

**Entformungskraftuntersuchungen beim Spritzgießen
Neuer messtechnischer Ansatz zur Ermittlung der
Adhäsions- und Gleitreibungskräfte bei der Entformung**

**Analysis of Ejection Forces in the
Injection Moulding Process
New Measuring Approaches for the Calculation of the
Adhesive Forces and the Slip Friction Forces During the
Demoulding Process**

G. Schattka, E. Burkard und W. Schinköthe

Beitrag zum

**23. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

6. - 7. März 2013

Session 1

Effizienzsteigerung und Vorhersage von Kunststoffverarbeitungsprozessen

ENTFORMUNGSKRAFTUNTERSUCHUNGEN BEIM SPRITZGIEßEN NEUER MESSTECHNISCHER ANSATZ ZUR ERMITTLUNG DER ADHÄSIONS- UND GLEITREIBUNGSKRÄFTE BEI DER ENTFORMUNG

ANALYSIS OF EJECTION FORCES IN THE INJECTION MOULDING PROCESS NEW MEASURING APPROACHES FOR THE CALCULATION OF THE ADHESIVE FORCES AND THE SLIP FRICTION FORCES DURING THE DEMOULDING PROCESS

G. Schattka, E. Burkard und W. Schinköthe

IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66423, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, E-Mail: schattka@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Im Rahmen eines staatlich geförderten ZIM-Projektes wird am IKFF das Entformungsverhalten von Spritzgusskomponenten in Abhängigkeit verschiedener Oberflächenbeschichtungen und Prozessparameter untersucht. Hierzu existiert ein Werkzeug zur Messung der Entformungskraft einer Hülse, welches die Entformungskräfte verschiedener Werkzeugbeschichtung-Kunststoff-Paarungen mit geringem Aufwand ermitteln kann. Für eine systematische Untersuchung der adhäsiven Klebekräfte stößt das aktuelle Entformungskraftwerkzeug jedoch teilweise an seine Grenzen. Aus diesem Grund wurde ein neues Werkzeug zur Ermittlung der Adhäsionskräfte entwickelt. Hiermit sollen Untersuchungen ermöglicht werden, mit deren Hilfe die Adhäsionssituation zwischen Werkzeugoberfläche und Werkstück systematisch untersucht werden kann. Ziel dieser Untersuchungen ist die Reduzierung sowie die gezielte Vorhersage der erforderlichen Entformungskräfte.

Abstract: Within the framework of a government-supported ZIM project the IKFF analyses the ejection forces in dependence of various surface coatings and process parameters. For this purpose, a tool for the measurement of the ejection force of a tube exists. Using this tool, it is possible to measure the ejection forces of several combinations of surface coatings and plastic materials requiring little efforts. However, for a systematic study of the adhesive forces, the actual tool reaches partially its limits. We developed a new tool to measure the adhesive force using a new measurement principle in order to facilitate the investigations of the adhesive situation between the tool surface and the injection moulded part. The aims of the investigations are the reduction and the precise prediction of the required ejection forces.

Schlagwörter: Entformungskraft, Adhäsion

Keywords: ejection force, adhesion

Einleitung

Das Entformen eines Werkstücks ist oftmals der letzte Prozessschritt bei der Produktion von Spritzgusskomponenten. Hohe Entformungskräfte können zu einer Schädigung des Werkstücks oder sogar der Werkzeugbeschichtung führen. Diesem Problem wird traditionell mit Entformungsschraegen entgegengewirkt, die in Einzelfällen jedoch nicht zulässig sind. Eine Verkürzung der Zykluszeit mit resultierenden hohen Auswerfergeschwindigkeiten erhöhen zusätzlich die Belastung auf das Material. Der Trend zu Glanzoberflächen kann ebenfalls zur Erhöhung der Entformungskräfte beitragen, da gerade polierte Werkzeugoberflächen in Kombination mit erhöhten Werkzeugtemperaturen in einigen Fällen eine drastische Steigerung der adhäsiven Klebekräfte zwischen Kunststoff und Werkzeugoberfläche zeigen. Aus diesem Grund werden Werkstoffen oftmals spezielle Entformungshilfen beige-

mischt, da diese sonst kaum verarbeitbar sind. Eine andere Möglichkeit der Reduzierung der Entformungskräfte sind spezielle Beschichtungen der Werkzeugoberfläche, die das Lösen des Kunststoffes von der Werkzeugoberfläche erleichtern sollen. Weitere Anforderungen nach möglichst abrasiv widerstandsfähigen Beschichtungen stehen diesen Ansprüchen jedoch teilweise entgegen.

Eine verallgemeinerte Vorhersage der Entformungskräfte, die sich nicht nur auf einzelne Beschichtungs-Kunststoff-Kombinationen beschränkt, ist bisher stets gescheitert. Die Wahl einer geeigneten Beschichtung ist größtenteils auf Erfahrungswerte zurückzuführen. Die physikalischen, chemischen und mechanischen Effekte in der Klebeschicht Werkzeugoberfläche-Werkstück sind aktuell nicht hinreichend genug untersucht. Mit einem neuen Messprinzip soll diese Problematik näher betrachtet werden.

