

## **Titel**

# **Klebstoff-freisetzende Fahrzeugfolierungssysteme mit Formgedächtniseigenschaften**

IGF-Nr.: 21345 BR

---

## **Forschungseinrichtungen**

Forschungseinrichtung: Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung,  
Potsdam (IAP)



Ansprechpartner beim IAP:

Dr. Thorsten Pretsch

0331 / 568 1414

thorsten.pretsch@iap.fraunhofer.de

M.Sc. Dennis Schönfeld

0331 / 568 1719

dennis.schoenfeld@iap.fraunhofer.de

## **Danksagungen**

Das IGF-Vorhaben 21345 BR der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Ausgangssituation

Die Folierung wird heute zur optischen Gestaltung, für Werbezwecke und zum Schutz von Oberflächen vor äußeren Einflüssen in vielen Bereichen des täglichen Lebens angewandt. Neben Fenstern, Wänden, Fassaden, Möbeln und Fußböden<sup>1-3</sup> wird sie zur Gestaltung von Kraftfahrzeugen (Kfz) in der Fahrzeugfolierung eingesetzt. Hier dient das Überziehen der Karosserie mit einer Folie der schnellen und im Vergleich mit einer Lackierung kostengünstigen Möglichkeit, eine Individualisierung vorzunehmen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Lack geschützt und somit ein Beitrag zum Werterhalt eines Fahrzeugs geleistet wird. Abbildung 1 zeigt einige Beispiele aus diesem Bereich. Für die Fahrzeugvollfolierung wird oftmals auch der englische Begriff „Car Wrapping“ benutzt. Es kommen dabei mit einem Haftklebstoff ausgerüstete, als Grafikfolien bezeichnete Folien zum Einsatz, die in vielfältigen Farben und Designs verfügbar sind. Zudem können sie z.B. mithilfe des Digitaldrucks sehr individuell gestaltet werden<sup>4</sup>.



**Abb. 1** Beispiele für Fahrzeugfolierungen (links: Vollfolierung, mittig: Teilfolierung, rechts: Folierung zu Werbezwecken) (Bilderquellen: Pixabay)

Infolge des stetig zunehmenden Wunsches nach Individualisierung werden heutzutage immer mehr Produkte für Fahrzeugfolierungssysteme nachgefragt. Eine Studie von Grand View Research sagt für den weltweiten Markt für Fahrzeugfolierungen, der sich im Jahr 2015 auf ein Volumen von 1,62 Mrd. US-\$ belief, ein kontinuierliches Wachstum bis zum Jahr 2025 auf geschätzte 10,8 Mrd. US-\$ voraus<sup>5,6</sup>. Treiber sind die Bereiche Marketing und Werbung sowie der öffentliche Sektor. Gleichermäßen wird für Grafikfolien und deren Anwendungen global ein Wachstum von 22,2 Mrd. US-\$ in 2017 auf 38 Mrd. US-\$ in 2026 prognostiziert<sup>7</sup>.

Die Anforderungen an die Folienmaterialien sind dabei vielseitig. Neben Flexibilität und Festigkeit ist die Beständigkeit gegenüber den je nach Anwendung variierenden, äußeren Einflüssen von Relevanz, da Grafikfolien i.d.R. mit Garantiezeiten von mindestens drei bis hin zu zwölf Jahren vertrieben werden. Ein weiteres entscheidendes Kriterium, nach dem insbesondere die Applikateure Folien beurteilen und auswählen, sind die anwendungsspezifischen Eigenschaften. Hierbei stellt insbesondere die Verarbeitbarkeit ein wichtiges Kriterium dar. Um den ästhetischen Ansprüchen des Endkunden zu genügen, dürfen beim Verkleben der Folie weder Blasen oder Falten noch sonstige Fehlstellen wie Risse, Lücken und Kratzer entstehen, noch dürfen Farbveränderungen auftreten. Dies stellt infolge der nicht-planaren Form eines Kfz mit vielen Wölbungen, Vertiefungen und Ecken bzw. Kanten insbesondere bei der Fahrzeugfolierung eine große Herausforderung dar. Auch ein sehr erfahrener Applikateur benötigt hierfür oft mehrere Ansätze, bei denen die Folie wieder abgezogen und neu aufgebracht wird. Um eine irreversible Schädigung der Folie beim

