

Hochglanzprodukte leichter entformen

Beschichtung und Nanostrukturierung der Werkzeugoberfläche reduziert Entformkräfte

Fraunhofer-Forscher haben eine antiadhäsive Beschichtung für Formenwerkzeuge entwickelt, die eine prozesssichere Abformung auch hochglänzender Kunststoffprodukte gewährleistet. Entscheidend war dabei eine Kombination von Maßnahmen: einerseits die Oberflächenchemie des Werkzeugs über eine Beschichtung anzupassen, andererseits auf dieser Oberfläche gezielt eine nanoskalige Topographie einzustellen.

Die Herstellung hochglänzender Kunststoffoberflächen stellt Kunststoffverarbeiter vor große Herausforderungen, da ein zunehmender Politurgrad der Werkzeugoberflächen in der Regel zu starken Anhaftungen der verwendeten Polymere führt. Eine zuverlässige Produktion von Kunststoffprodukten mit sehr glatten Oberflächen wird so massiv erschwert oder sogar verhindert. Ein Mittel zur Verminderung von Abformkräften ist es, auf das Formenwerkzeug eine antiadhäsive Beschichtung mit möglichst niedriger Oberflächenenergie und geringem polaren Anteil wie z.B. eine silikonhaltige Beschichtung [1] aufzubringen.

Zwar sind geeignete Schichtmaterialien [2] und Abscheideprozesse [3] bereits relativ gut erforscht und in vielen Produktionsprozessen etabliert, dennoch bestehen eine Reihe von Unzulänglichkeiten: Entweder erweisen sich die Schichten als nicht hinreichend verschleißfest oder sie führen effektiv zu einer unbeabsichtigten hohen Aufrauhung der Werkzeugoberfläche und mindern so die optische Anmutung und Funktion der Formteile bis zu einem Grad, dass diese durch die Qualitätskontrolle fallen.

Komplexer Verlauf der Entformkräfte

Der Zusammenhang zwischen chemischer sowie struktureller Beschaffenheit des Formenwerkzeugs und der zur Entformung eines Teils aufzuwendenden Kraft ist sehr komplex. So beeinflussen neben Material- und Prozessbedingungen auch die Rauheit bzw. Strukturierung der Werkzeugoberfläche die Entformkräfte [4]. Im Bereich der Mikro-Rauheiten liegt die Ursache dafür in mechanischen Verhakungen sowie der durch die Rauheit stark vergrößerten Oberfläche. Eine abnehmende Strukturierung bzw. Rauheit des Werkzeugs erleichtert zunächst die Entformung, da die Abstände der Rauheitsspitzen durch die Politur immer kleiner werden. Es bilden sich mikroskopische Hohlräume wodurch die effektive Kontaktfläche zwischen Polymer und Werkzeug verringert wird; eine 100-%-ige Abformung der Oberfläche erfolgt nicht mehr. Verhakungen werden damit immer seltener.

Dieser Effekt kehrt sich allerdings im Übergang zu glänzenden Oberflächen um und die Abformkräfte steigen wieder erheblich an [5]. Die Ursache liegt darin, dass die effektive Kontaktfläche, zwischen Poly-

mer und rauer Werkzeugoberfläche mit zunehmendem Poliergrad wieder ansteigt. An der Kontaktfläche zwischen Polymer und Werkzeug sorgen physikalisch-chemische Wechselwirkungen für diese starke Adhäsion. Die wirkenden Kräfte können Van-der-Waals-Kräfte, Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen oder sich ausbildende ionische oder kovalente chemische Bindungen sein.

