

Muss es immer groß sein?

2K-Verbundhaftung – Betrachtung und Vergleich von Prüfmethoden

Bei Hart-Weich-Bauteilen stellt die Güte der Verbundhaftung zwischen den kombinierten Werkstoffen ein entscheidendes Kriterium für die Qualität dar. Bestehende Prüfnormen sind unzureichend und besonders die Übertragung von Ergebnissen großer bzw. Standard-Prüfkörper auf geometrisch kleine Bauteile ist bedenklich.

Polymerer Hart-Weich-Verbindungen haben in den letzten Jahren einen breiten Einzug in die Kunststoffindustrie gehalten. Ob im Bereich von Automobilanwendungen mit Dichtelementen, für haptische Funktionen bei Consumer-Produkten oder auch in der Medizintechnik spielen Werkstoffkombinationen von weichen Kunststoffen, meist in Form thermoplastischer Elastomere oder Silikone in Kombination mit steifen Thermoplasten, eine zunehmend wichtige Rolle. Insbesondere rein thermoplastisch verarbeitbare Hart-Weich-Kombinationen bieten

Bei allen Hart-Weich-Bauteilen stellt die Güte der Verbundhaftung zwischen den kombinierten Werkstoffen ein entscheidendes Kriterium für Qualität und Lebenszeit des Kunststoffbauteils dar. Um diese Verbundhaftung qualitativ und quantitativ testen zu können, existieren unterschiedliche Testmethoden. Als geeignete Testmethode haben sich hier – auch in Anlehnung an existierenden Normen der Klebtechnik – diverse Schälversuche erwiesen, bei denen die Weichkomponente in einem festen Winkel (meist 90° oder 180°) vom Substrat abgezogen wird. Um

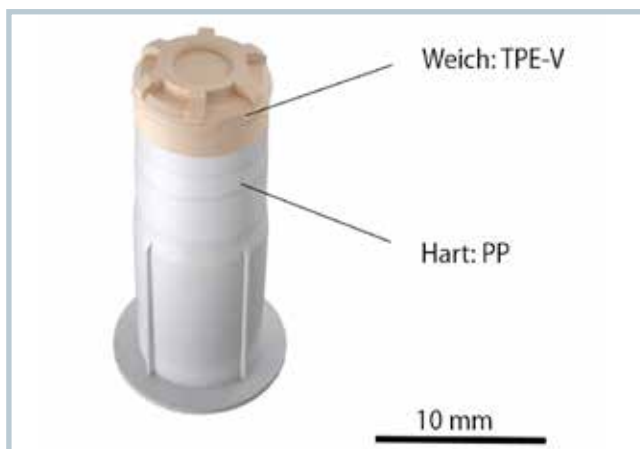


Bild 1. Beispielhaftes 2K-Bauteil: Reagenzien-Container eines biotechnologischen Diagnostik-Kits der Firma Curetis (Bilder: MedTech)

dabei zahlreiche Vorteile: Die thermoplastische Weichkomponente verhält sich bei Raumtemperatur elastisch, ist allerdings analog zu Thermoplasten durch ein Aufschmelzen bei erhöhten Temperaturen einfach zu verarbeiten und recycelbar. Kombinationen aus Polypropylen (PP) mit einem Styrol-Block-Copolymer (TPE-S) oder einem PP-EPDM-Blend (TPE-V) weisen ausgezeichnete Haftungswerte auf und versagen meist kohäsiv. Neben diesen klassischen TPE-Thermoplast-Kombinationen besitzen Verbundbauteile in Kombination mit Flüssigsilikon (Liquid Silicone Rubber, LSR) gesteigerte Beständigkeitseigenschaften gegenüber Medien sowie hohen und niedrigen Temperaturen. Diesen Vorteilen steht jedoch eine vergleichsweise aufwendige Verarbeitung im Spritzgießen entgegen.