Repositionieren zu vermeiden, darf die Haftung zum Substrat zunächst nicht zu hoch sein. Da die Folierung aber permanent und widerstandsfähig sein soll, ist wiederum eine ausgeprägte finale Adhäsion zwingend erforderlich. Die **Repositionierbarkeit** als Produkteigenschaft stellt eine essenzielle Arbeitserleichterung für den Applikateur dar. Diese Eigenschaft ist aber laut Aussage verschiedenster Autofolierer bei den meisten marktetablierten Produkten eher mangelhaft. So treten in der Praxis oftmals Probleme wie das Ablösen bzw. Verrutschen der Folie durch zu geringe Anfangshaftung oder der irreversiblen Deformation beim Repositionieren infolge einer zu hohen Anfangshaftung auf. Zudem können an Stoßkanten durch starke Rückstellung der Folienbahnen Lücken entstehen oder infolge der Krafteinwirkung beim Verkleben festerer Materialien auch spannungsinduzierte Risse auftreten. Konventionelle Lösungsansätze, wie Klebstoffe mit einstellbarer Adhäsionskinetik<sup>8,9</sup> oder Abstandshalter im Klebstoff zur Verringerung der Kontaktfläche zum Substrat<sup>10,11</sup> weisen erhebliche Schwachpunkte auf. Im ersten Fall können Lagerzeiten und –bedingungen zu stark schwankenden Haftungswerten führen, wohingegen das zweite Konzept einer höheren Klebergrammatur bedarf und somit einen materiellen Mehraufwand bedeutet. Die hierzu notwendige hohe Krafteinwirkung beim Aufrakeln der Folie stellt für die Oberfläche eine hohe mechanische Belastung dar und kann zur Entstehung von Kratzern und Fehlstellen beitragen. Zusätzlich ist es möglich, die Klebstoffoberflächen mit Mikrokanälen auszustatten. Auf diese Weise soll beim Aufbringen der Folie mittels eines Rakels das Entstehen von Luftblasen verhindert werden, indem die Luft durch die Kanäle entweichen kann<sup>12-15</sup>. Allerdings ist hierbei wiederum eine hohe Krafteinwirkung auf die empfindliche Oberfläche notwendig, um den Klebstoff in die Kanäle hineinzupressen und so dort eine Haftung zu erzeugen. Bleiben bei diesem Schritt Kavitäten zwischen Folie und Substrat zurück, können Feuchtigkeit, Kraftstoffe und andere Substanzen eindringen, die das Material schädigen. Zudem stellen nicht gestützte Folienbereiche Angriffsstellen dar, an denen z.B. Mikrorisse auftreten können. Folien auf Fahrzeugen müssen äußeren Einflüssen standhalten. Neben Witterungseinflüssen wie UV-Strahlung, Wärme und Feuchtigkeit, die die Farbe, das optische Erscheinungsbild (Ausbleichen, Glanzverlust, Oberflächenrauigkeiten, Auskreiden) und auch die mechanischen Eigenschaften negativ beeinträchtigen können<sup>16</sup>, tragen Gebrauchsspuren wie Kratzer, Schmarren oder Steinschläge zu einer Verschlechterung des Erscheinungsbildes bei. Die Witterungsbeständigkeit wird über die Zugabe geeigneter Stabilisatoren verbessert und mithilfe von Bewitterungstests beurteilt<sup>16-19</sup>. Die Beständigkeit der Oberfläche gegenüber mechanischer Krafteinwirkung kann ebenfalls über standardisierte Tests bewertet werden<sup>20,21</sup>. Als zusätzlicher Schutz von Grafikfolien aber auch für die Versiegelung von Autolackoberflächen werden Schutzlamine, sog. Steinschlag- oder Kratzschutzfolien eingesetzt<sup>22-24</sup>. Solche Produkte bestehen i.d.R. aus Polyurethan (PU) oder thermoplastischem Polyurethan (TPU)<sup>25</sup> und sind in manchen Fällen mit selbstheilenden Materialeigenschaften ausgestattet, um Kratzer unter Einfluss von Wärme wieder verschwinden bzw. die Folie „heilen“ zu lassen<sup>22-24</sup>. Allerdings bedeutet dies einen weiteren Folierungsschritt und damit einen zusätzlichen Material- und Arbeitsaufwand durch eine weitere Verklebung<sup>26,27</sup>. Bis vor wenigen Jahren kamen in der Fahrzeugfolierung fast ausschließlich PVC-basierte Folien zum Einsatz. Ein Umdenken bezüglich der

Rohstoffauswahl ist u.a. ökologischen Problemen und vor allem der schlechten Nachhaltigkeit von PVC-Folien geschuldet. Die toxischen Ausgangsstoffe bzw. Zwischenprodukte während der Herstellung (Chlor, Vinylchlorid), die Gefahr des Ausmigrierens umwelt- und gesundheitsschädlicher Weichmacher sowie die Entstehung giftiger Gase bei der Verbrennung seien hier als Kernprobleme genannt<sup>28-31</sup>. Der Werkstoff PVC weist zudem beträchtliche werkstoffliche Nachteile auf wie die Tatsache, dass die mechanischen Eigenschaften nur über Weichmacher und deren Konzentration sowie durch den Einsatz von Füllstoffen beeinflusst werden können<sup>32</sup>. Ein großes Problem in der Anwendung ist die Versprödung des Materials durch das Ausmigrieren des Weichmachers oder aber das „Herauswaschen“ desselben im Kontakt mit Lösungsmitteln<sup>33</sup>. Die wenigen Produkte, die auf alternativen Substanzklassen basieren und in den Markt eingeführt worden sind, werden von den Herstellern explizit als PVC-freie und umweltverträglichere Alternativen beworben und bestehen ausnahmslos aus PU<sup>34-36</sup>.

Es lässt sich demnach festhalten, dass mit den marktetablierten Produkten die Kundenwünsche zwar adressiert und die Bedürfnisse des Marktes bedient werden können, mit Blick auf die Verarbeitungseigenschaften und die Funktionalität der Folierungssysteme aber noch ein beträchtliches Verbesserungspotenzial besteht. Und auch aus ökologischer Sicht werden die heutigen Produkte den allgegenwärtigen Ansprüchen an Nachhaltigkeit nur wenig bis überhaupt nicht gerecht.

### Forschungsziel

Die zentrale Herausforderung des Projekts lag in der Entwicklung von thermoplastischen Polyurethanen (TPUs) mit guten mechanischen und ausgeprägten Formgedächtnis-Eigenschaften als Basismaterialien für eine in der Fahrzeugfolierung einsetzbare selbstklebende Folie. Dabei galt es, Verbesserungspotenziale zu erschließen, indem ein Konzept zur Repositionierbarkeit der Folie auf Substraten und zur thermisch induzierbaren Haftungssteigerung entwickelt wurde. Hierfür sollten zuvor festgelegte Strukturmuster durch gezielte Programmierung in Formgedächtnispolymer (FGP)-Folien eingebracht und anschließend mit Klebstoff beladen werden. Durch das temperaturinduzierte Auslösen des Formgedächtniseffektes (FGE) sollte es dann zu einer gezielten Glättung der Folie und folglich zu einem vollflächigen Kontakt und einer damit einhergehenden Freisetzung des Klebstoffs, verbunden mit einem Anstieg der Haftung der Folie auf dem Substrat kommen (Abbildung 2).



**Abb. 2** Schematische Darstellung des technologischen Ansatzes (links: FGP-Folie mit verringerter Kontaktfläche und geringer lokaler Klebstoffgrammatur; rechts: FGP-Folie mit vollflächigem Kontakt und erhöhter lokaler Klebstoffgrammatur). © Fraunhofer IAP

Damit sollte es möglich sein, mit guter lokaler Strukturauflösung und zu einem vom Nutzer festgelegten Zeitpunkt, das Adhäsionsverhalten von repositionierbar zu permanent verklebt zu schalten. Die Oberflächentextur der programmierten Folie sollte dabei nicht nur zur gezielten Beeinflussung der Adhäsionseigenschaften Verwendung finden, sondern auch ein nahezu blasenfreies Verkleben ermöglichen.