Wechselwirkungen und effektive Kontaktfläche reduzieren

Eine effektive Beschichtung muss deshalb gleichzeitig die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen und die effektive Kontaktfläche reduzieren ohne dabei den Hochglanzeindruck zu mindern. Der hier verwendete Forschungsansatz vereint den Lösungsansatz der Minimierung der chemischen Wechselwirkungen mit einer gezielten Reduktion der Kontaktfläche durch eine Optimierung der Beschichtungstopographie im Nanometerbereich. Die entwickelten Schichtsysteme bestehen aus einer verschleißfesten PVD-Schicht (Physical Vapour Deposition) zur Vorgabe einer definierten Topogra-

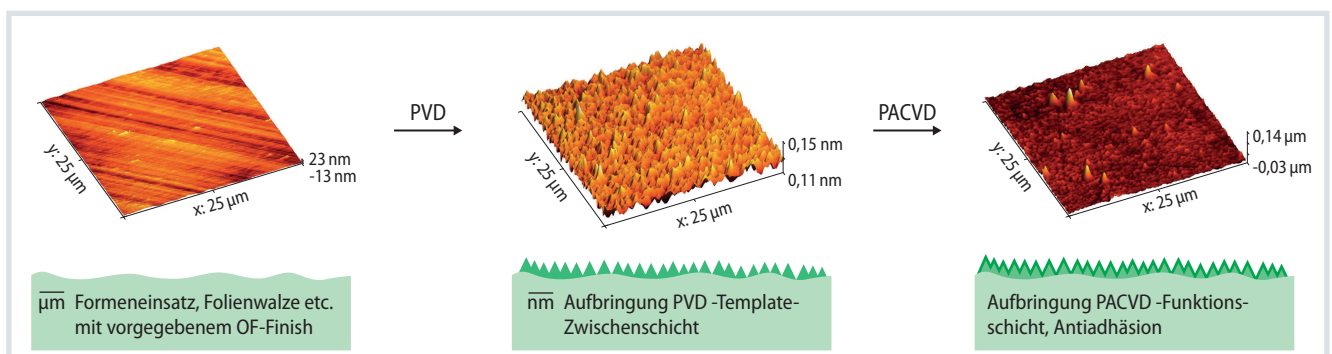


Bild 1. Entwicklung einer nanoskaligen, antiadhäsiven Beschichtung mit einer definierten Rauheit ($R_a < 10 \text{ nm}$): Dabei wird eine PVD-Template-Zwischenschicht zur Topographieeinstellung mit einer antiadhäsiven PACVD-Funktionsschicht kombiniert © Fraunhofer LBF; Grafik: © Hanser

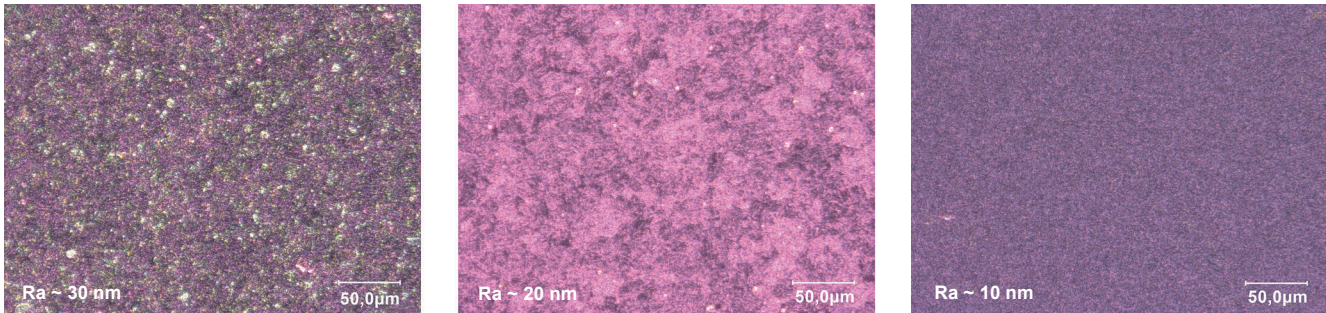


Bild 2. Lichtmikroskopische Aufnahmen (1000-fache Vergrößerung, Seitenlicht) kombinierter PVD- (CrN) und PACVD-Schichten (Sicon-Funktionsschicht) mit absteigender Rauheit. Die unterschiedlichen Topographieeinstellungen sind deutlich zu erkennen © Fraunhofer LBF

phie (Template-Schicht) und einer antiadhäsiven PACVD-Deckschicht (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) (**Bild 1**), die in einem plasmaaktivierten CVD-Verfahren hergestellt wird.