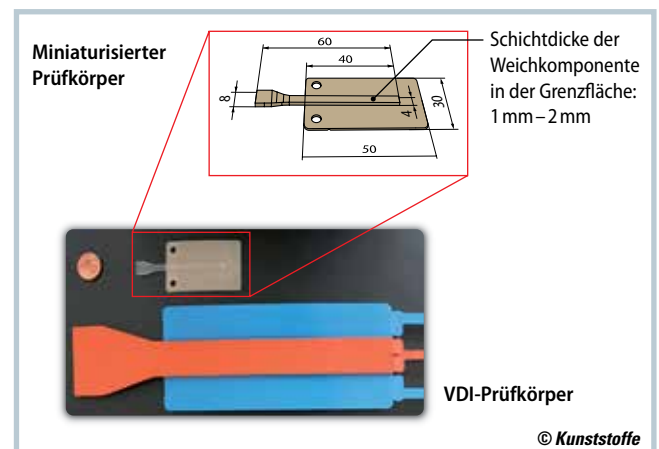


Bild 2. Miniaturisierter Prüfkörper (oben) im Vergleich zu VDI-Prüfkörper (unten)

die Testung zu vereinheitlichen, wurde 2012 eine VDI-Richtlinie zur „Prüfung der Haftung von thermoplastischen Elastomeren (TPE) an Substraten“ [1] herausgegeben. In der Richtlinie wird eine Prüfkörpergeometrie sowie eine Testmethode empfohlen, allerdings ist die Richtlinie u.a. aufgrund mangelhafter Festlegungen zur Angusswahl auf Kritik gestoßen [2] und befindet sich aktuell in Überarbeitung.

Problematik der Übertragbarkeit auf kleine Bauteile

Die VDI-Richtlinie legt außerdem die Geometrie des Prüfkörpers fest, der mit einer Grenzfläche von 20 mm x 150 mm bei einer Wanddicke von 2 mm für Substrat und TPE (bei einem weichen

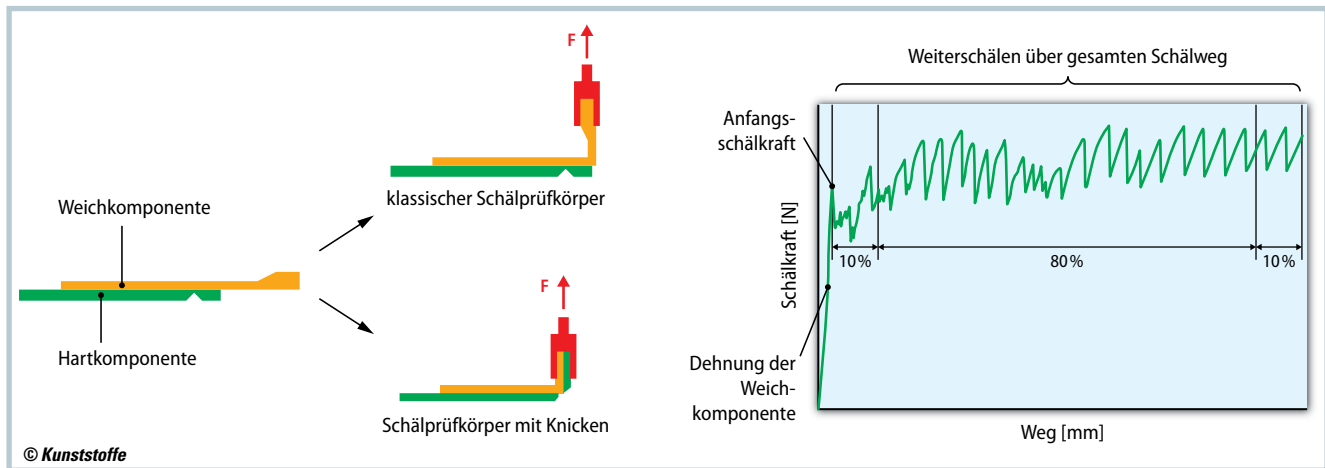


Bild 3. Miniaturisierter Prüfkörper mit Prüfvarianten und schematische Darstellung der Ergebnisse des Schälversuchs

