

Einfluss der Substrattemperatur auf die Haftung schmelzgeschichteter Prüfkörper aus thermoplastischem Polyurethan auf aminosilanen Haftvermittlerschichten

H. Schneider, K. Dilger, S. Hartwig

Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik

hartwig.schneider@tu-braunschweig.de

Abstract

Aufgrund ihrer Eigenschaft, der Lokalisation mechanischer Spannungen – im Gegensatz zu mechanischen Fügeverfahren – entgegenzuwirken, gewinnen stoffschlüssige Fügeverfahren auch im Bereich des Fügens an spröden Komponenten im Bereich des Sanitärbaus, der Herstellung von Gebrauchszellulose oder in der Displaytechnik immer mehr an Bedeutung.

Besonders erstrebenswert ist in diesem Zusammenhang eine Kombination aus sehr harten und spröden Stoffeigenschaften einer Glasoberfläche oder einer glasierten Oberfläche mit den weich-elastischen Eigenschaften eines thermoplastischen Elastomers. Prinzipiell lassen sich derartige Verbunde durch das direkte Anspritzen an die anorganische Komponente etwa in einem Spritzguss- oder in einem nachdruckfreien Spritzprägeprozess erreichen. Aufgrund der Notwendigkeit einer Form mit entsprechend enger Fertigungstoleranz und den daraus resultierenden hohen Werkzeugkosten erscheinen drucklose Schmelzschichtverfahren, bei denen eine extrudierte thermoplastische Schmelze direkt auf dem Substrat aufgetragen wird, als Fertigungsverfahren zielführend. Sie eröffnen zudem durch eine hohe Gestaltungsfreiheit der angedruckten Komponente innovative Fertigungsmöglichkeiten für hybride Prototypen und neue Reparaturtechnologien. Für den drucklosen Prozess der Materialextrusion auf einer mit einem Aminosilan versehenen anorganischen Oberfläche ist vor allem die Oberflächentemperatur entscheidend. Erst bei hinreichend hoher Temperatur – ähnlich wie beim Heißkleben – kann eine ausreichend starke Molekülbewegung für die mechanische Adhäsion und zusätzlich beim Einsatz von Aminosilanen vermehrt Interaktion mit den funktionellen Gruppen des Haftvermittlers erreicht werden. Weiterhin ist die thermische Zersetzung

der primären und sekundären Amine in höheren Temperaturbereichen bei einer Bewertung des Druckprozesses zu berücksichtigen.

Für eine Betrachtung des Einflusses der Oberflächentemperatur während des Schmelzschichtvorgangs und eine Bewertung der resultierenden Haftung wurden emaillierte Stahlproben zunächst mit einer amorphen SiO₂-Beschichtung versehen und im Folgenden mit einem Aminosilan nasschemisch beschichtet. Im Nachgang wurden diese Oberflächen bei unterschiedlichen Druckbetttemperaturen Prüfkörper aus thermoplastischem Polyurethan mittels fused layer manufacturing (FLM) gedruckt. Abschließend erfolgte eine mechanische Charakterisierung der Verbindungsfestigkeit in einem Kopfzugversuch.

1 Einleitung

Seit einigen Jahren erfahren viele Bereiche des Maschinenbaus, insbesondere der Kraftfahrzeugtechnik und der Luft- und Raumfahrt, eine weiterhin zunehmende Hybridisierung. Häufig geschieht diese in Form stoffschlüssig gefügter organisch-anorganischer Werkstoffverbunde. Ziel ist die Kombination materialspezifischer Eigenschaften bzw. die Realisierung einer besonders großen Schnittmenge zwischen konstruktiven Werkstoff- und Konzeptleichtbau sowie der Erschließung neuer Einsatzgebiete für den erzeugten Verbund. Unter anderem wird dieses Ziel durch die Integration neuer Funktionen und eine Verbesserung spezifischer mechanischer Kennwerte erreicht. [1,2]

Besonders relevant erscheinen in diesen Bereichen stoffschlüssige Fügeverbindungen zu spröden glasierten oder emaillierten Oberflächen oder Gläsern. Beispiele hierfür sind weichelastische PU-Klebungen zwischen emaillierten Glasscheiben und Fahrzeugkarosserien in Bussen, Schienenfahrzeugen oder Heckklappenfenstern von Automobilen. Die reparierbaren Klebungen dämpfen Erschütterungen und kompensieren thermisch induzierte Spannungsdifferenzen zwischen Rahmen und Fahrzeugverglasung. [3]

Weitere Anwendungsbeispiele sind Silikon-Applikationen auf Porzellangeschirr zur Gewährleistung von Rutschfestigkeitseigenschaften, eine Verbesserung der Wärmeisolation [4] sowie weichelastische Silikonklebungen im Aquarienbau. [5]

Im Rahmen der im Folgenden vorgestellten Herstellung von Verbunden, bestehend aus Emaille und thermoplastischem Polyurethan (TPU) wird die Kombination verschiedener Materialeigenschaften mit den Vorteilen der generativen Fertigung unter Verwendung eines aminosilanen Haftvermittlers anstelle konventioneller Kleb- oder

Spritzgussprozesse mit dem Ziel der Erzeugung eines hybriden Materialverbunds angestrebt (siehe *Abb. 1*).