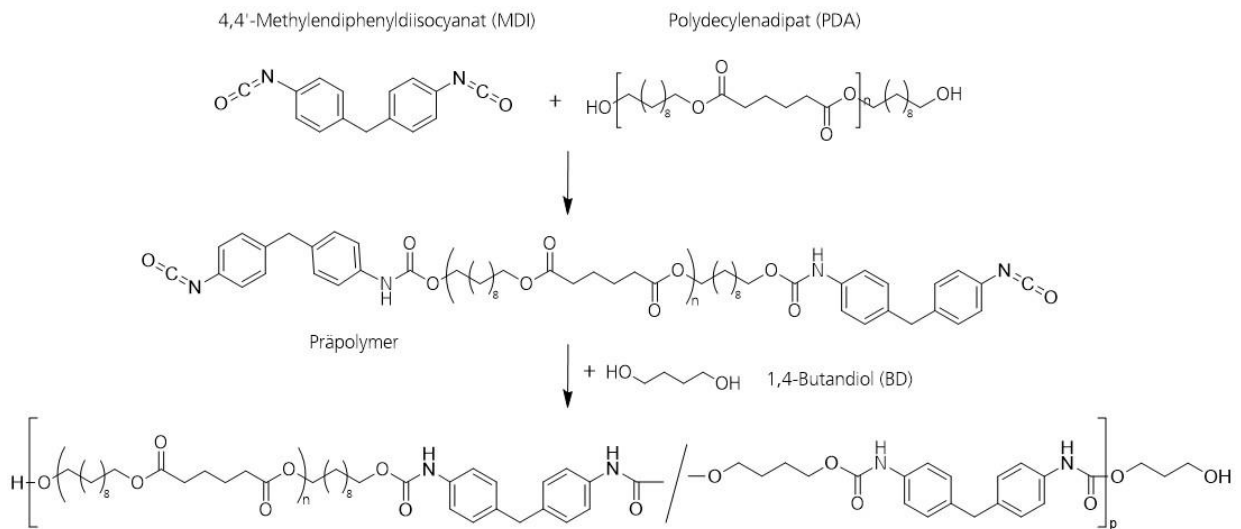
Neben den applikationsbezogenen Verbesserungen stellt dieses Konzept mit den TPU-basierten FGPs auch eine gesteigerte Nachhaltigkeit in Aussicht. Der Verzicht auf halogenhaltige Kunststoffe sowie die sich aus der chemischen Struktur der TPUs ableitende thermoplastische Verarbeitbarkeit stellen vielseitige Möglichkeiten hinsichtlich einer stofflichen Verwertung in Aussicht<sup>37</sup>. Um diesen Aspekt besser beurteilen zu können, sollten ein nachhaltiges Recyclingkonzept entworfen und Möglichkeiten für die stoffliche Verwertung des Foliensystems am Ende der Lebensdauer herausgearbeitet und evaluiert werden. Zentrale Aspekte waren die stoffliche Trennung von Folie und Klebstoff und das Aufzeigen von Wegen zur Erschließung einer effektiven und wirtschaftlichen stofflichen Verwertung.

Zudem bieten TPUs materialtechnische Vorteile. Durch die guten mechanischen Eigenschaften, die sich mit TPUs im Vergleich zu PVC erzielen lassen, können geringere Materialstärken und damit eine Materialersparnis ermöglicht werden, ohne auf Flexibilität verzichten zu müssen<sup>38,39</sup>. Und nicht zuletzt verfügen bestimmte Formgedächtnispolymere über selbstheilende Materialeigenschaften<sup>40-42</sup>. Dies begründet die Perspektive einer zusätzlichen, deutlichen Kosten- wie Materialersparnis gegenüber der Verwendung eines (zusätzlichen) Schutzlaminats wie bspw. einer Steinschlagschutzfolie, so dass eine Multifunktionalität in Aussicht gestellt wird.

---

## **Vorgehensweise und Forschungsergebnisse**

In dem Forschungsprojekt wurde die Einsatzfähigkeit von Formgedächtnispolymeren (FGPs) aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) für Fahrzeugfolierungssysteme untersucht. Dazu wurden in Synthesearbeiten bestimmte FGPs hergestellt, deren Schalttemperaturen zwischen 50 °C und 90 °C lagen. Diese wurden dann im Hinblick auf ihre thermischen, thermo-mechanischen und Formgedächtnis-Eigenschaften charakterisiert. Als Voraussetzung für ein vielversprechendes Materialverhalten in der Anwendung sollten die TPUs zu Folien verarbeitet, deren Oberfläche programmiert und anschließend mit einem Klebstoff versehen werden. Ziel war es, das Haftungs-niveau durch den Formgedächtniseffekt (FGE) schaltbar zu machen. Dabei sollte das Folierungssystem zu Beginn eine geringere Haftung aufweisen, um eine gute Repositionierbarkeit sicherzustellen. Nach dem Auslösen des FGE sollte durch Freisetzung des Klebstoffes aus den einprogrammierten Reservoirs auf der Oberfläche die Haftwirkung entsprechend ansteigen. Im Rahmen des Projekts wurden die TPUs mittels der Präpolymermethode synthetisiert. Dies ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.



**Abb. 3** Syntheschema der Präpolymermethode am Beispiel eines PDA-basierten TPU. © Fraunhofer IAP

Im Rahmen des molekularen Aufbaus wurden bestimmte Monomere eingesetzt und deren stöchiometrische Verhältnisse variiert. Zusätzlich wurden auch die Synthesebedingungen verändert. Mit Hilfe von dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) ließen sich die Phasenübergänge und Schmelztemperaturen der TPUs ermitteln. Die Durchführung von dynamisch-mechanischen Analysen (DMA), sowie Zugversuchen erlaubte die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens der TPUs. Unter Einsatz von zyklischen, thermo-mechanischen Messungen mit einem vorab definierten Temperatur- und Dehnungsprogramm wurden die Formgedächtniseigenschaften quantitativ ermittelt. Aus den Versuchen konnten Informationen zu den Struktur-Eigenschafts-Beziehungen abgeleitet werden. Mit steigendem stöchiometrischem Anteil von MDI und BD (Hartsegment) nahmen die Schmelztemperaturen und Kristallinitäten des Schaltsegments (Polyesters) ab. Gleichzeitig verbesserten sich die mechanischen Eigenschaften, wie der E-Modul, die Bruchdehnung und Stabilität. Weiterhin sank die Formrückstellbarkeit im ersten Zyklus; sie verbesserte sich allerdings ab dem zweiten Zyklus. Gegenüber kommerziellen Folierungsmaterialien wie PVC und PU zeigten die synthetisierten TPUs verbesserte mechanische Eigenschaften, insbesondere eine mechanische Strukturintegrität. In nachfolgenden Untersuchungen konnten zwei vielversprechende Kandidaten in Form eines aromatischen TPU und eines aliphatischen TPU identifiziert werden.