Um den Einfluss einer nanoskaligen Rauheit auf die Entformkräfte zu untersuchen, mussten unterschiedliche Topographieeinstellungen durch diese Kombinationsschichten verwirklicht werden. Diese unterschiedlichen Rauheiten können lichtmikroskopisch sehr gut unterschieden werden (**Bild 2**). Dabei ist zu beachten, dass Rauhwerte von Hochglanzwerkzeugoberflächen normalerweise in einem Bereich von ungefähr $R_a < 20 \text{ nm}$, meist $< 10 \text{ nm}$ liegen.

Um den Einfluss der Oberflächenchemie auf die Haftung zu untersuchen, wurden ausgewählte siliziumhaltige PACVD-Beschichtungen getestet (**Tabelle**), die sich bezüglich ihrer Zusammensetzung sowie hinsichtlich ihres Benetzungsvermögens (bestimmt mittels Wasserkontaktwinkel) unterscheiden. Durch präzise Kontrolle der Beschichtungsbedingungen konnten diese mit nahezu identischer Rauheit hergestellt werden, wodurch sich der Einfluss der chemischen Wechselwirkung unabhängig von der Rauheit untersuchen ließ. Als am besten geeignete antiadhäsive Deckschicht kristallisierte sich Sicon (Fraunhofer IST, Braunschweig) heraus, bei der es

sich um eine mit Silizium und Sauerstoff modifizierte amorphe Kohlenwasserstoffschicht (a-C:H:Si:O) handelt.

Quantifizierung der Haftung

Für die Untersuchung auftretender Haftkräfte an hochglanzpolierten Werkzeugoberflächen wurde eine Zugprüfmaschine so modifiziert, dass ein variothermer Prägeprozess für PET und PE nachgestellt werden konnte (**Bild 3**). Die Prüfbedingungen wurden so gewählt, dass eine auf der Rondenoberfläche eingravierte Mikrostruktur bestmöglich abgeformt werden konnte. Anlagenbedingt unterschieden sich die angewendeten Prüfzyklen von den industriell verwendeten Prozesszyklen.

Als Testsubstrat dienten polierte Rundkörper aus dem gehärteten Werkzeugstahl M333 (Böhler) mit 35 mm Durchmesser. Diese Prüfkörper wurden auf einer $80 \times 80 \text{ mm}$ großen Auflage montiert, die auf einer kühlbaren Heizplatte befestigt wurde. Die Temperaturmessung erfolgte über einen Messfühler im Inneren der Heizplatte. Die Kunststoffprobe klebte an einem Stempel mit 40 mm Durchmesser, wobei für jede Messung eine frische Probe verwendet wurde. Zwischen Stempel und Traverse befand sich aus versuchstechnischen Gründen ein Gumpipuffer, der für ein besseres Regelverhalten beim Aufbau der Abzugskraft den Verfahrensweg vergrößerte. Die variotherme Versuchsweise erfolgte mit einer externen Temperatursteuerung des Ofens sowie mit einem Ventilator zum Kühlen.

Die Kraft-Zeit-Kurve am Beispiel einer amorphen PET-Folie (Glasübergangstemperatur $T_g = 80^\circ\text{C}$) zeigt **Bild 4**. Zu Versuchsbeginn wurde ein Abstand von 4 mm zwischen oberen und unteren Stempel angefahren. Der eigentliche Versuch beginnt mit dem Zusammenfahren der Plat-

ten mit 5 mm/min und dem Aufbauen der Presskraft von 250 N (26 N/cm^2). Nach deren Erreichen wurde diese über einen Zeitraum von 20 min konstant gehalten, wobei für die ersten 10 min die Temperatur auf 105°C (25°C über T_g) konstant gehalten wurde. Anschließend begann das Abkühlen auf eine Entformtemperatur von 70°C (10°C unterhalb von T_g). Hiernach wurde zur Haftkraftprüfung der obere Stempel mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/s abgezogen. Das aus einer Weg-Zeit-Kurve ermittelte Maximum (vor dem Ablösen des Kunststoffes vom Prüfkörper) stellt die individuelle Entformkraft des Einzelexperiments dar. Analog einer Bruchkraft unterliegt die Entformkraft vielen Einflussgrößen (hier z.B. Oberflächendefekten der PET-Folien), sodass die in den Versuchen erhaltenen Werte einer Streuung unterliegen und ein belastbarer statistischer Mittelwert in mehreren Messungen ermittelt werden muss.

