

## **1.7 Anforderungen an Werkzeugbeschichtungen zur Verbesserung des Entformungsverhaltens im Spritzguss**

Referenten: Dipl.-Ing. Nadine Pönisch  
Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, Deutschland  
Dipl.-Ing Wolfgang Hering  
INNOVENT e.V. Technologieentwicklung, Deutschland

### **1 Einleitung**

Am Ende jedes Spritzgießzyklus steht der Entformungsprozess. Oftmals bringt dieser Probleme mit sich, die durch technologische Variationen nicht zielführend abgestellt werden können. Ursachen dafür liegen in Entscheidungen im Vorfeld bezüglich Materialauswahl, kunststoff- und verfahrensrelevanter Formteilgestaltung sowie Werkzeugauslegung. Mitunter resultieren ungünstige Bedingungen bei der Entformung, die folglich zu Qualitätseinbußen führen.

### **2 Konzept**

Um das Entformungsverhalten zu untersuchen und durch gezielte Maßnahmen zu verbessern, hat das KUZ einen messtechnischen Ansatz entwickelt, der auf die Erzielung praxisrelevanter Ergebnisse gerichtet ist und eine Analyse der Wirksamkeit z.B. von Werkzeugbeschichtungen oder auch Additivzusätzen erlaubt.

#### **2.1 Formteil**

Für die Geometriefestlegung des Formteils zur Entformungskraftmessung war es entscheidend, möglichst entformungsproblematische Konturen auszuwählen. Eine Bechergeometrie mit einem H:D-Verhältnis von 1,1:1 (Abbildung 1) entspricht dieser Vorgabe. Durch das hohe Schwindungspotenzial lassen sich zum Einen hohe Entformungskräfte provozieren und zum Anderen das vorzeitige Lösen des Formteils von der Auswerferseite vermeiden.



Abb. 1: Formteil - Entformungskraftmessung

#### **2.2 Werkzeug**

Durch das Aufschrumpfen der erkaltenden Formmasse auf Kerne im Werkzeug und das Haften des Materials an der Werkzeugoberfläche entsteht ein erhöhter Kraftaufwand zur Entformung [1]. Zur Ermittlung dieser Kraft wurde im

Auswerferpaket ein Kraftsensor eingebracht (Abbildung 2). Diese praxisnahe Messmethode erlaubt die Ermittlung einer Gesamtkraft, die jedoch keine Differenzierung zwischen den Materialeinflussgrößen Schwindung und Reibung zulässt. Diese Differenzierung ist jedoch notwendig, um den Einfluss von Werkzeugbeschichtungen (Reduzierung der Reibung) auch bei Verwendung verschiedener Kunststofftypen und damit teilweise gravierenden Schwindungsunterschieden zu untersuchen. Um dennoch mit dieser vereinfachten Messmethode Aussagen zu gewinnen, hat das KUZ die Ergebnisse unter Einhaltung konstanter Randbedingungen und der Verwendung jeweils einer Kunststofftype ermittelt. Damit konnte der Einfluss der Schwindung vernachlässigt werden und das Ergebnis die Reibung bei der Entformung und damit den Einfluss neuartiger Werkzeugbeschichtungen widerspiegeln.

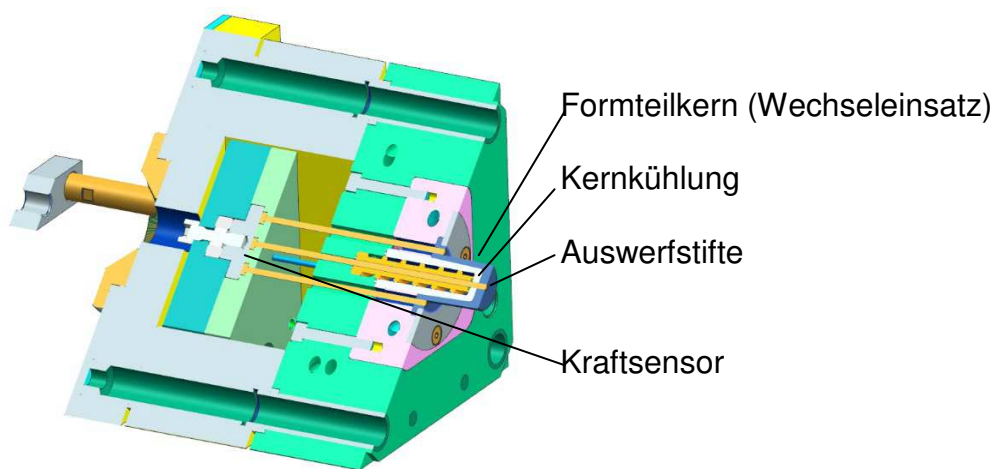


Abb. 2: Schnitt durch Werkzeug - Entformungskraftmessung

Tab. 1: Übersicht der gefertigten Werkzeugeinsätze (Werkzeugstahl 1.2343 (5% Cr), Entformungsschräge 1°) in Abhängigkeit von der Beschichtung und Oberflächenrauigkeit