Das Vorgehen birgt gegenüber anderen Fertigungsmöglichkeiten für diese Materialkombination folgende Vorteile:

- Der erzeugte Materialverbund stellt eine kostengünstige Möglichkeit für Kompatibilitätstests zur Evaluation von Kombinationen von Haftvermittlern und Substraten dar. Die Umsetzung in einem Spritzguss- oder Spritzprägeprozess mit entsprechenden Werkzeugen und Rüstzeiten bei gleichzeitig engen Werkzeugtoleranzen ist vergleichsweise teuer.
- Aufgrund der Gestaltungsfreiheit durch die generative Fertigung bietet sich die Möglichkeit der kostengünstigen Erzeugung von Design-Prototypen.
- Thermoplastisches Polyurethan eröffnet durch die gute Anbindung von plastifiziertem Neumaterial an alte Strukturen in einem Schmelzschichtungs-vorgang neue Reparaturmöglichkeiten für beschädigte oder verschlissene Bauteile.

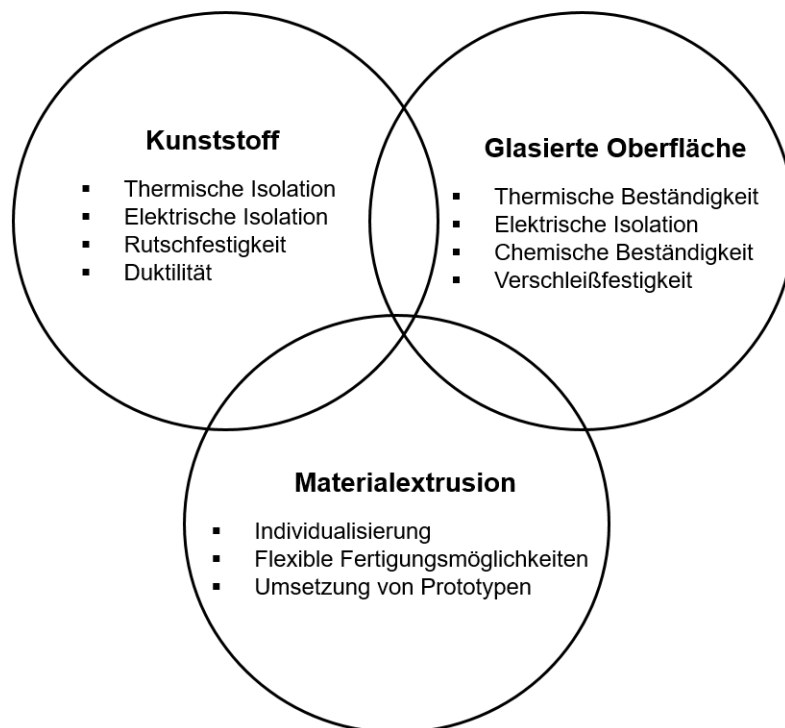


Abb. 1: Kombination verschiedener Materialeigenschaften von glasierten Oberflächen und Kunststoffen mit Vorteilen der Materialextrusion [6]

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der direkten generativen Fertigung von Komponenten durch Schmelzschichtung auf einer Bauteiloberfläche und dem

Heißkleben bestehen darin, dass im Falle der generativen Fertigung die thermoplastische Komponente selbst das Bauteil darstellt und nicht einen erhitzten nichtmetallischen Hilfsstoff wie beim Heißkleben. Ein weiterer Unterschied zwischen dem hier vorgestellten Verfahren und dem Heißklebverfahren mit Polyolefin oder Ethylen-Vinylacetat-Copolymer besteht in den Adhäsionsarten. Während bei TPU-Glas bzw. TPU-Emaillie-Verbunden die chemische Adhäsion besonders relevant für erreichbare Verbindungsfestigkeiten ist, dominiert beim Heißkleben der Einfluss der mechanischen Adhäsion, welche durch Aufrauen als Vorbehandlung gezielt gefördert wird. Bei spröden glasierten Oberflächen scheiden diese Verfahren aufgrund von Spannungsspitzen infolge des Kerbeeinflusses an der Oberfläche aus. [7]

Eine Möglichkeit, chemische Adhäsion zu erreichen, besteht darin, die Oberfläche mit Molekülen zu versehen, die sowohl Merkmale der Glasoberfläche als Si-O-Bindungen als auch aminofunktionelle Gruppen besitzen, um eine Anbindung an das TPU zu ermöglichen. Ausschlaggebend für Stärke und Homogenität der chemischen Adhäsion sind demnach hohe Siliziumdioxidgehalte der Glasoberfläche und ein hoher Amingehalt im molekularen Aufbau des thermoplastischen Polyurethans.