Einfluss der Beschichtungen

Mit diesem Versuchsaufbau lassen sich die beim Heißprägen von PE und PET auftretenden Haftkräfte systematisch unter Laborbedingungen untersuchen (**Bild 5**). »

Schicht	Normbezeichnung (ISO 20523:2017-09)	WKW
Sicon	a-C:H:Si:O	102°
Sican	a-C:H:Si	95°
SiOx	Siliziumoxid	46°

Tabelle. Wasserkontaktwinkel (WKW) für verschiedene siliziumhaltige PACVD-Schichten. Während Sicon und Sican mit über 90° hydrophob sind, zeigt die keramische SiOx-Schicht nur einen Wert von 46° Quelle: Fraunhofer LBF

Dank

Das IGF-Vorhaben (Nr. 19545 N) der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. (FGK), Darmstadt, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Aufgrund der verschiedenartigen Polymertypen (PET polar, PE unpolar) unterschieden sich die beim Heißprägen beobachteten Haftkräfte mit polierter Stahloberfläche signifikant voneinander. Die Werte für PET (ca. 93 N/cm^2) lagen mehr als doppelt so hoch wie die bei PE beobachteten Werte (ca. 36 N/cm^2). Für beide Polymere führten die ausgewählten antiadhäsiven Beschichtungen jeweils zu einer signifikanten Reduktion der Haftkräfte:

- PE: poliert > Sican > Sicon \approx SiOx, wobei die Entformkraft für Sicon und SiOx um ca. 22% abnimmt sowie
- PET: poliert > SiOx > Sicon \sim Sican, wobei die Sicon- und Sican-Beschichtungen die Entformkräfte gegenüber der hochpolierten Metalloberfläche ebenfalls um ca. 20% reduzierten.

Die Autoren

Dr. Bernd Steinhoff ist seit 2012 am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt tätig und leitet die Gruppe Thermoplastverarbeitung; bernd.steinhoff@lbf.fraunhofer.de

Dr. Hans Kothe ist seit 2012 Wissenschaftler in der Gruppe Thermoplastverarbeitung am Fraunhofer LBF; hans.kothe@lbf.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Martin Keunecke ist seit 1998 am Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST in Braunschweig tätig und leitet die Gruppe Tribologische Systeme; martin.keunecke@ist.fraunhofer.de

Dr. Frank Burmeister arbeitet seit 2000 am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg und leitet das Team Funktionale Schichtsysteme; frank.burmeister@iwm.fraunhofer.de

Dr. Frank Meyer ist seit 2016 Wissenschaftler in der Arbeitsgruppe Tribologische und funktionale Schichtsysteme am Fraunhofer IWM; frank.meyer@iwm.fraunhofer.de

Jürgen Zosel ist Managing Director der Orafol Fresnel Optics GmbH in Apolda; juergen.zosel@fresnel-optics.de