TPE sind auch 3 mm möglich) im Vergleich zu vielen Kunststoffbauteilen, z. B. in der Medizintechnik, groß erscheint. Diese Größenverhältnisse des Prüfkörpers sind insbesondere bei der Übertragbarkeit auf kleine Kunststoffteile sowie dünne Wanddicken zu beachten. Spritzgegossene Bauteile weisen häufig dünne Wanddicken von < 1 mm auf, an die mittels Mehrkomponentenspritzgießen weiche Komponenten für dichtende, dämpfende oder haptische Funktionen angespritzt werden. Beispielhaft ist in **Bild 1** ein 2K-Reagenzien-Container aus einer Diagnostikanwendung, gefertigt von der Horst Scholz – High Tech in Kunststoff GmbH & Co. KG, Kronach, dargestellt. Hierbei ist der Container aus PP mit einem weichen Boden aus TPE-V gefertigt, der während der Diagnostikanwendung durchstoßen wird, um die Chemikalie zu entnehmen. Solche kleinen Bauteile sind bezüglich der Grenzfläche des Haftverbunds sowie bezüglich der Dicken der einzelnen Komponenten nur begrenzt mit dem Normprüfkörper vergleichbar. Zum einen sind die Wanddicken beider Komponenten von 0,4 mm bis 0,7 mm deutlich kleiner als bei dem Normprüfkörper, zum anderen beträgt auch die Grenzfläche zwischen TPE und Thermoplast nur einen Bruchteil der in der Norm festgelegten Grenzfläche.

Darüber hinaus ist im industriellen Umfeld bekannt, dass die Verbundhaftung von TPEs maßgeblich durch die Schichtdicke der Weichkomponente beeinflusst wird. Auch für LSR wurde bereits in früheren Untersuchungen gezeigt, dass die Schichtdicken der Haftpartner eine entscheidende Rolle für die Verbundhaftung spielen können. So beobachtet Ronnewinkel [3] für LSR-Thermoplast-Verbunde eine Zunahme der Schälkraft mit zunehmender LSR-Schichtdicke.

Außerdem führen dünnere Wanddicken zu anderen thermischen Verhältnissen im Spritzgießprozess. Untersuchungen zeigen, dass durch eine thermische Beeinflussung der Grenzschicht mittels dynamischer Formnesttemperierung die Verbundhaftung von TPE-Thermoplast-Verbunden gesteigert werden kann [4]. Folglich können veränderte Temperaturen in der Grenzschicht, die aufgrund der kleinen Bauteilgeometrien und unterschiedlicher Wärmeverhältnisse verursacht werden, zu geometrieabhängigen Haftungseigenschaften führen.

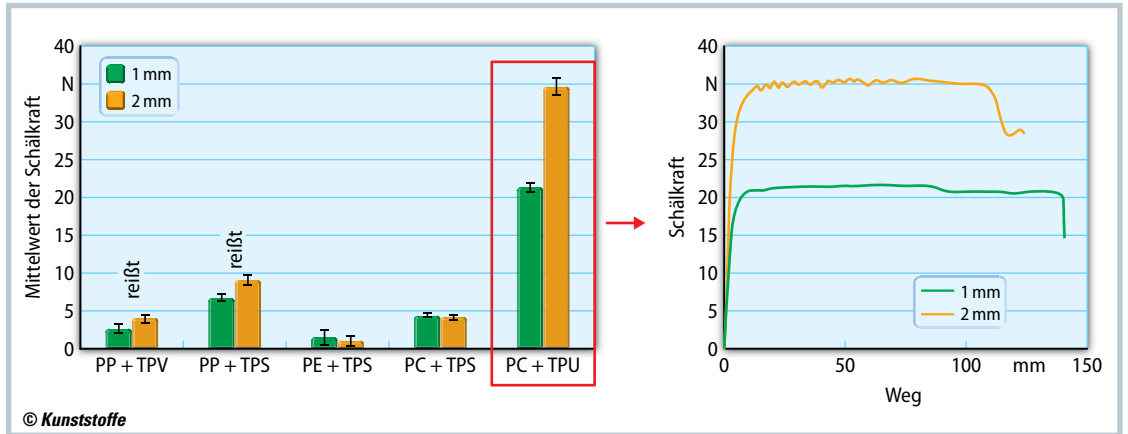
Zusätzlich ist zu beachten, dass die Entformungskräfte beim Spritzgießen mit dem Aspektverhältnis der Spritzlinge zunehmen [5]. Somit werden miniaturisierte Hart-Weich-Verbindun-

gen eventuell schon während der Entformung getrennt, während eine Fertigung in größeren Dimensionen aufgrund der insgesamt größeren Haftkraft und geringeren relativen Entformungskräfte möglich ist.