Daher wird bei der Vorbehandlung durch das Pyrosil®-Verfahren im oxidierenden Teil einer Propan-Silan-Gasflamme SiO_2 erzeugt, das sich als amorphe Schicht auf der Substratoberfläche ablagert. Ziel dieser Methode ist die Erhöhung und Homogenisierung von Siliziumoxidgehalten an Fügeiteiloberflächen zur Erzeugung gleichmäßiger Aminosilanbeschichtungen, vornehmlich von (3-Aminopropyl)trimethoxysilan (APTMS) und (3-Aminopropyl)triethoxysilan (APTES) in einem nasschemischen Wischauftrag. [8]

Die Verwendung von Aminosilanen wie APTMS und APTES als Haftvermittler für Polyurethanklebstoffe auf Glasflächen hat ein weites Anwendungsfeld. [9] APTMS bildet durch Polykondensationsreaktionen bei Freisetzung von Methanol Multischichten auf SiO_2 -Substraten. [10] Im Fügevorgang erhöhen aminofunktionelle Gruppen in der Polymerschicht die Chemisorption gegenüber thermoplastischen Polyurethanen.

Im Zusammenhang mit emaillierten Stahlwerkstoffen konnten die verbesserte Homogenität der aufgetragenen APTMS-Beschichtung sowie deutlich höhere erreichte Haftfestigkeiten von 11,0 MPa nachgewiesen werden. [6] Weiterhin waren Änderungen des Versagensbildes von einem lokalen Schälens einzelner Layer bei unvorbehandelten sowie plasmavorbehandelten Oberflächen hin zu einem globalen Schälens bei pyrosilbeschichteten Proben aufgrund allgemein höherer Gesamtverformungen mit entsprechend kleineren kohäsiven Restbruchflächen zu beobachten. [6]

Für eine umfassende Bewertung der hybriden Emaille-TPU-Verbunde sind die Betrachtung der Substrattemperatur zu Beginn des Druckprozesses sowie die erreichbaren Haftfestigkeiten von zentraler Bedeutung.

2 Experimentelles

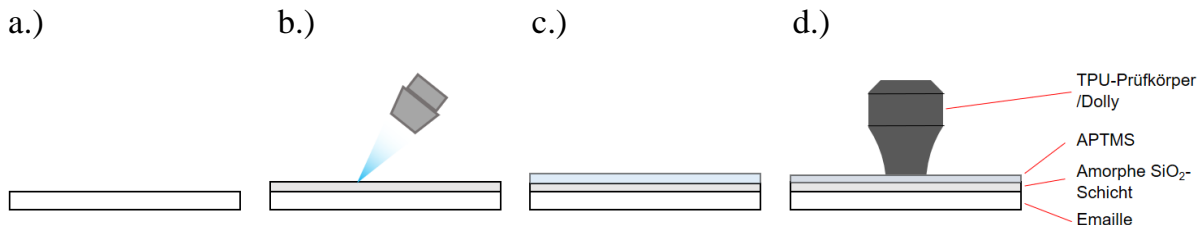


Abb. 2: Ablauf der Probenpräparation a.) gereinigte emaillierte Stahlfläche, b.) Aufbringen amorpher SiO_2 -Schichten, c.) nasschemische Aufbringung von APTMS als Wischauftrag und fertiger Werkstoffverbund nach generativer Fertigung des Prüfkörpers

Abb. 2 zeigt den Gesamtablauf der Probenherstellung. Als Substrat diente ein emailliertes Whiteboard aus Stahl ($d = 0,52 \text{ mm}$) der Fa. Schäfer mit einer Emailledicke von $149,1 \mu\text{m} \pm 6,1 \mu\text{m}$, aus dem mittels einer Schlagschere quadratische Plättchen mit Kantenmaßen von 40 mm ausgeschnitten wurden. Nach einer Reinigung mittels Aceton und Aufbringen einer Pyrosilbeschichtung zur Gewährleistung einer homogenen SiO_2 -Oberfläche erfolgte eine Beschichtung mit einer nasschemischen 1%igen ($\approx 5,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol/l}$) APTMS-Lösung auf Isopropanolbasis als Wischauftrag. Anschließend erfolgte eine Ofentrocknung bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$. [6]

Für die Einstellung eines reproduzierbaren Oberflächenzustandes vor dem Schmelzschichtungsprozess in dem hierfür genutzten Ultimaker 2+ wurden die Proben kurzzeitig in Aceton getaucht und anschließend auf dem Druckbett durch Haftklebestreifen fixiert. Der Druckvorgang wurde anschließend nach Einstellen und Erreichen der Druckbetttemperatur gestartet. Um elastische Verzüge und damit eine schlechte Kontur sowie Warping zu vermeiden, wurde bei jedem Fertigungsverfahren nach dem Auftragen der fünften Schicht das Heizbett ausgeschaltet. [6,11]