Einsatz-Nr.	Schicht	Oberfläche SOLL	Oberfläche IST (Messmittel: Mitutoyo Surftest 201)
1	-	$R_z=19\mu\text{m}$	$21,6 \pm 2,9$
2	FOS1	$R_z=19\mu\text{m}$	$22,0 \pm 0,0$
3	FOS2	$R_z=19\mu\text{m}$	$24,2 \pm 1,1$
4	-	$R_z=3,5\mu\text{m}$	$4,3 \pm 0,1$
5	FOS1	$R_z=3,5\mu\text{m}$	$3,9 \pm 1,5$
6	FOS2	$R_z=3,5\mu\text{m}$	$4,9 \pm 0,0$

### 2.3 Entformungskraftmessung

Ausgangspunkt der Entformungskraftmessungen war es konstante Randbedingungen zu schaffen, die als Basis für Aussagen zur Entformungskraftreduzierung mit verschiedenen Werkzeugbeschichtungen dienen.

Dazu wurden konstante Verarbeitungsbedingungen für den zu verarbeitenden Kunststoff nach folgenden Kriterien gesetzt:

Parametereinstellungen:

1. Einspritzphase: mittlere Einspritzgeschwindigkeit (für alle Kunststoffe gleiche Einstellung)
2. Nachdruckphase: Nachdruckzeit über Siegelpunktbestimmung  
Nachdruckhöhe mit 2/3 vom Spritzdruck am Umschaltpunkt
3. Plastifizierphase: mittlere Verarbeitungstemperaturen (laut Herstellerangaben)  
mittlere Werkzeugtemperaturen (laut Herstellerangaben)  
mittlerer Staudruck (laut Herstellerangaben)  
Drehzahl anpassen (Dosierzeit  $\leq$  Kühlzeit)
4. Kühlphase: mit Hilfe der Thermokamera über die Entformungstemperatur optimale Kühlzeit ermitteln
5. Entformung: Auswerkraft und –geschwindigkeit (für alle Kunststoffe gleiche Einstellung)

Im Detail wird zeitabhängig die Entformungskraft aufgezeichnet sowie das Kraftintegral ermittelt. Beispielhaft werden die Einzelmessungen von Entformungskraftmessungen mit einem Polyamid und einem Polystyrol in Abbildung 3 (grün) dokumentiert. Dargestellt wird der Kraftverlauf während der Vorwärtsbewegung der Auswerfer beim Entformvorgang. Der Peak wird beim Ablösen des Kunststoffs von der Werkzeugoberfläche erreicht. Der restliche Kraftaufwand wird benötigt, um das Formteil vom Kern zu schieben.

Es ist zu beachten, dass ein direkter Vergleich zwischen den dargestellten Kraftverläufen der Kunststoffe in Bezug auf die Werkzeugbeschichtung nicht möglich ist, da das Schwindungsverhalten beider Materialien erheblich voneinander abweicht.