Applikationspezifische Untersuchungen machten es schließlich möglich, Aussagen über das Materialverhalten unter Anwendungsbedingungen zu treffen. Hierbei fokussierten sich die Analysen auf die Beständigkeit der Materialien in Abhängigkeit äußerer Einflüsse (Bewitterung). Hierbei zeigten die TPUs eine bessere chemische Beständigkeit gegenüber Flüssigkeiten, jedoch eine etwas schwächere hydrolytische Beständigkeit im Vergleich zu kommerziellen Folierungssystemen. Die Kratzfestigkeit und UV-Beständigkeit hingen stark von den dazugegeben Additiven, sowie der TPU-Formulierung selbst ab, sodass sich eine ähnliche Performance ergab. Aufgrund ihrer Beständigkeit konnten die FGP-Materialien dem Anforderungsprofil für den Einsatz als Fahrzeugfolierungen gerecht werden.

Durch die immer weiter steigende Bedeutung des Themas Nachhaltigkeit und der



Bedeutung einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft, wurde zusätzlich für die Folierungssysteme aus FGP ein Recyclingkonzept entwickelt (s. Abbildung 4).



**Abb. 4** Aspekte einer ganzheitlichen Kreislaufwirtschaft. © Fraunhofer IAP

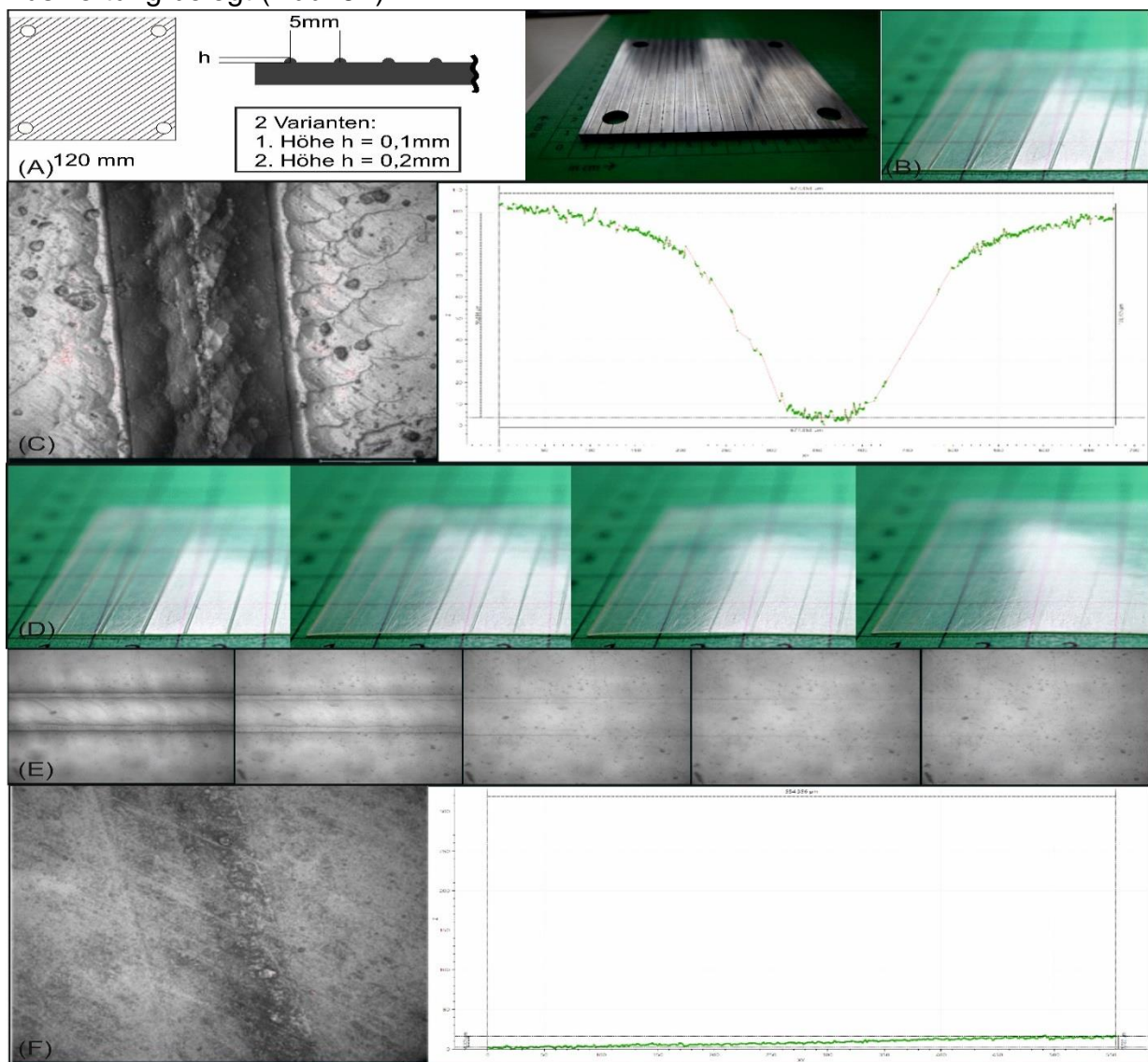
Mehrkomponentensysteme wie der Verbund von Klebstoff und TPU-Folie sind aus recyclingtechnischer Sicht herausfordernd. Es konnte im Labormaßstab gezeigt werden, wie sich eine Materialtrennung schnell und einfach durchführen lässt. Die TPU-Trägerfolie lässt sich infolge der Thermoplastizität einschmelzen und plastifizieren, sodass sie in den Materialkreislauf zurückgeführt werden kann. Ebenso konnte das Trennmittel aufbereitet werden, wobei der zurückgebliebene Klebstoff seine Klebwirkung beibehält. Insgesamt deuten sich technologische Möglichkeiten an, Folierungssysteme aus FGP aufzubereiten. Einzelne Teilaspekte im Materialkreislauf sind bereits für andere Abfallströme etabliert. Allerdings sind die Volumenströme eher gering, sodass nur ein geringer wirtschaftlicher Nutzen daraus gezogen werden kann.