Neben diesen prozessbedingten Einflüssen auf die Verbundhaftung haben die Geometrie des Prüfkörpers und somit auch die Schichtdicke der Weichkomponente einen deutlichen Einfluss auf die mechanische Belastungssituation im Schälversuch. Durch eine erhöhte Schichtdicke vergrößert sich die Querschnittsfläche und somit auch die maximal mögliche Schälkraft, die theoretisch gemessen werden kann, bevor die Weichkomponente kohäsiv versagt. Außerdem spielt die Dehnung der Weichkomponente für die resultierende Kraft an der Schälfront eine wichtige Rolle. Dies beschreibt u. a. Kinloch et al. [6] in einem mechanischen Ansatz.

Folglich ist es fraglich, ob ein einziger Standard-Prüfkörper nach Norm für den Test der Verbundhaftung für alle Anwendungssituationen angebracht ist, da dieser die Größenverhältnisse zahlreicher kleiner Kunststoffbauteile mit dünnen Wanddicken nicht richtig abbildet. Vielmehr erscheint es zielfüh-

Bild 4. Einfluss der Dicke der TPE-Weichkomponente auf die Schälkraft



rend, die Geometrie und Belastungssituation der Anwendungssituation anzupassen.

Prüfkörper für miniaturisierte Anwendungen

Aus diesen Gründen wurde am Lehrstuhl für Medizintechnik der TU München in Kooperation mit der Firma Scholz – HTIK ein miniaturisierter Schälprüfkörper (Bild 2) entwickelt, um die Verbundhaftung nah an realen Bauteilgeometrien testen zu können. Die Prüfkörper bestehen vergleichbar zur VDI-Richtlinie und zu anderen Schälprüfkörpern aus einem festen Substrat (30 mm x 50 mm x 1 mm) und werden mit einem Elastomerstreifen auf einer Grenzfläche von 4 mm x 40 mm bei einer Dicke von 1 mm überspritzt. Daraus resultiert (abgesehen von der Dicke der Weichkomponente) eine Skalierung von ca. 1:5 im Vergleich zur VDI-Richtlinie. Um geometrische Skalierungseffekte im Schälversuch von Hart-Weich-Prüfkörpern zu analysieren, wird im Rahmen des Projekts der Einfluss von unterschiedlichen Dicken der Weichkomponente auf die Verbundhaftung untersucht. Hierfür wurde die Dicke der aufgespritzten Weichkomponente bei gleichbleibender Grenzfläche zusätzlich zu den 1 mm auf 2 mm erhöht. Außerdem sollen die Ergebnisse der miniaturisierten Prüfkörper in zukünftigen Studien mit VDI-Prüfkörpern oder anderen Standards qualitativ verglichen werden.

Die Prüfkörper werden per Einlegeverfahren und anschließend dem Überspritzen gefertigt. Für die entwickelte Schälprüfkörper-