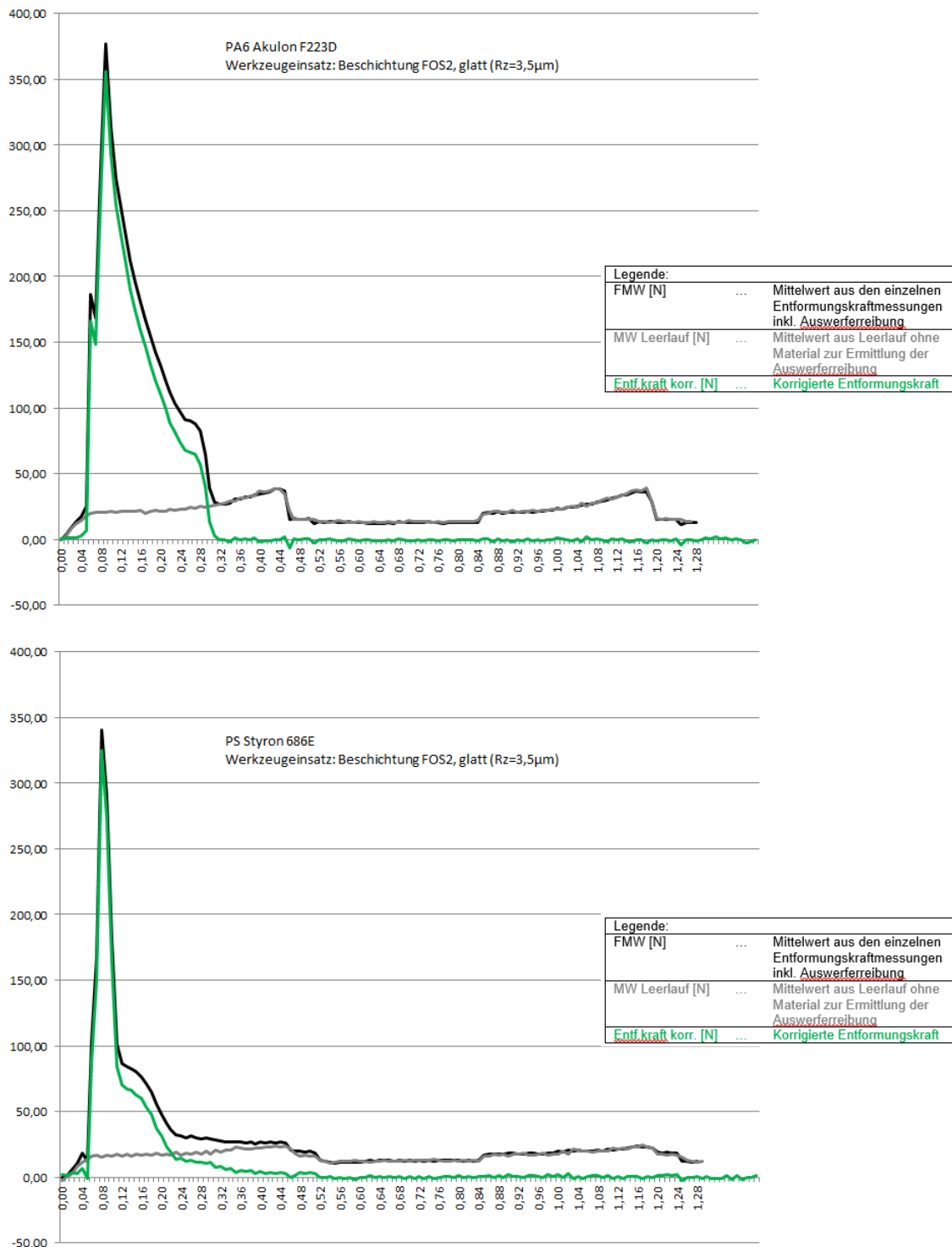


Abb. 3: Entformungskraftmessung am Beispiel PA Akulon F223D (oben) und PS Styron 686E (unten)

Zur Beurteilung der verschiedenen Werkzeugbeschichtung wurden daher Entformungskraft und Kraftstoß in Abhängigkeit vom verwendeten Werkzeugeinsatz (Rauigkeit und Beschichtung) mit einem Kunststofftyp unter konstanten Spritzgießbedingungen gegenübergestellt (Abbildung 4).