In vorangegangenen Untersuchungen wurde eine konkave Probengeometrie in Anlehnung an den in ASTM D 4541-17 und DIN EN ISO 527 beschriebenen Kopfzugversuch zur Bestimmung der Haftfestigkeit entwickelt. Sie lässt sich auch in Form einer Doppelprobe in Anlehnung an ASTM D 1623 beschriebenen Prüfkörpergeometrie fertigen und erlaubt so den direkten Vergleich einer Haftfestigkeit auf einer vorbehandelten Oberfläche mit der Zugfestigkeit des schmelzgeschichteten, anisotropen Materials (Schmelzschicht \perp Belastungsrichtung). Aufgrund des

Festigkeits- und Elastizitätssprungs in der Grenzfläche zwischen Dolly und Substrat sowie der daraus resultierenden Spannungsspitzen kann die Festigkeit einer sanduhrförmigen Doppelprobe nicht durch jene eines an einer spröden Oberfläche andruckten Prüfkörpers übertroffen werden. Ein Vergleich zwischen erreichten Festigkeitswerten aus Zugversuch (Doppelprobe) und Kopfzugversuch (Dolly-Geometrie) gibt somit einen Wert an, wie stark sich ideal und real übertragbare Kräfte in der Grenzfläche unterscheiden. [6, 12-14]

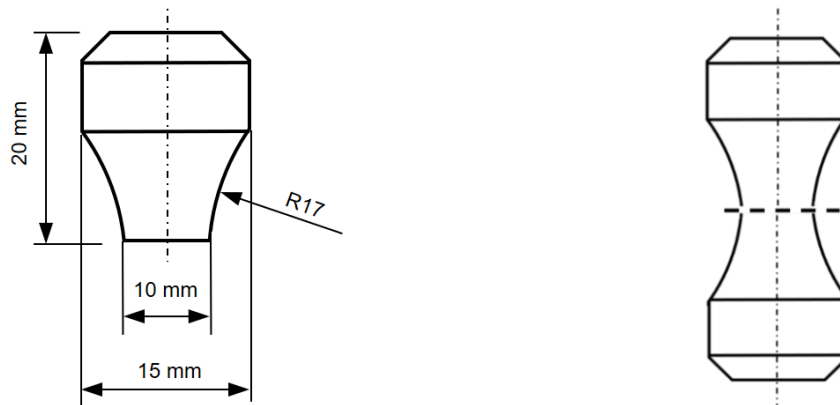


Abb. 3: Verwendete konkave Prüfkörpergeometrien [6], links: Dolly für die Bestimmung von Hafteigenschaften, rechts: im Zugversuch verwendete Doppelgeometrie

Die Düsentemperatur betrug 235 °C. Druckbettemperaturen sowie Heizzeiten bis zum Erreichen der jeweiligen Temperaturen sind Abb. 4 zu entnehmen. Es ist ein quadratischer Verlauf erkennbar.

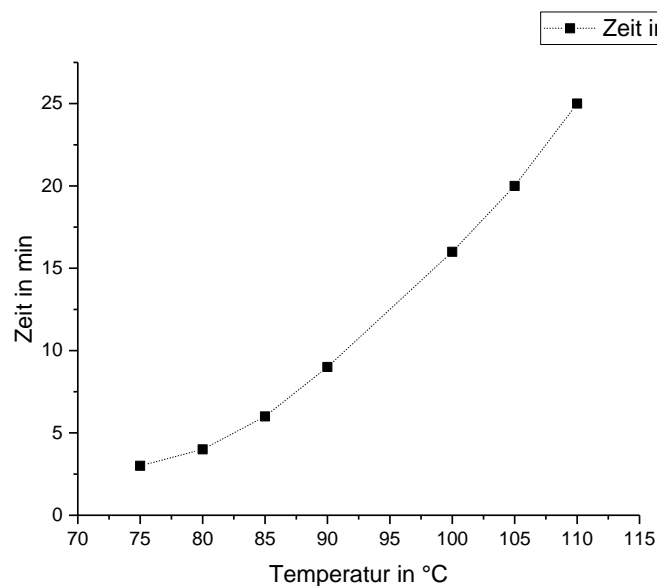


Abb. 4: Darstellung der Heizzeit in Minuten in Abhängigkeit von der geforderten Substrattemperatur

Im Anschluss an die generative Fertigung wurde das bedruckte Substrat durch eine Stahlplatte rückseitig unter Verwendung von Cyanacrylat analog zu [6] versteift und während der Aushärtung mit Spannpratzen für 45 min fixiert. Danach erfolgte die Durchführung der Kopfzugversuche, wobei zu jedem Parametersatz jeweils 8 Proben geprüft und Versagensbilder sowie erzielte Festigkeitswerte untereinander verglichen wurden.