geometrie wurde sowohl ein Thermoplast-Werkzeug (Scholz – HTIK) als auch ein Flüssigsilikon-Spritzgießwerkzeug (MedTech) umgesetzt. Damit können Silikon und TPE bei gleicher Geometrie gut bezüglich ihrer Haftungseigenschaften verglichen werden. Um eine gute Verbundhaftung bei den Silikon-Thermoplast-Verbunden zu erreichen, werden die thermoplastischen Substrate mit einem OpenAir-Plasma voraktiviert. Die Einstellungen der Plasmabehandlung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Verbundhaftung der Prüfkörper wird sieben Tage nach Fertigung mit einer Zwick Roell Z 2.5 (Hersteller: Zwick GmbH und Co. KG, Ulm) im 90°-Schälversuch getestet. Da die Miniaturisierung der Prüfkörpergeometrie in deutlich geringeren Schälkräften resultiert, wurde auf eine Nachstellung des 90°-Winkels über ein Schlittensystem nach VDI 2019 verzichtet. Reibungskräfte waren hier in Vorversuchen im Vergleich zu den gemessenen Schälkräften zu hoch. Um dennoch die Abweichung des Schälwinkels klein zu halten, wurde eine Drahtverlängerung (l = 500 mm) der Einspannung in Anlehnung an die Norm zur „Schälprüfung für flexibel / starr geklebte Proben“ (DIN EN 28510 / ISO 8510-1) [7] vorgesehen. Neben dem klassischen Test, bei dem die Weichkomponente in der Einspannung fixiert wird, ist durch eine Kerbe vergleichbar zu Ronnewinkel [3] ein Knicken der Probe möglich (Bild 3). So werden verfälschende Einflüsse durch eine Überspritzung an der Stirnseite des Plättchens umgangen und ein reproduzierbares Vorschälen ermöglicht. Durch das Einspannen von Hart- und Weichkomponente wird neben einem erleichterten Einspannen auch der Einfluss der Dehnung der Weichkomponente im Schälverlauf reduziert. Die Schälversuche wurden mit einer Vorkraft von 0,1 N und einer an den miniaturisierten Prüfkörper angepassten Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min getestet. Ausgewertet wird hier der Mittelwert der Schälkraft in einem Auswertebereich von 80 % des Schälwegs.

Schichtdicken beeinflussen die Schälkraft

Um den Einfluss der Geometrie und Dickenverhältnisse näher zu untersuchen, wurden zusätzlich unterschiedliche Dicken der Weichkomponenten bezüglich ihrer Verbundhaftung verglichen. In ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Dicke der abgeschälten, weichen Lasche das Ergebnis des Schälversuchs beeinflusst. Theoretisch sollte sich die Schälkraft mit zunehmender Dicke nicht ändern, solange die Grenzfläche des

Plasmaparameter OpenAir-Plasma		
Plasmaanlage	FG 5001, Plasmatrete GmbH, Steinhagen	
Düse	Rotationsdüse AGU026A	
Plasmaparameter	Frequenz Spannung Plasma-Cycletime Luftdruck	21 kHz 280 V 60 % 500 mbar
Behandlungsparameter	Düsenabstand zum Substrat Translationsgeschwindigkeit der Probe Behandlungszyklen	10 mm 10 m/min 2

Tabelle 1. Plasmabehandlung für die Steigerung der Verbundhaftung zwischen Flüssigsilikon und Thermoplast

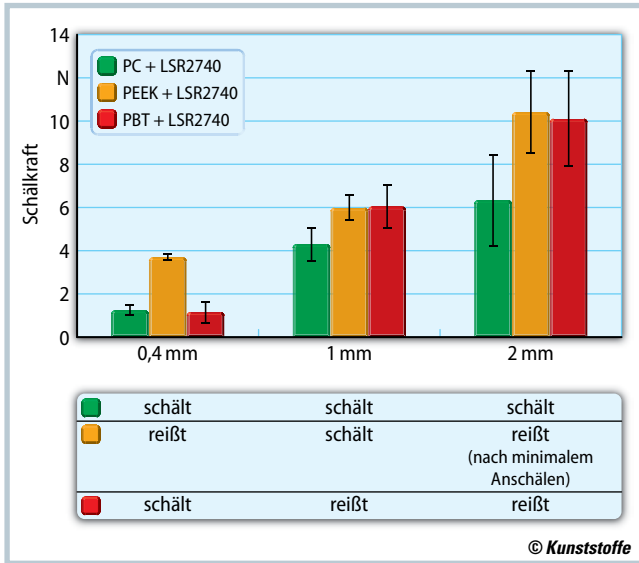


Bild 5. Schälkraft der LSR-Thermoplast-Prüfkörper in Abhängigkeit der LSR-Schichtdicke

Verbunds gleich bleibt. Dieses Verhalten wurde zwar bei zwei Werkstoffkombinationen beobachtet, allerdings treten auch gegensätzliche Phänomene zu Tage.