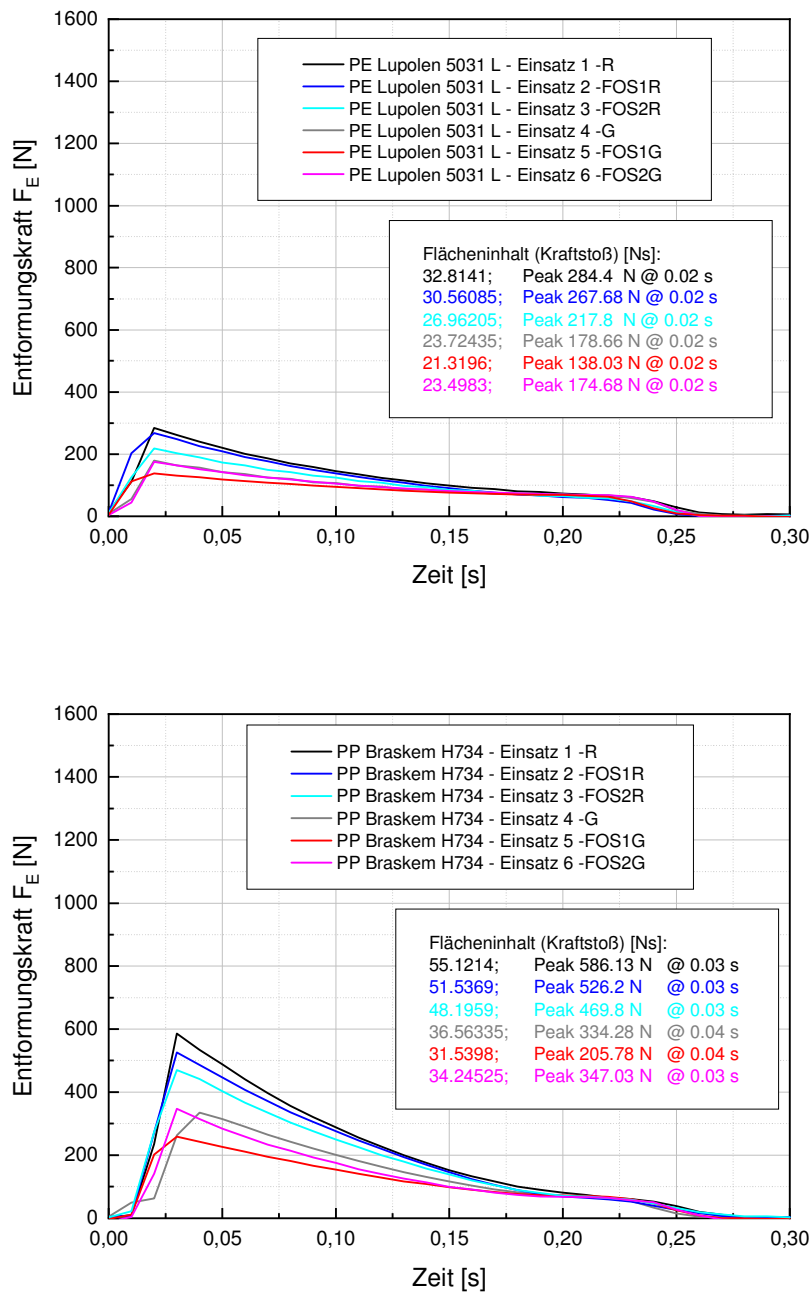


Abb. 4: Gegenüberstellung der Entformungskräfte am Beispiel PE Lupolen 5031L (oben) und PP Braskem H734 (unten) mit verschiedenen Werkzeugwechseleinsätzen (Rauigkeiten und Beschichtungen)

### 3 Anwendungen

Die vom KUZ entwickelte Methode eignet sich sehr gut für schnelle, praxisnahe Aussagen zur:

- Ermittlung des Einflusses von Additiven auf das Entformungskraftniveau und das Kraftintegral

- Ermittlung des Einflusses auf die Entformungskraft bei variierender Prozessführung im Spritzguss
- Ermittlung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungskraftniveau und das Kraftintegral
- Ermittlung der Langzeitstabilität von Werkzeugbeschichtungen

#### 4 Entwicklung einer funktionalen Sol-Gel-Beschichtung

Für das Projekt „Funktionale Sol-Gel-Beschichtungen zur Optimierung des Entformungsverhaltens von Formteilen aus Spritzgießwerkzeugen - FOS“ der Einrichtung Innovent e.V. Technologieentwicklung wurde dieser messtechnische Ansatz bei der Entwicklung permanenter Trennschichten auf Basis neuartiger Sol-Gel-Beschichtungen angewendet und systematische Untersuchungen mit verschiedenen Kunststoffen, Parametervariationen, Werkzeugrauheiten und -beschichtungen durchgeführt.

Der Anspruch an die Beschichtungen war hoch, denn diese mussten für den Spritzgießprozess mechanisch sowie thermisch sehr stabil sein, um die auftretenden Scherkräfte und Schmelzetemperaturen zu kompensieren. Positive Nebeneffekte wie Minimierung von Werkzeugverschleiß, Erweiterung der Potenziale zur Prozessoptimierung (Einsparung von Ressourcen und Energie) wurden ermittelt und Maßnahmen für individuelle Beschichtungsaufgaben abgeleitet.

##### 4.1 Prinzip der Sol-Gel-Beschichtungen

Der Sol-Gel-Prozess ist eine nasschemische Beschichtungsmethode, bei der aus einer flüssigen Vorläufersubstanz (Precursor) nach Zugabe von Wasser durch Hydrolyse und Kondensation ein Sol gebildet wird [2]. Das Sol stellt eine kolloidale Dispersion dar (Teilchengröße typischerweise im nm- bis µm-Bereich), wobei als Precursoren meist Alkoxide von Metallen oder Nichtmetallen dienen. Nachfolgend sind die ablaufenden Reaktionsschritte, repräsentativ für eine Verbindung mit Silizium (Si) als Zentralatom dargestellt (Abbildung 5).

