM werden nur noch 30 % der Materialfestigkeit ausgenutzt, obwohl auch bei diesem Werkstoff die Verbindung im Polymerteil versagte. Der Bruch verläuft, wie durch REM-Aufnahmen nachgewiesen wurde, in der Oberfläche des POM-Teiles. Dieses Polymer ist nicht in der Lage, die

Spannungsspitzen abzubauen; die Verbindungsfestigkeit liegt weit unterhalb der Materialfestigkeit des POM.



**Bild 10** Materialausnutzung des Polymerteiles in Polymer-Stahl-Kleilverbindungen

Die ermittelte Materialausnutzung scheint, abgesehen von PC, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Festigkeitsverlust des Polymers und seiner Bruchspannung im Zugversuch aufzuzeigen. Dieser eindeutige Zusammenhang dürfte jedoch nur zufällig sein. Wie oben gezeigt worden ist, treten im Polymerteil einer Polymer-Metall-Kleilverbindung Spannungskonzentrationen auf, die zum Bruch des Teiles führen. Diese Spannungskonzentrationen sind beim Zugversuch nicht vorhanden. Folglich werden bei der Ermittlung der Materialausnutzung Bruchspannungen miteinander verglichen, deren Vergleich streng genommen wegen der unterschiedlichen Spannungszustände nicht zulässig ist. Somit muß ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Materialausnutzung und der Bruchspannung der Polymere im Zugversuch nicht vorhanden sein. Demnach gibt die Kurve lediglich die generelle Aussage wieder, daß hoherfeste Polymere kerbempfindlicher sind und Spannungskonzentrationen weniger gut ertragen können, was zu einer schlechteren Materialausnutzung führt.



### Folgerungen

Da der Zugscherversuch aufgrund des Spannungszustandes nur eingeschränkte Aussagen über die Haftfestigkeit von Polymer-Metall-Klebinverbindungen gibt, gilt es, nach anderen Prüfverfahren zu suchen, die bessere Aussagen ergeben. Insbesondere, wenn es um die Optimierung der Haftfestigkeit durch Vorbehandlung geht, dürften Prüfverfahren, die überwiegend Normalspannungen erzeugen, besser geeignet sein. Derartige Prüfmethoden sind der Biegeschälversuch, der Keiltest, sowie ein Zugversuch mit verklebten Rohren.

### Literatur

- (1) DIN 53283, September 1979
- (2) M. Rasche: Qualitätsbestimmende Einflußgrößen bei Kunststoff-Metall-Klebinverbindungen, Diss. TU Berlin, erscheint demnächst im DVS-Verlag
- (3) G. Otto: Untersuchung der Spannungen, Verformungen und Beanspruchungsgrenzen von Kunststoffschicht und Fügeglied bei einschnittig überlappten Metallklebinverbindungen, Diss. RWTH Aachen 1978
- (4) O. Hahn, B. Wender: Schweißen und Schneiden 37(1985)2
- (5) G. Breuel: Studienarbeit an der TU Berlin, Fachgebiet Füge-/Schweißtechnik
- (6) O. Volkersen: Energie und Technik (1953)3
- (7) D. Aurich: Bruchvorgänge in metallischen Werkstoffen, Karlsruhe 1978
- (8) H. Neuber: Kerbspannungslehre, Berlin 1985
- (9) H. Käufer: Arbeiten mit Kunststoffen, Berlin 1978
- (10) A. Thum, C. Petersen, O. Svenson: Verformung, Spannung und Kerbwirkung, Düsseldorf 1980
- (11) A. Thum, K. Federn: Spannungszustand und Bruchausbildung, Berlin 1939