Beispielsweise kann bei einem PC-TPU-Verbund (Typ: Makrolon 2458, Hersteller: Bayer MaterialScience, Leverkusen; Typ: Elastollan 1170 A Shore 40A, Hersteller: BASF Polyurethan GmbH, Lemförde) bei einer Erhöhung der TPU-Dicke von 1 mm auf 2 mm ein Anstieg der Schälkraft um 62% beobachtet werden. Bei beiden Prüfkörpern ist ein gleichmäßiger Schälverlauf – allerdings mit verschobenem Kraftniveau erkennbar (**Bild 4**). Die Werkstoffkombinationen von PC (Typ: Makrolon 2458) mit einem haftungsmodifizierten TPS (Typ: Thermolast TM4ADT, Hersteller: Kraiburg TPE GmbH & Co. KG, Waldkraiburg) dagegen werden unabhängig von ihrer Schichtdicke bei einer konstanten Schälkraft abgeschält.

Bei Werkstoffkombinationen, die für ihre ausgezeichnete Verbundhaftung bekannt sind, wie beispielsweise PP (Typ: Purell HP570R, Hersteller: LyondellBasell Industries Basell Polyolefine GmbH, Wessling) + TPS (Typ: Thermolast TM4MED, Hersteller: Kraiburg TPE) und PP (Typ: Purell HP570R) + TPV (Typ: Santoprene 8281-med Shore 40A, Hersteller: ExxonMobil Chemical Europe, Machelen/Belgien), konnte man für beide getesteten Dicken jeweils nur ein kohäsives Versagen der Weichkomponente beobachten. Dies ist mit einem Kraftanstieg um 35% bzw. 48% verbunden, was sich durch die Zunahme der Querschnittsfläche und eine dadurch erhöhte Reißkraft des TPEs begründen lässt.

Bei den getesteten Flüssigsilikon-Thermoplast-Verbunden ist der Trend unabhängig vom Versagensmechanismus eindeutig: Eine Steigerung der LSR-Dicke bedeutet in allen getesteten Fällen eine Zunahme der gemessenen Schälkraft (**Bild 5**). Für die Fertigung der 2K-Prüfkörper wurden die Thermoplast-Plättchen zunächst mit OpenAir-Plasma vorbehandelt, um die Oberfläche chemisch zu aktivieren. Das Plättchen wird in das beheizte Werkzeug eingelegt und mit LSR (Typ: Silopren LSR2740, Hersteller: Momentive Performance Materials Inc., Columbus, OH/USA) überspritzt. »

Die beste Verbundhaftung wird hier bei den Verbindungen mit PBT (Typ: Ultradur (Pro) B 4520, Hersteller: BASF SE, Ludwigshafen) und PEEK (Typ: Victrex 151 G, Hersteller: Victrex plc, Thornton-Cleveleys, Großbritannien) in Kombination mit einer Plasmabehandlung erreicht. Bei PBT kommt es sowohl bei einer LSR-Dicke von 1 mm als auch 2 mm aufgrund der guten Verbundhaftung zu einem kohäsiven Versagen bei einem Kraftanstieg um 67%. Dagegen kann bei PEEK zwar die 1-mm-Lasche abgeschält werden, die Aufnahmen der Schälfläche bezeugen allerdings aufgrund der flächigen LSR-Rückstände auf den Thermoplasten eine ebenfalls gute Verbundhaftung. Der Anstieg der Schälkraft von 1 mm auf 2 mm beträgt hier 73%. Nur bei den Kombinationen von PC (Typ: Makrolon 2458 transp., Hersteller: Bayer MaterialScience) mit LSR2740 kann für beide Dicken ein Abschälen beobachtet werden, flächige Silikonrückstände belegen aber auch hier noch eine gute Verbundhaftung (**Bild 6**). Bei PC+LSR2740 kann durch die Erhöhung der Schichtdicke von 1 mm auf 2 mm ebenfalls ein Kraftanstieg um 47% beobachtet werden, obwohl bei beiden Proben ein Schälprozess stattfindet.