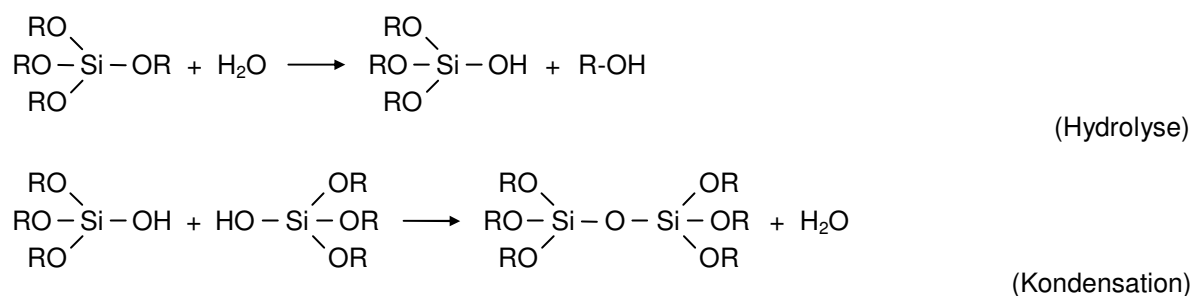


Abb. 5: Umsetzung eines Alkoxysilanes während des Sol-Gel-Prozesses (R – Alkyl-Rest)

Beim Altern des Sols findet eine dreidimensionale Vernetzung der Komponenten und damit einhergehend eine Viskositätserhöhung statt [3]. Das resultierende Gel besteht aus mindestens zwei Phasen, wodurch dieses eine geringe mechanische Stabilität besitzt. Die feste Phase besteht aus einem weitmaschigen Netzwerk, in dessen Zwischenräumen sich eine flüssige oder gasförmige Phase befindet. Infolge des

Entweichens des Lösungsmittels lässt sich der Gelfilm in einen stabilen Oxidfilm für Beschichtungen oder andere Produkte (z.B. Fasern und Pulver) überführen.

Die Beschichtungen können über gängige Auftragsverfahren für Nassfilme erzeugt werden, z. B. Tauch-, Rotations- und Düsenbeschichtung [4]. Insbesondere mittels Sprühdüsenbeschichtung lassen sich auch Prüfkörper mit komplexer Geometrie beschichten, weshalb sich diese für eine Schichtapplikation auf Werkzeugeinsätzen anbietet.

## 4.2 Erzeugung einer Trennwirkung

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Sol-Gel-Beschichtungen können über Co-Kondensation mit anderen Netzwerkbildnern oder die Einbeziehung von organischen Gruppen am Alkoxid reguliert werden (Abbildung 6).

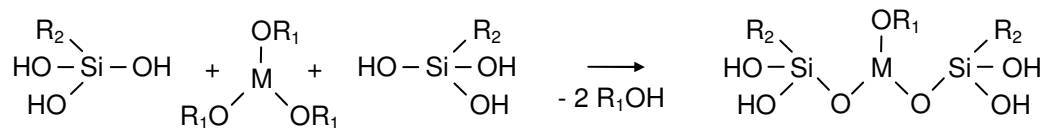


Abb. 6: Sauerstoffbrückenbildung bei der Reaktion von hybriden Silanen mit Alkoxiden (M – metallisches Zentralatom, R<sub>1</sub> – Alkyl-Rest und R<sub>2</sub> – organische Gruppe)

Silizium kann stabile kovalente Bindungen zu Kohlenstoff ausbilden, was die Herstellung von Organosilanen ermöglicht (organische Einheit R<sub>2</sub> direkt an Si angebunden). Falls vernetzungsunfähige Gruppen (z.B. R<sub>2</sub> = Alkyl- oder Aryl-Reste) ins Silan eingebunden werden, fungieren diese als Netzwerkwandler (Schaffung von Trennstellen). Mit vernetzungsfähigen Gruppen (z.B. Vinyl-, Glycidyl- oder Amin-Gruppen) lassen sich hingegen anorganisch-organische Hybridnetzwerke aufbauen, wobei die Vernetzung bspw. thermisch oder über UV-Bestrahlung eingeleitet werden kann [2-4].

Zur Generierung einer anti-adhäsiven Wirkung gegenüber Kunststoffschmelzen sind prinzipiell Kohlenwasserstoffketten und perfluorierte Alkylverbindungen als organische Reste geeignet. Diese können wiederum ebenfalls über Seitenketten funktionalisiert werden.

## 5 Ergebnisse zur Entwicklung funktionaler Sol-Gel- Beschichtungen

### 5.1 Bestimmung der Haftfestigkeit

Insbesondere bei anti-adhäsiven Beschichtungen treten oftmals Probleme bei der Haftung auf, da die trennaktiven Substanzen im Beschichtungsstoff dessen Benetzungsverhalten negativ beeinflussen bzw. eine chemische Anbindung an das Substrat verhindern (Abbildung 7). Eine haftfeste Beschichtung ist jedoch beim Einsatz in der Kunststoffverarbeitung unerlässlich, weshalb diese überprüfbar sein sollte.