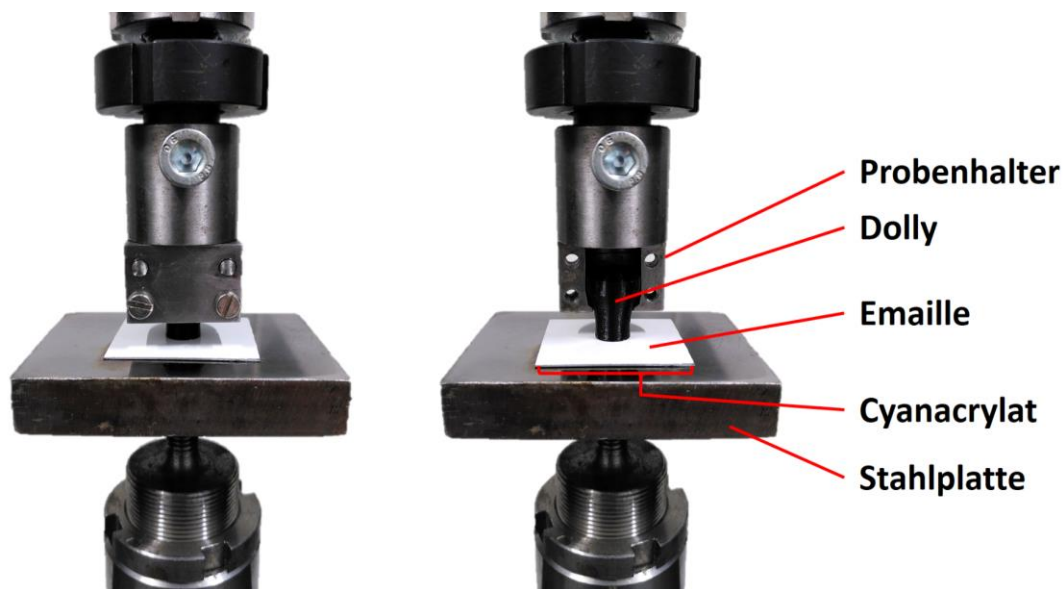


Abb. 5: Versuchsaufbau Abziehversuch, $v = 10 \text{ mm/min}$ vgl. [6]

3 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 6 zeigt erzielte Haftfestigkeiten der Fügeverbindung in Bezug auf verwendete Druckbetttemperaturen mit ihren Standardabweichungen und einer polynomialen Näherung in Bezug auf ideal übertragbare mechanische Spannungen von 16 MPa aus [6]. Es können drei Abschnitte im Kurvenverlauf identifiziert werden. Im ersten Verlaufsabschnitt von 75 bis etwa 85 °C kommt es zu einer deutlichen Zunahme der Haftfestigkeit und einer höheren Streuung der Messwerte. Wahrscheinlich steht die Zunahme der Festigkeitskennwerte mit einer höheren Mobilität der Moleküle an der Grenzschicht im Stadium der Bildung des Stoffschlusses im Zusammenhang.

Bei Druckbetttemperaturen zwischen 85 °C und 100 °C liegen maximal erreichbare Festigkeitswerte. Im letzten Kurvenabschnitt verringern sich bei höheren Druckbetttemperaturen sowohl die Haftfestigkeit als auch deren Streuband

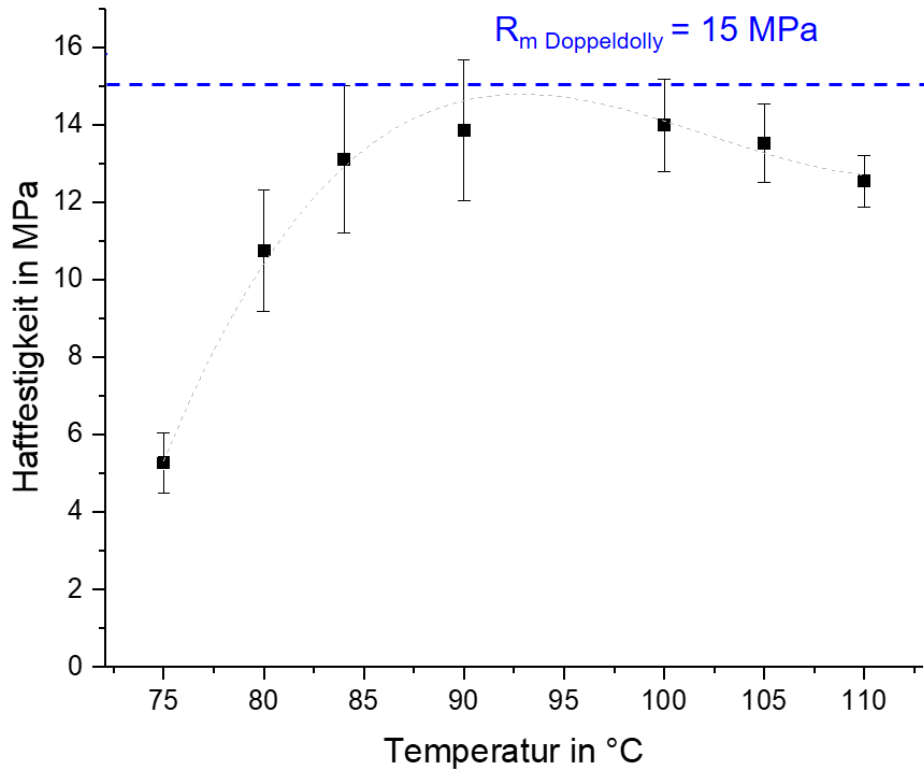


Abb. 6: Erreichte Haftfestigkeiten und jeweilige Standardabweichungen bei verschiedenen Druckbetttemperaturen