Für die nachstehend beschriebene Herstellung der FGP-Folierungssysteme war die Aufskalierung der Polymersynthese ein wichtiger Schritt. Dazu wurden ausgewählte TPU-Formulierungen in größeren Mengen hergestellt. Infolge der Aufskalierung konnten in etwa 1,5 kg Muster pro Syntheseansatz erhalten werden, wobei die Syntheseparameter wie die Temperaturführung, die Reaktionszeiten, etc. schrittweise angepasst wurden. Als Ausgangsprodukt der Batch-Synthesen wurden im Rahmen der daran anknüpfenden Weiterverarbeitung Blöcke (Abb. 5A) oder Platten aus TPU hergestellt, die zunächst grob zerkleinert wurden (Abb. 5B). Durch eine anschließende feine Granulierung mit einer Mühle ließen sich dann TPU-Granulate (Abb. 5C) gewinnen. Das Granulat diente schließlich als Ausgangsmaterial für die schmelzebasierte Weiterverarbeitung im Extrusionsprozess zu Folien (Abb. 5D) für eine anschließende Oberflächenstrukturierung und Kleberkaschierung zur Erzeugung funktioneller Folierungssysteme aus FGP.



**Abb. 5** Verarbeitung von TPU; (A) Blockförmige Probe aus der Synthese, (B) zerkleinerte TPU-Stücke, (C) gemahlenes TPU-Granulat, (D) Folien für die Herstellung der Folierungssysteme © Fraunhofer IAP

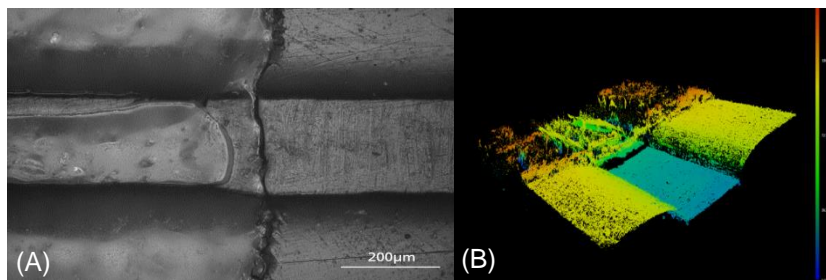
Es wurde untersucht, wie eine Strukturierung der FGP-Folie vorgenommen werden konnte. Hierzu wurden Prägewerkzeuge (Abb. 6A) mit einem Oberflächenprofil entwickelt, dessen Replikat sich auf die Oberfläche der Folie einprogrammieren ließ (Abb. 6B). Dazu wurde die FGP-Folie auf eine Temperatur oberhalb der Schalttemperatur erwärmt und das Prägewerkzeug angepresst. Unter Aufrechterhaltung der Auflast wurde die Folie abgekühlt, um den Programmierungsvorgang abzuschließen. Die Folie wurde mikroskopisch und topografisch untersucht. Im Ergebnis konnte eine erfolgreiche Strukturierung nachgewiesen werden (Abb. 6C). Im Sinne einer für die Programmierung erforderlichen hohen Strukturauflösung musste das Prägewerkzeug erwärmt werden. Durch das darauffolgende Erwärmen der Folie wurde der FGE ausgelöst, woraufhin die Strukturierung vollständig zurückgestellt werden konnte (Abb. 6D). Dies wurde ebenfalls mit Hilfe von mikroskopischen Aufnahmen (Abb. 6E) und einer topografischen Auswertung belegt (Abb. 6F).



**Abb. 6** Untersuchung der applikationsspezifischen Formgedächtniseigenschaften einer FGP-Folie: (A) Prägewerkzeug zur Programmierung der Folienoberfläche - schematisch (links) und Foto (rechts), (B) Programmierte FGP-Folie mit temporärer Oberflächenstrukturierung, (C) mikroskopische Aufnahme (links) und topografische Auswertung (rechts) eines einprogrammierten Reservoirs, (D) Auslösen des FGE durch Erwärmen der Folie auf eine Temperatur oberhalb der Schalttemperatur des Materials: Rückkehr in die permanente Form, (E) mikroskopische Aufnahme eines Reservoirs beim Auslösen des FGE, (F) mikroskopische Aufnahme (links) und topografische Auswertung (rechts) nach Auslösen des FGE. © Fraunhofer IAP



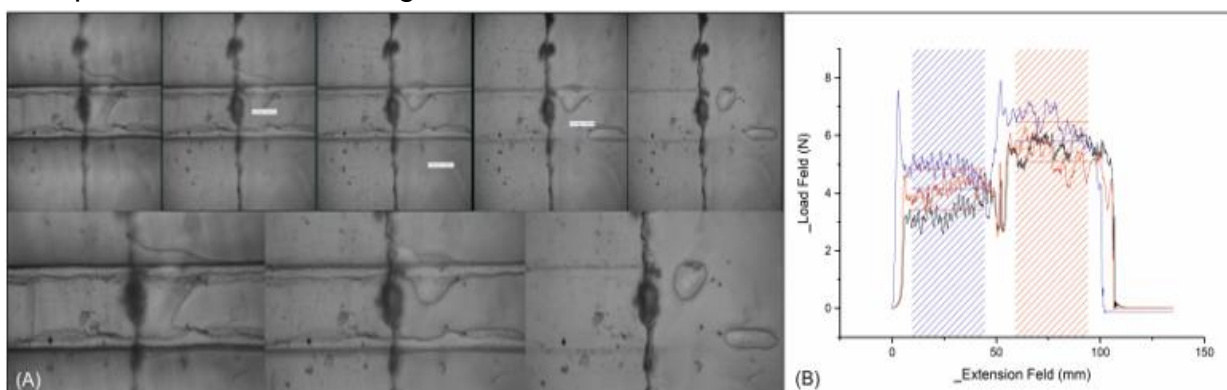
Zur Fertigstellung eines Folierungssystems musste ein Klebstoff auf die strukturierten Folien aufgetragen werden. Dazu wurden zunächst verschiedene Transferkleber getestet und verschiedenen Substrate überprüft. Je nach Klebstoff, Trägerfolie und Substrat variierten die Versuchsergebnisse. Dies hing insbesondere von der Polarität und den Oberflächeneigenschaften der Materialien ab. Für die Anwendung mussten dementsprechend Systeme gefunden werden, bei denen Klebstoff, FGP-Trägerfolie und Substrat genau aufeinander abgestimmt sind. Im Ergebnis konnte ein System bestehend aus einem synthetisierten FGP und einem Transferkleber für den Einsatz auf einer Edelstahloberfläche qualifiziert werden. Mikroskopische Aufnahmen (Abb. 7A) und topografische Analysen (Abb. 7B) belegten das erfolgreiche Einbringen des Klebstoffes in die einprogrammierten Reservoirs der Folienoberfläche.