Abb. 7: Dilemma bei Trennschichten: Erzeugung einer haftesten Beschichtung, an der Nichts haftet (Vorbehandlung notwendig)

Aufgrund des Umstandes, dass Haftfestigkeitstests vorwiegend auf der Entfernung von aufgeklebten Prüfkörpern basieren, musste eine neuartige, auf Trennschichten (auf diesen hält kein Klebstoff) abgestimmte Methode entwickelt werden. Hierfür sollte die Trennwirkung einer aufgetragenen Schicht nachträglich und lediglich an der Oberfläche aufgehoben werden. Hierbei erwies sich eine neuartige, flächige Plasmaquelle (DCSBD von engl. Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge) als äußerst vielversprechend.

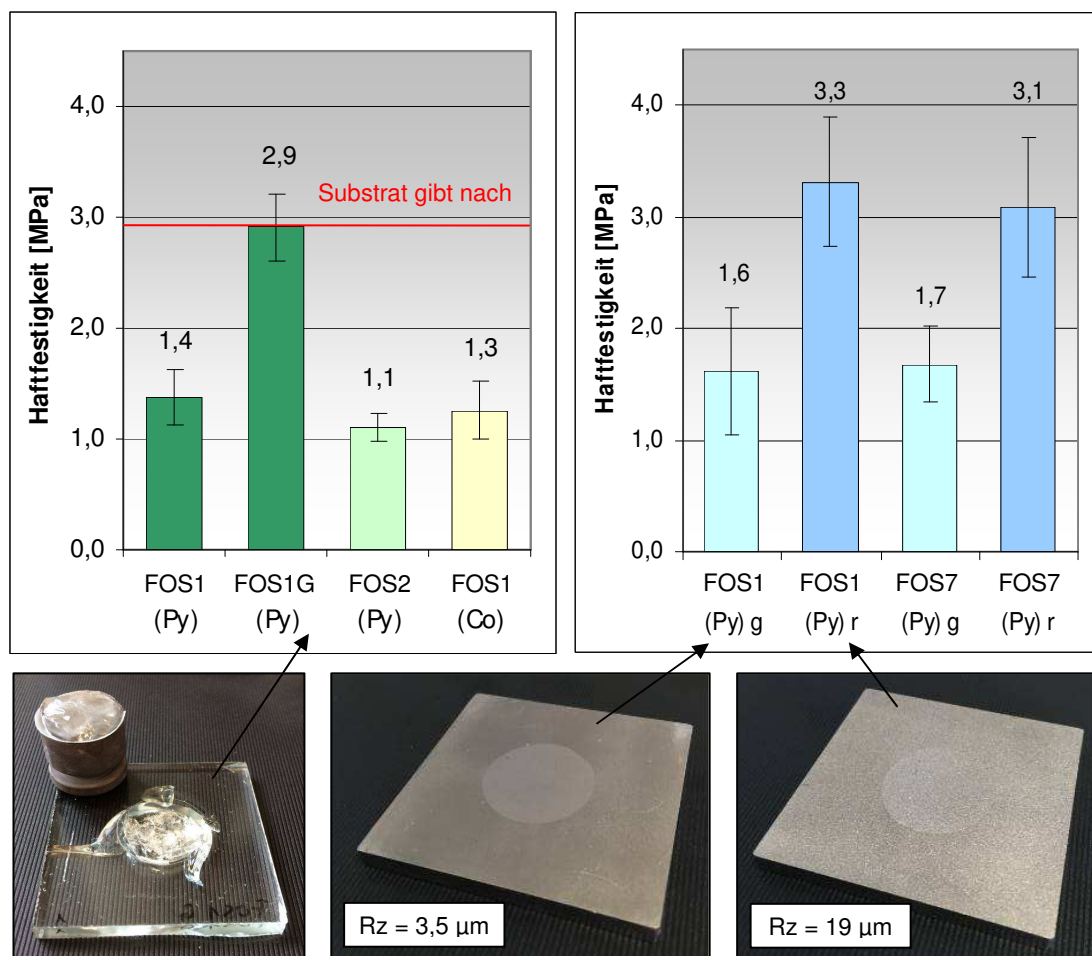


Abb. 8: Haftfestigkeitswerte für ausgewählte Proben (oben): Substrat Glas bzw. Metall (g – glatt, r – rau), Sol-Zusammensetzung (FOS1, FOS2 und FOS7, G – Gradientenschicht) sowie Vorbehandlung (Py – Pyrosil®, Co – Corona) und zugehörige Testsubstrate (unten)



Durch eine Behandlung der Beschichtungen mit dieser konnten die Proben mittels Stirnabzugstest untersucht werden, um die Haftfestigkeit von verschiedenartigen Schichten zu bestimmen und den Einfluss von unterschiedlichen Vorbehandlungen auf diese (Abbildung 8).