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-07

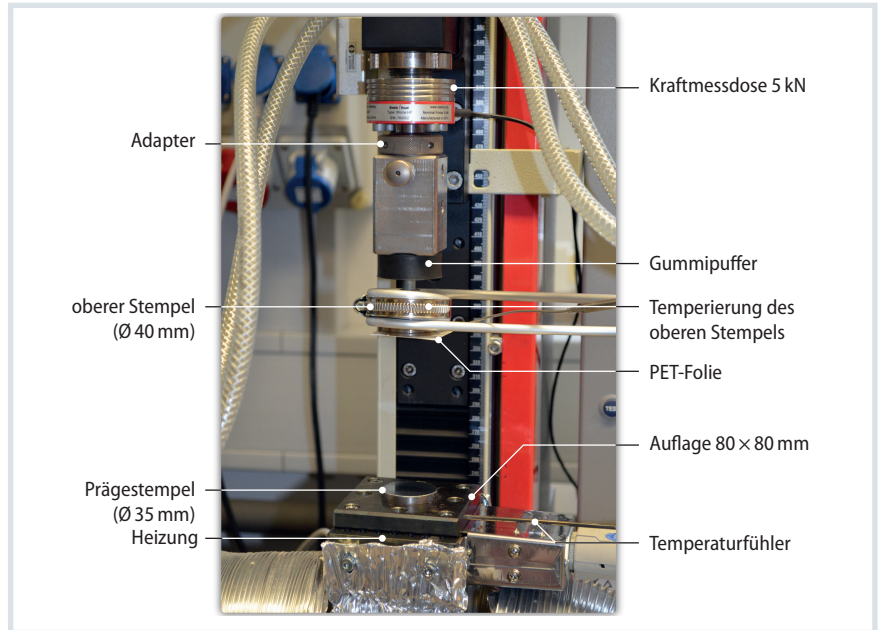


Bild 3. Modifizierte Zugprüfmaschine zur Nachstellung eines variothermen Heißprägeprozesses

Quelle: Fraunhofer LBF; © Hanser

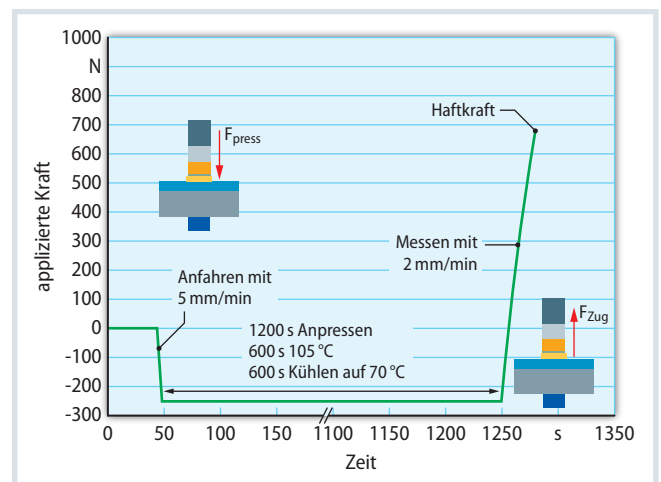
Neben der Oberflächenchemie spielte auch die spezielle Oberflächentopographie im Hochglanzbereich eine entscheidende Rolle, was sowohl für PE als auch PET beobachtet werden konnte (**Bild 6**). Bezüglich der Entformkraft von PE wies eine hochglanzpolierte ($R_a \sim 1\text{--}3 \text{ nm}$) Oberfläche mit 35 N/cm^2 den höchsten Wert auf. Im Hochglanzbereich reduzierte eine reine Sicon-Antihaftbeschichtung gegenüber der polierten Metalloberfläche die Entformkraft auf 29 N/cm^2 . Durch die neuartige Mehrlagenbeschichtung trat nochmals eine leichte Reduktion auf 28 N/cm^2 auf. Außerhalb des Hochglanzbereichs zeigte eine aufgeraute Oberfläche ohne Antihaftbeschichtung ($R_a = 130 \text{ nm}$) mit 3 N/cm^2 nur eine sehr niedrige Haftung.

Im Falle von PET hingegen erforderte diese raue Oberfläche mit 92 N/cm^2 die höchste Entformkraft. Die hochglanzpolierte Metalloberfläche wies hierbei eine Haftkraft von 87 N/cm^2 auf. Durch das Beschichten mit einer Sicon-Antihaftbeschichtung reduzierte sich diese Entformkraft signifikant auf ca. 70 N/cm^2 . Eine weitere deutliche Minimierung zeigte sich durch die Verwendung des neuentwickelten Beschichtungssystems, mit dem sich die Entformkraft auf 56 N/cm^2 reduzierte.