Durch eine thermogravimetrische Analyse lassen sich Oxidationsreaktionen, welche bei APTMS an Sauerstoff erst in Temperaturbereichen ab 190 °C relevant erscheinen, als Ursache für den Festigkeitsrückgang weitestgehend ausschließen. Ferner wurde durch Kontaktwinkelmessungen mit Diiodmethan, Ethylenglykol und destilliertem Wasser die freie Oberflächenenergie nach OWENS und WENDT bestimmt. [15]

Es erfolgte eine Bestimmung der freien Oberflächenenergie unmittelbar nach Beschichtung mit APTMS, nach 25minütiger Erwärmung auf 110 °C sowie nach kurzem anschließenden Eintauchen in Aceton, durch das polare funktionelle Gruppen möglicherweise an die Oberfläche gezogen werden können. Es zeigte sich nach einer Erwärmung über 25 Minuten auf eine Temperatur von 110 °C ein leichter Rückgang in den polaren und dispersiven Anteilen der freien Oberflächenenergie. Das kurze Eintauchen in Aceton mit rascher Trocknung der Oberfläche führte zu einem Anstieg der freien Oberflächenenergie auf das Ausgangsniveau, was als ein Indiz für eine temperatur- und zeitabhängige reversible Änderung der freien Oberflächenenergie gewertet werden kann (siehe Abb. 7).

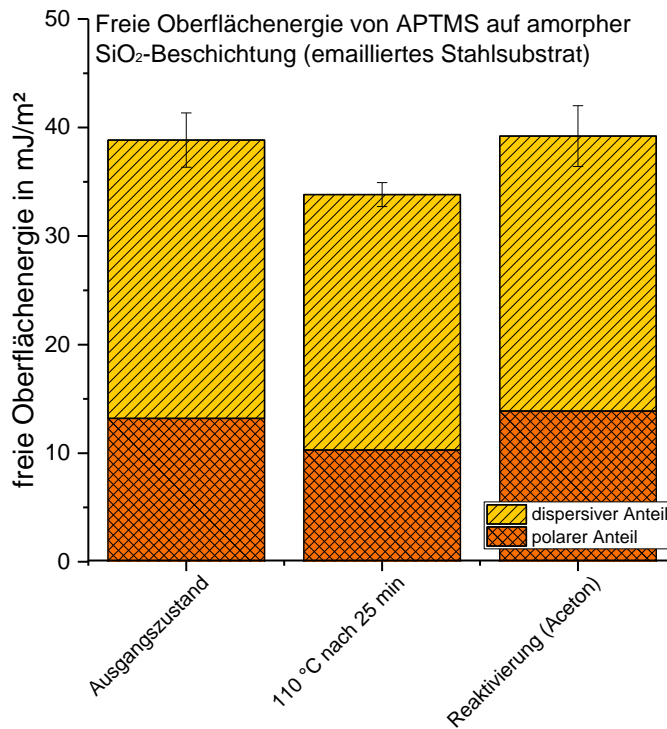


Abb. 7: Freie Oberflächenenergien im Ausgangszustand, nach Temperatureinwirkung und nach anschließender Reaktivierung

Die Versagensbilder in Abb. 8 zeigen, dass nicht allein die Haftfestigkeit der Verbindung zwischen beschichteter Emailierung und Prüfkörper entscheidend für ertragbare Maximallasten ist, sondern insbesondere auch die Haftung an der Grenzschicht Stahl-Emaille. So weist das linke Bild eine charakteristische Grübchenstruktur auf, die durch eine mangelhafte rückseitige Versteifung infolge von Hohlräumen in der Cyanacrylatklebung hervorgerufen wird. Alle derartigen Proben besitzen besonders niedrige Versagensspannungen von etwa 2 bis 3 MPa und wurden nicht weiter in die Auswertung einbezogen bzw. durch andere Proben ersetzt.