Eine Vorbehandlung stellte sich dabei als zwingend erforderlich heraus, da die meisten Sole andernfalls die Substratoberfläche nicht vollständig benetzten. Hierfür wurden Aktivierungsverfahren (z.B. Beflammung und Corona) genutzt sowie Schichten mit haftvermittelnder Wirkung (z.B. Pyrosil®- und Plasmaschichten) aufgebracht.

## 5.2 Erfassung der Trennwirkung

Wie bereits ausgeführt (s. Abschnitt 2), ermöglicht der messtechnische Ansatz vom KUZ eine Analyse des Entformungsprozesses. Hierüber kann die Effektivität eines aufgetragenen Trennmittels bestimmt werden.

Weiterhin lassen sich Aussagen über die anti-adhäsive Wirkung von Werkzeugbeschichtungen, auch in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit des Substrates, und deren Langzeitstabilität generieren. Eine Abschätzung des resultierenden Einsparpotentials (Ressourcen und Energie) ist ebenfalls möglich. In Abbildung 9 sind die mit beschichteten Werkzeugeinsätzen (FOS) benötigten Entformungskräfte für drei unterschiedliche Formmassen, denen mit einem unbeschichteten Einsatz (Ref) erhaltenen, gegenübergestellt.

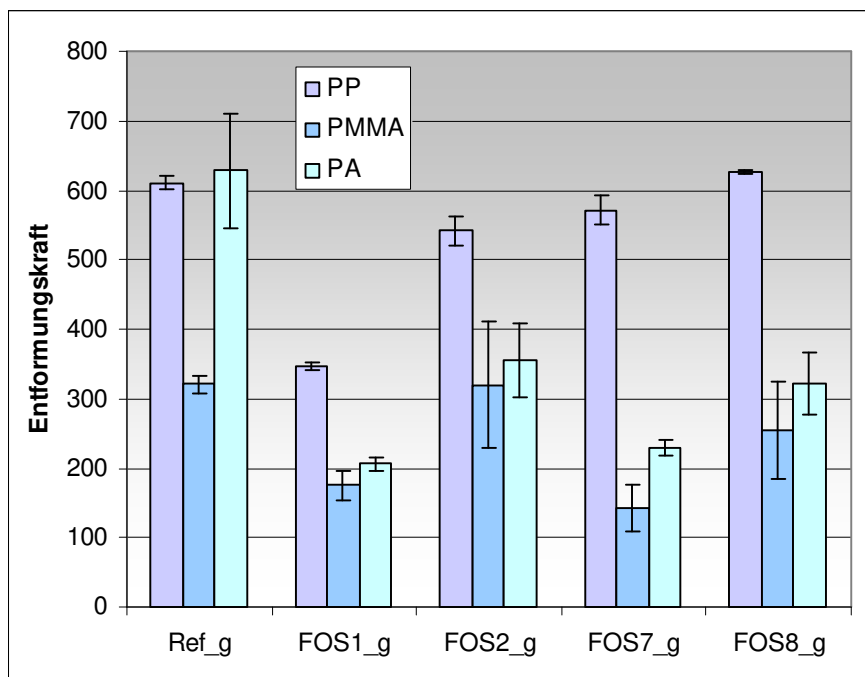


Abb. 9: Entformungskräfte exemplarisch für die glatten Werkzeugeinsätze (Index g) und für die Formmassen Polypropylen (PP), Polymethylmethacrylat (PMMA) sowie Polycarbonat (PC)

Infolge der Beschichtung der Werkzeugeinsätze ließ sich die Entformungskraft um bis zu 70 % reduzieren (FOS1 auf glatten Substraten mit PA). Mit der jeweils geeignetsten Schicht lag die erreichbare Senkung jedoch bei mindestens 30 %. Dies gestattet eine Anpassung der Prozessführung hin zu einer Verringerung der Kühl- und damit auch der Zykluszeit.

Allerdings ergab sich ein komplexer Zusammenhang zwischen den untersuchten Einflussgrößen, weshalb keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden können. Insbesondere die verschiedenen Formmassen (Haftneigung sowie Schwindung unterschiedlich) in Relation zur Oberflächenbeschaffenheit des Substrates verhalten sich z. T. gegenläufig.

### 5.3 Angepasste Schichtanalytik

Nachfolgend sei lediglich auf einige spezifische Ansätze für Trennschichten, welche sich auf Metallsubstraten befinden, näher eingegangen. Dabei wäre der Nachweis einer erfolgreichen Entschichtung mittels IR-Spektroskopie in Kombination mit der Visualisierung des Zustandes der Beschichtung mittels Thermografie zu nennen (Abbildung 10).