**Abb. 7** Ergebnis der Klebstoffkaschierung: Grenzfläche zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Bereich einer programmierten (strukturierten) FGP-Folie; (A) mikroskopische Aufnahme und (B) dreidimensionale topografische Untersuchung. © Fraunhofer IAP

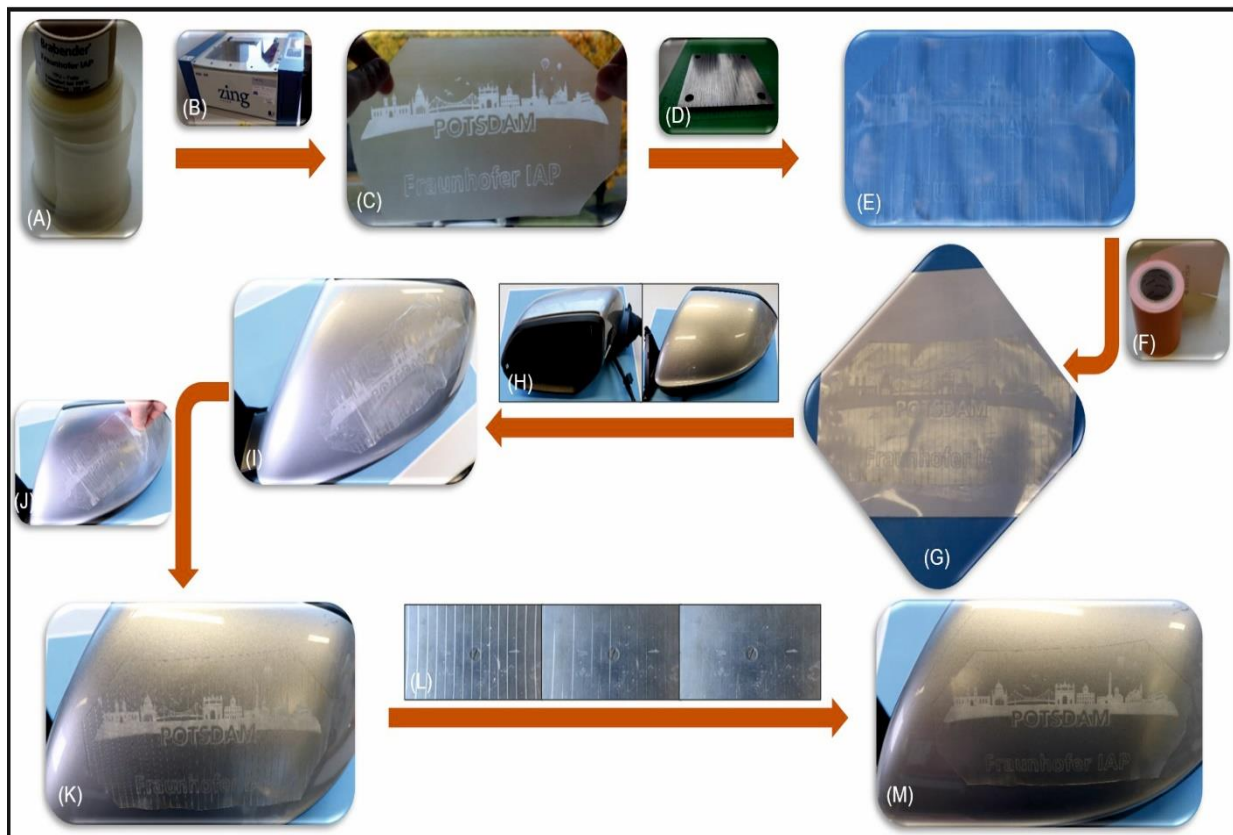
Darüber hinaus wurden sowohl Folienprogrammierung als auch Klebstoffbeschichtung in kontinuierlichen Verfahren abgebildet, wodurch eine prinzipielle industrielle Herstellung der FGP-Folierungssysteme gewährleistet werden kann.

Schließlich konnte gezeigt werden, wie nach dem Auslösen des FGE der Klebstoff aus den Reservoirs freigesetzt wird in Folge der Rückstellung der einprogrammierten Riefen in der Oberfläche (Abb. 8A). Dies konnte quantitativ anhand eines Peel-Tests bestätigt werden (Abb. 8B). Die Haftung im programmierten, strukturierten Zustand war geringer als nach dem Auslösen des FGE, wobei sich eine Haftsteigerung i.H.v. 28% ergab. Dies zeigt, dass das Haftungs-niveau durch das Auslösen des FGE für adäquate FGP-Folierungssysteme schaltbar gemacht werden kann, so dass zu Beginn eine geringe Anfangshaftung für die Repositionierbarkeit genutzt und nach dem Auslösen des FGE eine permanente Verklebung realisiert werden kann.