Charakterisierung der Rauheit

Um die Zusammenhänge zwischen Oberflächenchemie, Topographie und beobachteten Entformkräften besser verstehen

Bild 4. Kraft-Zeit-Verlauf für das Heißprägen einer PET-Folie. Der Prägeprozess besteht aus den drei Phasen Anfahren, Anpressen und Messen. Quelle: Fraunhofer LBF; Grafik: © Hanser



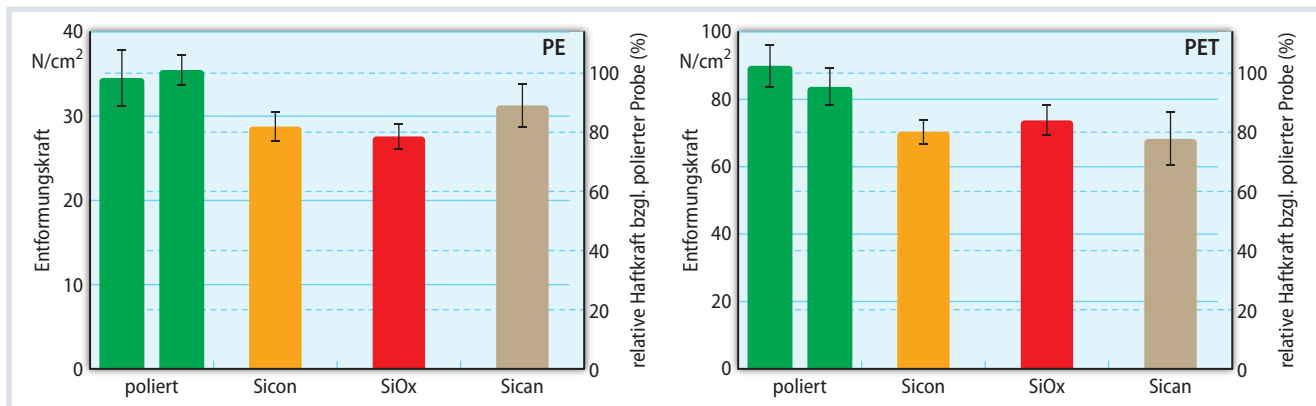


Bild 5. Einfluss der Oberflächenchemie auf die Haftkräfte von PE (links) und PET (rechts) beim Heißprägen: Alle getesteten Oberflächenbeschichtungen führen zu reduzierten Entformkräften Quelle: Fraunhofer LBF; Grafik: © Hanser