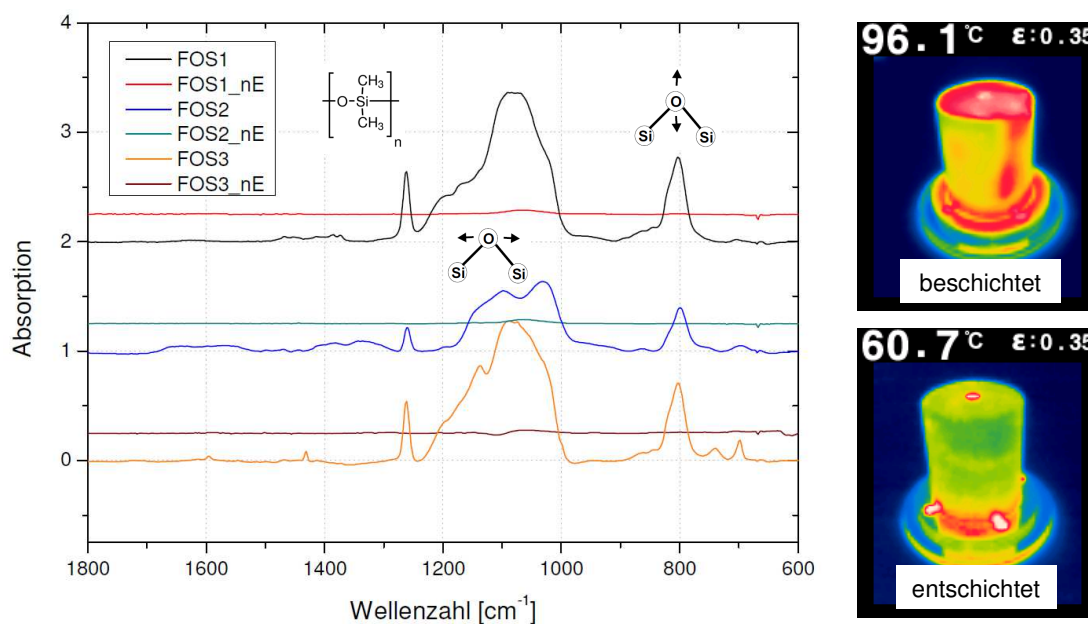


Abb. 10: IR-Spektren von FOS1 bis 3 vor und nach einer Entschichtung (links) sowie entsprechende Wärmebilder von einem Werkzeugeinsatz mit FOS2 (rechts)

Infolge der Schichtablösung (nE – für nach Entschichtung) verschwinden, die für die Schicht repräsentativen Banden im IR-Spektrum. Zudem kühlt ein Werkzeug-einsatz mit Beschichtung (geringe Wärmeleitfähigkeit) nach einer Temperung bei 100 °C wesentlich langsamer ab als einer ohne (s. Abb. 10, rechts).

## 6 Fazit/Nutzen/Anwendungen

Der Diskrepanz zwischen der haftfesten Aufbringung einer hochabweisenden Beschichtung konnte sowohl analytisch (über die Anpassung von diesbezüglichen Prüfverfahren) als auch prozesstechnisch (durch den Einsatz einer entsprechenden Vorbehandlungsmethode) entgegen gewirkt werden.

Der messtechnische Ansatz vom KUZ ermöglicht dabei eine zeitabhängige Erfassung des Entformungsvorganges, um bspw. den Einfluss von Additiven sowie der Prozessführung auf das Entformungskraftniveau unter anwendungsnahen Bedingungen zu bestimmen.

Im vorliegenden Fall ließen sich durch die Gegenüberstellung von verschiedenen Beschichtungen qualitative und quantitative Aussagen zur Verbesserung des Entformungsverhaltens ableiten. Dies erleichtert eine zielgerichtete Entwicklung von dahingehend funktionalisierten Beschichtungen sowie eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses.

## 7 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung des dieser Veröffentlichung zu Grunde liegenden Projektes (Förderkennzeichen: MF160126).

## Literatur

- [1] Oberbach, K.; Baur, E.; Brinkmann, S.; Schmachtenberg, E.; Saechtling Kunststoff-Taschenbuch, 29. Ausgabe, Entformungsverhalten, S. 82
- [2] Jonscker G., "Sol-Gel-Technology in Praxis", Vincentz Network GmbH & Co. KG Hannover, 2014
- [3] Corriu R., Anh N. T., "Molecular Chemistry of Sol-Gel Derived Nanomaterials", John Wiley & Sons, New Jersey, 2009
- [4] Aegerter M. A., Mennig M., "Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users", Springer Science & Business Media, New York, 2013