**Abb. 8** Ergebnis der Formrückstellung einer klebstoffbeschichteten, programmierten Folie: (A) Mikroskopische Aufnahme der Grenzfläche zwischen Klebstoffbeschichtung und unbeschichtetem Bereich während des FGE, (B) Peel-Test vor (blau schraffiert) und nach (rot schraffiert) dem Schaltvorgang. © Fraunhofer IAP

Zur Untersuchung der Praxistauglichkeit wurde eine FGP-Folie (Abb. 9A) mit einem Lasergravur- und -schneidsystem (Abb. 9B) konfektioniert (Abb. 9C), mit einem Prägwerkzeug (Abb. 9D) strukturiert (Abb. 9E) und mit einem Transferkleber (Abb. 9F) laminiert (Abb. 9G). Das FGP-Folierungssystem wurde anschließend auf einen Seitenspiegel eines Pkws (Abb. 9H) aufgebracht (Abb. 9I) und konnte infolge der geringeren Anfangshaftung repositioniert werden (Abb. 9J). Durch Erwärmen der repositionierten Folie (Abb. 9K) wurde der FGE ausgelöst. Die einprogrammierten Riefen stellten sich zurück (Abb. 9L), wodurch der Klebstoff aus den Reservoirs freigesetzt wurde und die Folie schließlich permanent am Seitenspiegel verklebt war (Abb. 9M). Damit konnte die im Projekt anvisierte Funktionalität für neuartige Folierungssysteme nachgewiesen werden.



**Abb. 9** Applikation eines Folierungssystems aus FGP; (A) FGP-Trägerfolie, (B) Lasergravur- und Schneidsystem, (C) konfettierte FGP-Folie, (D) Prägwerkzeug, (E) konfettierte FGP-Folie mit einprogrammierter Oberflächenstrukturierung, (F) Transferkleber, (G) FGP-Folierungssystem, (H) Seitenspiegel, (I) positionierte FGP-Folierung mit geringer Anfangshaftung, (J) Repositionierung, (K) repositionierte FGP-Folierung, (L) Auslösen des FGE zur Freigabe des Klebstoffes aus den einprogrammierten Reservoirs, (M) permanent verklebte FGP-Folierung mit gesteigerter Haftung. © Fraunhofer IAP

## Zusammenfassung

Das Projektziel bestand darin, Formgedächtnispolymere (FGPs) für den Einsatz in Fahrzeugfolierungssystemen zu qualifizieren, um so eine Alternative zu den marktgängigen PVC-Fahrzeugfolierungen bereitzustellen. Hierzu wurden neuartige Trägerfolien aus FGP entwickelt. Als Materialtechnologie dienten thermoplastische Polyurethane (TPUs). In Synthesearbeiten erfolgte ein Maßschneiden der physikalischen und funktionalen Eigenschaftsprofile der TPUs vor dem Hintergrund

ihrer thermischen, thermo-mechanischen und Formgedächtnis-Eigenschaften sowie weiterer applikationsrelevanter Eigenschaften wie der Klebstoffhaftung und dem Materialverhalten in anwendungsnaher Umgebung. Die Struktur-Funktionsbeziehungen erlaubten eine tiefgehende Bewertung der Materialien für den Einsatz in der Fahrzeugfolierung. Im Sinne der Nachhaltigkeit wurde ein Recyclingkonzept entwickelt. Die Möglichkeit zur Entfernung des Klebstoffes und zum werkstofflichen Recyceln der TPU-Folie, begünstigt durch deren thermoplastischen Charakter, konnte im Labormaßstab nachgewiesen werden. In einem weiteren Schritt wurde ein Handlungsleitfaden ausgearbeitet, um die Oberfläche einer TPU-Folie mit Hilfe eines Programmierungsschrittes zu strukturieren. Anschließend konnte ein Klebstoff in die Kavitäten eingebracht werden. Nichtsdestotrotz ließ sich eine leichte Repositionierbarkeit der Folie auf einem Substrat erreichen. Im Rahmen von inline-Prozessen gelang es, den Nachweis für eine kontinuierliche Programmierung mithilfe einer strukturierten Walze und für eine kontinuierliche Klebstoffbeschichtung unter Verwendung eines Kalanders zu erbringen. Das Auslösen des Formgedächtniseffektes (FGE) führte dann zur lokalen Freisetzung des Klebstoffes aus den einprogrammierten Reservoirs. Infolgedessen ließ sich ein deutlicher Anstieg des Haftvermögens für die Folie auf dem Substrat nachweisen. Damit wurde der Proof-of-Principle für eine thermisch induzierbare Steigerung der Haftung durch das Auslösen eines FGE erbracht. Dies führte zur permanenten Verklebung der Folie auf dem Substrat. Damit stellen Fahrzeugfolierungssysteme mit Formgedächtniseigenschaften einen funktionalen Mehrwert und eine nachhaltige Alternative zu den marktetablierten Systemen dar.

---

Besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn Dr. Thorsten Pretsch unter 0331 568 1414 und Herrn Dennis Schöfeld unter 0331 568 1719.