Bei Proben mit hinreichender rückseitiger Versteifung konnte bei Druckbetttemperaturen von 75 °C und 90 °C das in [6] beschriebene globale Schalen mit kohäsiven Restbruchflächen zwischen 20% und 35% bestätigt werden. In höheren Temperaturbereichen kam es vermehrt zu den mittig dargestellten lokal begrenzten Ausbrüchen in der emailierten Oberfläche. Bei Druckbetttemperaturen von 110 °C trat mitunter auch ein geschlossenes Versagen durch scheinbares Ablösen der Emailleschicht bei gleichzeitig intakter stoffschlüssiger Verbindung zwischen Emaille und Prüfkörper auf. Beide Versagensformen wurden in die Auswertung in Abb. 5 einbezogen.

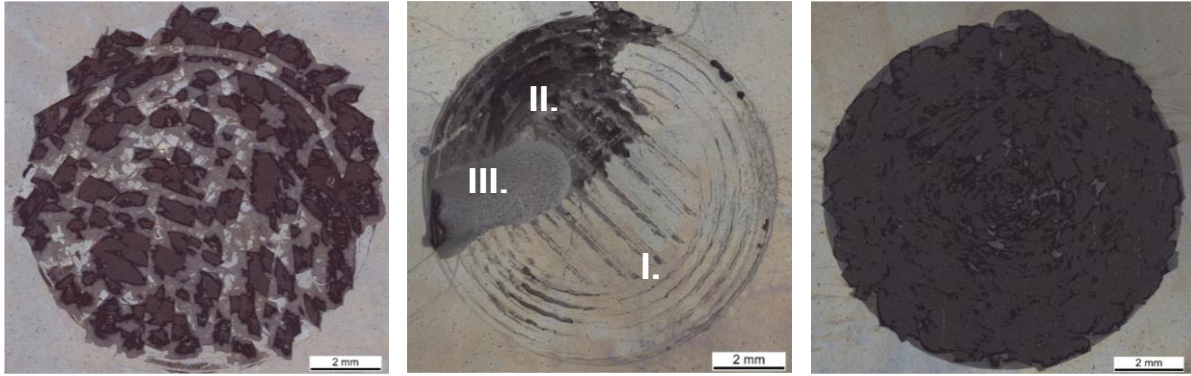


Abb. 8: Versagensbilder von TPU-Emaille-Werkstoffverbunden im Kopfzugversuch, links: grübchenförmige Ausbrüche aufgrund unzureichender rückseitiger Versteifung, Mitte: weitgehend globales Schälen (vgl. [6]) mit lokalem Emailleversagen im Bereich des Gewaltbruchs ($T = 100\text{ °C}$), rechts: flächige Ablösung der Emaille vom Grundwerkstoff ($T = 110\text{ °C}$)

Der Wechsel des Versagensbildes vom globalen Schälen mit kohäsivem Restbruch im TPU bei niedrigeren Temperaturen hin zu lokalen Emailleausbrüchen in der Restbruchfläche (Abb. 8 mitte) geht mit höheren erreichten Haftfestigkeiten einher. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die realen mechanischen Spannungen der Restbruchfläche in Bereichen, in denen zuletzt Risswachstum erfolgt, die Kohäsion der Emailleschicht übertreffen und sich der Rissfortschritt ausschließlich im letzten Versagensstadium in dieser vergleichsweise spröden Schicht ereignet. Es lassen sich somit drei Versagensphasen ausgehend vom globalen Schälen (I.) über das kohäsive duktile Versagen des thermoplastischen Polyurethans (II.) hin zum finalen kohäsiven Sprödversagen in der Emailleschicht (III.) identifizieren.

Die vermehrt runden Ablösungen von Emaille im Kopfzugversuch für Proben, die mit höheren Druckbettemperaturen (Abb. 8 rechts) gefertigt wurden, erscheinen vor dem Hintergrund deutlich höherer thermisch induzierter Zugeigenspannungen im Randbereich des Prüfkörperfußes plausibel. Im Kopfzugversuch kommt es hier zu einer weiteren Überhöhung lokalisierter Spannungen und damit zu einem vorzeitigen Versagen, das sich auch durch eine leicht verringerte Haftfestigkeit gegenüber Proben, die bei niedrigeren Druckbettemperaturen gefertigt wurden, bemerkbar macht (siehe Abb. 6).

4 Ausblick

Die Versuchsergebnisse sowie die Näherung legen nahe, dass im Temperaturbereich zwischen 84 °C und 100 °C maximale Haftfestigkeiten für generativ gefertigte konkave

Prüfkörper mit der vorgestellten Oberflächenbeschichtung erreicht werden können. In diesem Temperaturbereich sind weitere Kopfzugversuche mit größeren Losgrößen durchzuführen, um die Temperatur zur maximal erreichbaren Haftfestigkeit und bei geringerer Streuung näher einzugrenzen.