Der Einfluss der Elastomerdicke auf die Ergebnisse des Schälversuchs kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Auf der

einen Seite bewirkt eine größere Querschnittsfläche der Weichkomponente ein verändertes mechanisches Verhalten. Durch einen größeren Querschnitt dehnt sich das Elastomer weniger stark und das Elastomer reißt bei kohäsivem Versagen erst bei höheren Kräften. Außerdem könnte es zu einem veränderten Spannungszustand im Bauteil und somit zu anderen Kräfteverhältnissen an der Schälfront führen. Auf der anderen Seite kann aufgrund eines mit der Schichtdicke abnehmenden Oberflächen-Volumen-Verhältnisses und somit veränderten Temperaturverhältnissen im Fertigungsprozess tatsächlich eine Steigerung der Verbundhaftung erzielt worden sein.

Im Falle eines TPE-Thermoplast-Verbunds ist vor allem der Wärmeeintrag beim Überspritzen des Substrats entscheidend. Durch die warme Schmelze werden Interdiffusionsmechanismen und Verschlaufungen der Molekülketten in der Grenzfläche initiiert [8], die eine Verbundhaftung der beiden Haftpartner verursacht. Bei sehr dünnen Schichten des verwendeten Prüfkörpers sind hohe Oberflächen-Volumen-Verhältnisse und somit eine vergleichsweise schnelle Abkühlung der Schmelze im Werkzeug zu beobachten. Dagegen nimmt mit zunehmender Schichtdicke auch der Wärmeeintrag der Schmelze beim Überspritzen zu, wodurch erhöhte Schälkräfte erklärt werden könnten.

Neben den mechanischen Einflüssen einer dickeren Weichkomponente könnte bei den LSR-Thermoplast-Proben der Anstieg der Schälkraft mit zunehmender LSR-Schichtdicke durch den Anteil der Silane im Flüssigsilikon erklärt werden. Die Haftung zwischen Thermoplastoberfläche und haftungsmodifiziertem Silikon basiert vor allem auf den haftungsmodifizierten Silanen, die in einem festen Anteil dem Flüssigsilikon beigemischt sind und als Haftvermittler zwischen organischem Thermoplast und Silikon dienen. Bei gleichbleibender Grenzfläche sind folglich bei dickeren LSR-Schichten im Verhältnis zur Grenzfläche mehr Silane im Silikon enthalten, die an die Oberfläche diffundieren können und eine chemische Bindung zu den Thermoplasten ausbilden, als bei kleineren Schichtdicken.

Vergleich groß – klein

Um eine Einordnung der erzielten Ergebnisse der miniaturisierten Prüfkörper treffen zu können, erscheint ein qualitativer Vergleich der Werkstoffkombination mit einem „Standardprüfkörper“ nach VDI 2019 sinnvoll. Auch wenn hier fertigungs- und geometriebedingte Abweichungen unvermeidbar sind, soll abgeschätzt werden, ob der gleiche Trend bezüglich der Verbundhaftung festgestellt werden kann.

Dies ist insbesondere sinnvoll, da es beispielsweise auftreten könnte, dass bestimmte Hart-Weich-Verbindungen miniaturisiert nicht gefertigt werden können, da die notwendigen Entformungskräfte vergleichsweise groß sind und die Verbundhaftung übersteigen. Bei den Standard-Prüfkörpern, die aufgrund ihrer großen Grenzfläche wesentlich höhere Haftkräfte aufweisen, spielen die Entformungskräfte eine untergeordnete Rolle. So könnte es sein, dass Verbunde zwar „in groß“ Verbundhaftung aufweisen, in kleinen Abmessungen jedoch nicht entformt werden können. Dies konnte insbesondere für die LSR-Thermoplast-Bauteile bestätigt werden, da in den Schälversuchen Verbundkräfte von <1 N nicht gemessen werden konnten, bei den TPE-Teilen war dies jedoch unkritischer.

Die Autoren

Dipl.-Ing. Vera Seitz ist seit 2012 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Medizintechnik der TU München; vera.seitz@tum.de

Prof. Dr. med. Dr.-Ing. Erich Wintermantel ist Ordinarius des Lehrstuhls für Medizintechnik der TU München; wintermantel@tum.de

Dr.-Ing. Markus Schönberger ist seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Medizintechnik der TU München; markus.schoenberger@tum.de

Dr.-Ing. Marc Hoffstetter ist seit 2010 im Management Medizinprodukte bei der Firma Scholz – HTIK tätig; marc.hoffstetter@scholz-htik.de

Dank

Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags.