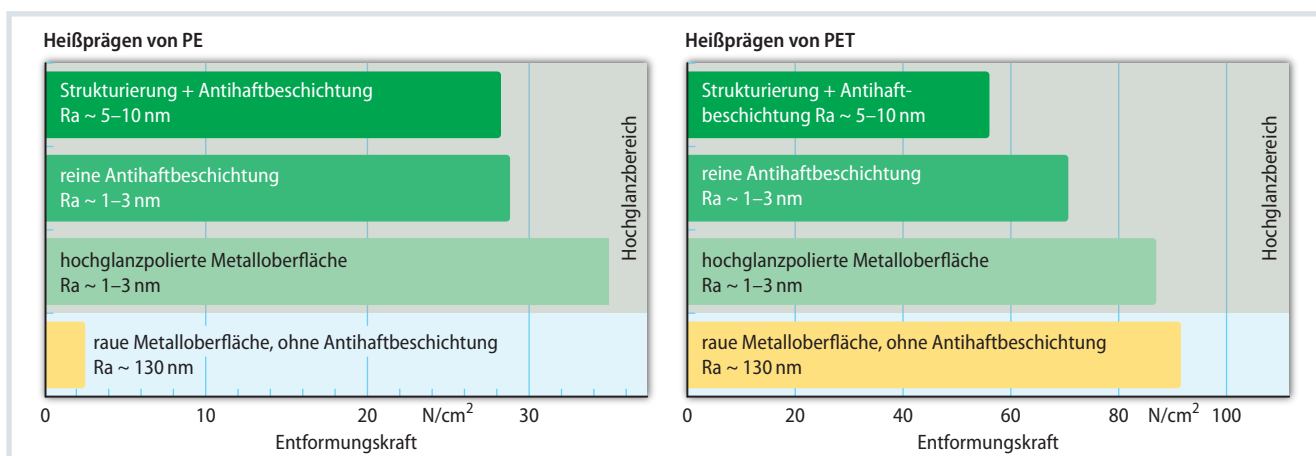


Bild 6. Einfluss der Oberflächenrauheit und -chemie auf die Entformkraft beim Heißprägen von PE und PET. Die raue Metalloberfläche ist nur zur Vergleichszwecken aufgenommen worden Quelle: Fraunhofer LBF; Grafik: © Hanser

zu können, erfolgten eine detaillierte Charakterisierung der Rauheit von nanostrukturierten Oberflächen. Hierbei erwiesen sich sowohl die Weißlichtinterferometrie (WLI) als auch die Rasterkraftmikroskopie (AFM, atomic force microscopy) als geeignete Methoden.

Die im Projekt erarbeiteten Kombinationsschichtsysteme erzielten durch Modifikation der Oberflächenchemie und durch Steuerung der Kontaktfläche über ein gezieltes Einstellen der Rauheitsamplituden und Spitzendichten eine Haftkraftreduktion um ca. 60% gegenüber hochglanzpolierten Stahloberflächen. Im Gegensatz zu anderen, aus der Literatur bekannten Arbeiten, gelang dies erstmalig speziell im Bereich sehr glatter Oberflächen (Ra < ca. 10 nm), die für Hochglanz-Kunststoffoberflächen typisch sind.

Hierbei ist zu beachten, dass die Beschreibung einer Oberflächentopographie über verschiedenste Oberflächenparameter stattfinden kann. Der physikalische Zusammenhang zwischen den ein-

zelnen Parametern und der auftretenden Haftkraft kann anhand von Kontaktmodellen simuliert werden. Bei den Untersuchungen wurde eine Vielzahl dieser Parameter bzgl. ihrer Aussagekraft gegenüber den beobachteten Haftkräften getestet. Als in der Kombination aussagekräftige Parameter wurden die Rauheitsamplitude (Ra) und die Spitzendichte (Sds) identifiziert. Es wurde beobachtet, dass bei vergleichbaren Haftkräften für Beschichtungen mit einer Spitzendichte (Sds) < 2 µm⁻² glattere Oberflächen (Ra < ca. 10 nm) erzeugt werden konnten als für Beschichtungen mit einer größeren Spitzendichte.

Tests im industriellen Umfeld

Die Industrietauglichkeit der Beschichtung wurde anhand von Versuchen bei der Orafol Fresnel Optics GmbH, Apolda, demonstriert. Es ließen sich mehr als 2500 Abformungen ohne optisch beobachtbare Verschlechterung der Hochglanzeigenschaften des Formteils durch-

führen. Hierbei erwies sich das entwickelte Schichtsystem, bestehend aus einer PVD-Template-Schicht kombiniert mit einer geringadhäsiven PACVD-Funktionsschicht, zugleich als adhäsionsmindernd und sehr verschleißfest.

Fazit

Durch die Kombination einer nanostrukturierten Template-Schicht mit einer antiadhäsiven Funktionsschicht ließen sich die Entformkräfte von PE und PET beim Heißprägen im Hochglanzbereich reduzieren. Hierbei minimiert die speziell entwickelte nanostrukturierte Oberfläche die Kontaktfläche beim Heißprägen insbesondere für PET signifikant, ohne sichtbaren Verlust der optischen Güte. Eine Weiterentwicklung des Ansatzes hinsichtlich einer daten- bzw. modellbasierten effektiven Gestaltung und Anpassung von Werkzeugoberflächen für verschiedene Applikationen der Kunststoffformgebung wird anvisiert. ■