Die Ergebnisse von TGA und Kontaktwinkelmessung zeigen keine typischen Anzeichen für Degradationsvorgänge. Denn vornehmlich im Temperaturbereich um 110 °C dominieren zunächst auch zeitabhängige Umordnungsprozesse gegenüber Degradation bei der Deaktivierung der aminosilanen Haftvermittlerschicht sowie thermisch bedingte mehrachsige Zugspannungen als beschränkende Größe für die erreichbare Haftfestigkeit. Ein schnellerer Aufheizvorgang, der den Einsatz eines leistungsfähigeren Heizbetts bedingt, würde auch im Falle von Temperaturen um 110 °C zu höheren Haftfestigkeiten führen als das aktuell im Einsatz befindliche Druckbett. Zur Bestätigung der Beobachtung scheinbar zeitabhängiger Umordnungsvorgänge sollte eine chemische Analyse mittels ESMA erfolgen.

Ferner können Mikro-CT-Aufnahmen unter Last genaueren Aufschluss über den Beginn des Versagens geben und zur Validierung von lokalem und globalem Schalen als Versagensmechanismus unter quasistatischer Lasteinwirkung beitragen. In diese Untersuchungen wäre die Einbeziehung insbesondere etherbasierter TPU-Typen mit hohen Molekulargewichten und höheren Steifigkeiten sinnvoll. So ließe sich einer Spannungslokalisierung im Bereich der Grenzschicht vorbeugen.

Im ungealterten Zustand führen amorphe Siliziumdioxidschichten zu deutlich höheren Haftfestigkeitswerten als Proben ohne entsprechende Vorbehandlung. Im Falle eines Feuchtigkeitseinflusses erscheinen diese Schichten durch ihre hydrophilen Eigenschaften kritisch. So bedingt dieser Beschichtungsprozess eine gezielte Auslegung zwecks Gewährleistung einer homogenen APTMS-Beschichtung mit möglichst geringer Beeinträchtigung des Alterungsverhaltens. In diesem Zusammenhang sollten die Einflüsse der Haftvermittlerkonzentration sowie die Wahl des Lösemittels auf die Alterungseigenschaften untersucht werden.

Literatur

- [1] Frederiksson, L.: Konstruktiver Leichtbau und Konzeptleichtbau, Smart Mobility and Traffic 2019.
- [2] Schmidt, W.; Puri, W.: Systematische Entwicklung gewichtsoptimierter Bauteile, Tagungsbeitrag 11. Symposium „Design for X“ Schaittach 2000.

- [3] Schmitz, F. P.; Symietz, D.: Die unsichtbaren Helfer – Klebstoffe im Fahrzeugbau, Chem. Unserer Zeit, Wiley 2008, 42-92 101.
<https://doi.org/10.1002/ciuz.20080043>
- [4] Terliesner, S.: Design oder Nicht-sein, Firmenprofil Kahla. return 4, 46-49 (2018)
- [5] Gutjahr, A.: Das Aquarium – Bunter Mikrokosmos unter Wasser, Gräfe und Unzer München 2004.
- [6] Schneider, H.; Dilger, K.; Hartwig, S.: Material Extrusion on Enameled Steel Surfaces, 6th International Conference on Adhesive Bonding Springer Nature 2021 pp 69–81
- [7] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 6. Aufl., Springer Berlin Heidelberg 2009.
- [8] Tokuhashi et al.: Premixed Silane- Oxygen- Nitrogen Flames. Comb. Flame, 82, 40-50 (1990). [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(90\)90076-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(90)90076-4)
- [9] Golaz, B., Michaud, V., Månson, J.: Adhesion of thermoplastic polyurethane elastomer to galvanized steel. Int. J. Adh. Adh. 31 805-815 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.07.009>
- [10] Chauhan et al.: Self-assembly of the 3-aminopropyltrimethoxysilane multilayers on Si and hysteretic current-voltage characteristics. Appl. Phys. A 90(3), 581-589 (2008).
<https://doi.org/10.1007/s00339-007-4336-7>
- [11] DIN EN ISO 527 - Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012, Deutsches Institut für Normung, Beuth, Berlin (2012) Owens, D., Wendt, R. : Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. J. Appl. Polym. Sci. 13, 1741-1747 (1969).
<https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>
- [12] Messener, J.; Kaufmann, T.; Christian, M.; Schmidt, A.; te Heesen, H.: Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad, RT-Journal – Forum für Rapid Technologie 2019.
- [13] ASTM D1623-17, Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017
- [14] Schneider et al.: Bestimmung der Haftfestigkeit organischer Haftvermittlerschichten mit Hilfe additiv gefertigter Prüfkörper. Tagungsbd. 4. Symp. Mat., 229-241 (2021).
<https://doi.org/10.21268/20210519-5>

- [15] DIN EN ISO 527 - Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012, Deutsches Institut für Normung, Beuth, Berlin (2012) Owens, D., Wendt, R. : Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. J. Appl. Polym. Sci. 13, 1741-1747 (1969).

Autorenanschrift

Hartwig Schneider

Technische Universität Braunschweig

Institut für Füge-und Schweißtechnik

Langer Kamp 8

38106 Braunschweig

Telefon: 0531-391-65021

Telefax: 0531-391-95599

E-Mail: hartwig.schneider@tu-braunschweig.de