## Literatur:

- [1] Website 3M Werbetechnik Anwendungen. 20.02.2024; Available from: [https://www.3mdeutschland.de/3M/de\\_DE/werbetechnik/anwendungen/](https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/werbetechnik/anwendungen/)
- [2] Avery Dennison Broschüre - True Impact, Avery Dennison Corporation
- [3] 3M Broschüre – 3M commercial graphics, 3M Deutschland GmbH
- [4] 3M Broschüre – 3M commercial solutions, 3M Deutschland GmbH
- [5] Grand View Research - Automotive Wrap Films Market Analysis By Application
- [6] Grand View Research - Automotive Wrap Films Market Size Worth \$10.8 Billion By 2025
- [7] Statistics - Graphic Film – Global Market Outlook (2017-2026)
- [8] Otter J W, Watts G R. Patent WO 91/006424, positionable-repositionable pressure-sensitive adhesive, 1991
- [9] Buchan G A, Stine C, Mazich K A. Patent US 2017/0247577 A1, repositionable adhesive, 2017
- [10] Ochi K. Patent EP 0070524 B1, pressure-sensitive adhesive sheet structure having relocatable properties, 1981
- [11] Hamilton P W, McGuire K S, Poland J E, Bouthilet A L. Patent US 2005/0112314 A1, High bond strength, repositionable adherent sheet, 2005
- [12] Kaufmann M, Selbstklebefolien einfach zu verkleben – mit Luftkanälen. 14.03.2014; Available from: [https://www.fp-digitaldruck.de/blog/selbstklebefolie\\_einfach\\_zu\\_verkleben\\_mit\\_luftkanaelen](https://www.fp-digitaldruck.de/blog/selbstklebefolie_einfach_zu_verkleben_mit_luftkanaelen)
- [13] Kutschera E, Luftkanal-Technologie. 31.08.2018; Available from: <https://www.luk-design.de/luftkanal-technologie/>
- [14] Hannington M, Iyer P. Patent US 6630049 B2, adhesive articles with improved air egress and methods of making the same, 2003
- [15] Webster B G. Patent US 2007/0048478 A1, Core and release liner for adhesive film, 2007
- [16] QLAB, Florida-Außenexpositionstests. 20.02.204; Available from <https://www.q-lab.com/de-de/test-services/florida.aspx>
- [17] QLAB, Normen für die Florida-Freibewitterung. 20.02.204; Available from: <https://www.q-lab.com/de-de/resources/standards/test-service/florida>
- [18] QLAB, Beschleunigte Labortests. 20.02.204; Available from: <https://www.q-lab.com/de-de/test-services/accelerated-laboratory.aspx>
- [19] SKZ, Bewitterung, UV-Beständigkeit und mehr!. 20.02.204; Available from: <https://www.skz.de/pruefung/verfahren/bewitterung>
- [20] Polymer Service GmbH Merseburg, Kratzbeständigkeit. 22.06.2023; Available from: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Kratzbest%C3%A4ndigkeit>
- [21] DIN EN ISO 1518-1:2011-09 Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Kratzbeständigkeit - Teil 1: Verfahren mit konstanter Last und/oder DIN EN ISO 1518-2:2012-01 Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Kratzbeständigkeit - Teil 2: Verfahren mit kontinuierlich ansteigender Last
- [22] wrap-a-car.de, Steinschlagschutzfolie. 20.02.2024; Available from: <https://www.wrap-a-car.de/steinschlagschutzfolie/>
- [23] Bruxsafol, Steinschlagschutzfolien. 13.09.2022; Available from: <https://bruxsafol.de/2016/05/01/stx-steinschlagschutzfolien/>
- [24] 3M, Lackschutz. 13.09.2022; Available from: [https://www.3mdeutschland.de/3M/de\\_DE/autofolie/lackschutzfolie-steinschlagschutzfolie/](https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/autofolie/lackschutzfolie-steinschlagschutzfolie/)
- [25] Produkte: Avery Dennison SPF-XI. 13.09.2022; Available from: <https://graphics.averydennison.de/de/home/graphics-products/vehicle-wrapping-films/supreme-protection-film.html> oder 3M Venture Shield 7510E. 13.09.2022; Available from: [https://www.sks-gmbh.com/news/3m-news/item/3917-neue\\_lackschutzfolie\\_3m\\_ventureshield\\_7510\\_e.html](https://www.sks-gmbh.com/news/3m-news/item/3917-neue_lackschutzfolie_3m_ventureshield_7510_e.html)
- [26] Silvestro B, How This Magical Self-Healing Film Protects Cars From Scratches. 06.09.2017; Available from: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/buying-maintenance/a12184664/how-this-magical-self-healing-film-protects-cars-from-scratches/>
- [27] Renoson Industries Ltd., What is Self Healing Paint Protection Film?. 29.07.2018; Available from: <https://www.renoson.com/blog/what-is-self-healing-paint-protection-film>
- [28] Schulz S C, PVC: Was du über den Kunststoff wissen solltest. 10.05.2018; Available from: <https://utopia.de/ratgeber/pvc-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/>



- [29] verbraucherzentrale, So gefährlich ist Plastik für die Gesundheit. 22.11.2023; Available from: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/umwelt-haushalt/wohnen/gefahren-fuer-die-gesundheit-durch-plastik-7010>
- [30] Classen, PVC Bodenbeläge noch immer gesundheitlich bedenklich. 13.09.2022; Available from: <https://www.classen.de/de/news/oeko-test-bestaetigt-pvc-bodenbelaege-noch-immer-gesundheitlich-bedenklich->
- [31] Uniterra, Chlorstory. 13.09.2022; Available from: <http://www.uniterra.de/chlorstory/c0301613.htm>
- [32] Kunststoffe.de, Polyvinylchlorid mit Weichmacher (PVC-P, Weich-PVC). 13.09.2022; Available from: <http://www.kunststoffe.de/themen/basics/standardthermoplaste/polyvinylchlorid-pvc/artikel/polyvinylchlorid-pvc-p-weich-pvc-644705>
- [33] „Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid (PVC)“ durch das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT in Pfinztal, Mai 2005
- [34] Produkt: 3M Envision (Markteinführung 2012). 13.09.2022; Available from: [https://www.3mdeutschland.de/3M/de\\_DE/werbetech/ envision-print-films-480mc/](https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/werbetech/ envision-print-films-480mc/)
- [35] Produkt: Avery Dennison MPI 1405 (Markteinführung 2017). 13.09.2022; Available from: <https://www.printingnews.com/wide-format-signage/substrates/product/12352450/avery-dennison-graphics-solutions-mpi-1405>
- [36] Produkt: OrafolOrajet 3981RA (Markteinführung 2014). 13.09.2022; Available from: <https://www.orafol.com/gp/europe/de/news-reader/items/orajet-3981ra-premium-eco-digital-print>
- [37] Nikje M M A, Garmarudi A B, Idris A B. Polyurethane Waste Reduction and Recycling: From Bench to Pilot Scales, Designed Monomers and Polymers, 2011, 14, 5, 39
- [38] Prisacariu C, Polyurethane Elastomers, 2011, ISBN 978-3-7091-0513-9, Springer Wien NewYork
- [39] Szycher M, Szycher's Handbook of Polyurethanes, 2013, ISBN 978-1-4398-6313-8, CRC Press Taylor&Francis Group, LLC
- [40] Jorcín J-B, Scheltjens G, Van Ingelgem Y, Tourwé E, Van Assche G, De Graeve I, Van Mele B, Terryn H, Hubin A. Investigation of the self-healing properties of shape memory polyurethane coatings with the 'odd random phase multisine' electrochemical impedance spectroscopy, ElectrochimicaActa, 2010, 55, 6195
- [41] González-García Y, Mol J M C, Muselle T, De Graeve I, Van Assche G, Scheltjens G, Van Mele B, Terryn H. A combined mechanical, microscopic and local electrochemical evaluation of self-healing properties of shape-memory polyurethane coatings, ElectrochimicaActa, 2011, 56, 9619
- [42] Szmecnyk T, Sienkiewicz N, Wozniak J, Strzelec K. Polyurethanes as self-healing materials, Current Chemistry Letters, 2015, 4, 61