Projektpartner

Lehrstuhl für Medizintechnik (MedTech), TU München

» www.medtech.mw.tum.de

Horst Scholz – High Tech in Kunststoff GmbH & Co. KG, Kronach

» <http://www.scholz-htik.de>

Service

Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/917466

English Version

» Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

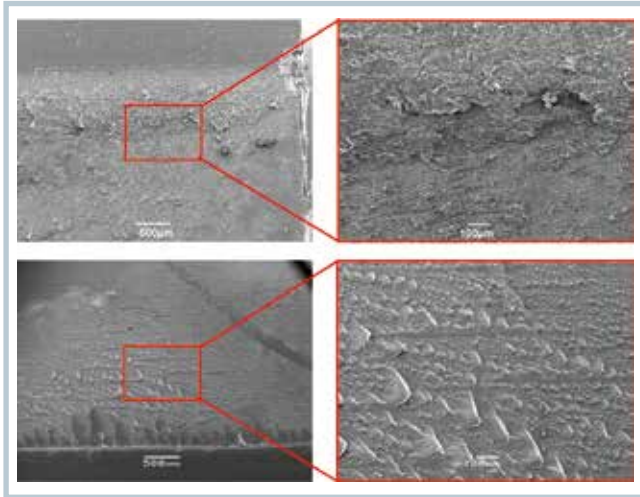


Bild 6. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen beispielhafter Schälflächen der untersuchten Hart-Weich-Kombinationen nach dem Test im Schälversuch bei einer Schichtdicke von 1 mm. Oben: PC+TPS (adt), unten: PC+LSR2740, plasmabehandelt; auf beiden Substraten sind nach dem Schälen noch großflächige Rückstände des Elastomers zu beobachten, was trotz der zum Teil niedrigen Schälkräfte auf eine gute Verbundhaftung hinweist

Insgesamt werden im Rahmen dieser Untersuchung anhand miniaturisierter Prüfkörpergeometrien Schälwiderstände (normiert auf die Breite der Grenzfläche) von ca. 1–3 N/mm bzw. > 5 N/mm (PC+TPU) gemessen. In vielen Fällen kann aufgrund eines Mischbruchs von einer guten Verbundhaftung gesprochen werden. Inwieweit diese Ergebnisse sich von den Ergebnissen der VDI-Prüfkörper qualitativ und quantitativ unterscheiden, soll in nächsten Untersuchungen analysiert werden.

Eine Übertragbarkeit der gemessenen, quantitativen Werte ist allerdings kritisch zu sehen, da die komplexe Belastungssituation während des Schälversuchs eine einfache Normierung auf einen Standardprüfkörper nicht zulässt. Während des Schälversuchs von Hart-Weich-Kombinationen, wie er unter anderem in der VDI-Richtlinie 2019 vorgesehen ist, überlagern sich Einflüsse der Festigkeits- und Dehnungseigenschaften (Einschnürung, elastische/plastische Dehnungen) der Weichkomponente mit den Einflüssen der Verbundhaftung, sodass ein direkter Vergleich von Ergebnissen, die anhand unterschiedlicher Geometrien bestimmt wurden, nicht zielführend ist. Dies ist insbesondere beim Test von weichen Materialien mit niedrigen Shore-Härten zu berücksichtigen.

Praxisnutzen

Es wurde gezeigt, dass ein einheitlicher Test der Verbundhaftung von Hart-Weich-Verbindungen im Schälversuch für unterschiedliche Geometrien schwierig ist. Dennoch stellt die VDI-Richtlinie 2019 einen wichtigen Ausgangspunkt dar, um in Zukunft Haftungsergebnisse unterschiedlicher Studien besser untereinander vergleichen zu können. Dabei sollten in Zukunft Testvarianten in Betracht gezogen werden, die auch die Größenverhältnisse realer Anwendungen berücksichtigen, auch wenn mit einer miniaturisierten Testgeometrie evtl. andere Nachteile, wie z. B. ein früheres kohäsives Versagen der Weichkomponente, einhergehen. ■