Grundlagen

„Die bisher in der Literatur mitgeteilten Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen gezielten Oberflächenveränderungen und den daraus resultierenden Veränderungen des Adhäsionsvermögens, also der Haftungseigenschaften, hatten im wesentlichen empirischen Charakter. Es konnte noch keine exakte wissenschaftlich begründete Deutung der Ergebnisse gefunden werden oder die Erklärungen sind lückenhaft.“ [1][4]

Dies ist eine Aussage, die viele Arbeiten zur Adhäsion einleitet. Zwar sind die physikalischen, chemischen und mechanischen Vorgänge der Adhäsion im Einzelnen ausreichend bekannt, das Zusammenwirken kann jedoch nur schwer auf die reale praktische Anwendung abgeleitet werden.

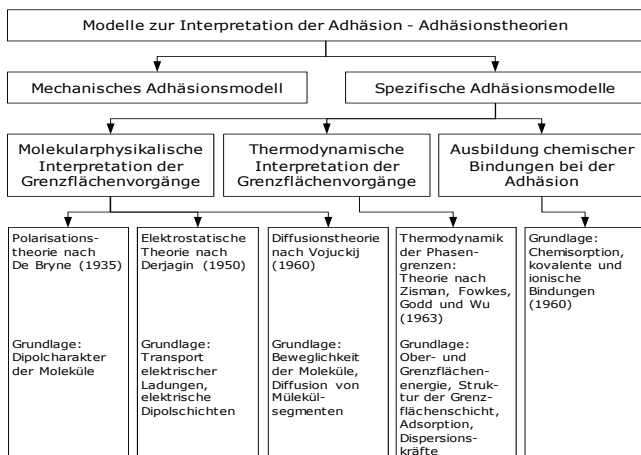
Adhäsion

Adhäsion ist ein Sammelbegriff, der im praktischen Bezug das einfache „Kleben“ an einer Kontaktfläche zweier Fügepartner beschreibt. Im Kunststoffspritzguss ist dies der Kunststoff, der durch das Anspritzen auf die Werkzeugoberfläche „geklebt“ wird. Dieses Kleben ist meistens auf mehrere, verschiedene Ursachen zurückzuführen. Im Groben kann man zwischen

- Mechanischen Bindungen
- Chemischen Bindungen und
- Physikalischen Bindungen

unterscheiden.

Die komplexen atomaren und molekularen Wechselwirkungen bei der Adhäsion in den Phasengrenzschichten sind seit dem vergangenen Jahrhundert Gegenstand intensiver Forschung. Es entstanden mehrere Modelle, sogenannte Adhäsionstheorien, die sich stets auf Teilbereiche der Adhäsion beziehen. Die Theorien können jedoch bis heute das in Experimenten gefundene Verhalten nicht vollständig erklären [1].



Stand der Technik

Es existieren mehrere Untersuchungen zu Entformungskräften sowie Adhäsionskräften zwischen Werkstoff und Werkzeugoberfläche im Kunststoffspritzguss. Alle Untersuchungen eint hierbei das ähnliche Vorgehen. Eine Formgeometrie wird auf eine definierte, unter Umständen beschichtete Werkzeugoberfläche aufgespritzt und anschließend gelöst. Die dabei auftretenden Kräfte werden gemessen und stellen ein Maß für die Adhäsion beider Fügepartner dar.

In Bild 1 ist exemplarisch das Messprinzip des am IKFF vorhandenen Messwerkzeugs MEVEK (Messung Von Entformungskräften) zu sehen. Hier wird eine Hülse (Ansicht im Teilschnitt) auf einen Kern aufgespritzt und im Anschluss axial über einen Auswerferring entformt, wobei die dabei auftretende Entformungskraft gemessen wird. Die Hülsengeometrie sorgt auf Grund der Schwindung für eine radiale Normalkraft. Hierdurch soll ein vorzeitiges Lösen der beiden Fügepartner vermieden werden. Auf Grund der relativ einfachen Geometrie des Kerns können mit diesem Werkzeug sehr schnell und kostengünstig Entformungskräfte verschiedener Werkzeugbeschichtung-Kunststoff-Paarungen untersucht werden.

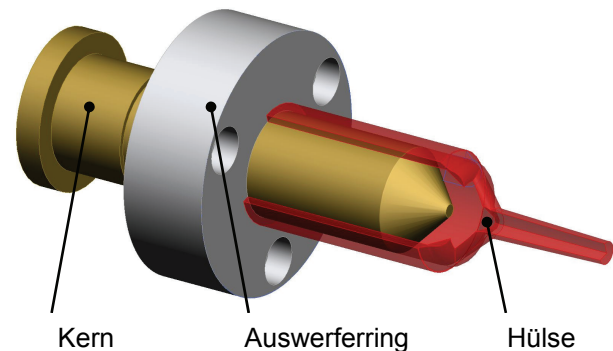


Bild 1: Messprinzip des MEVEK-Werkzeugs

Untersuchungen anderer Institute wählen anstelle einer Hülsengeometrie ebene Platten [2] oder quadratische Kästen, die jedoch auf Grund der Schwindung der Formteile ein vorzeitiges Lösen beider Fügepartner vor der Entformungskraftmessung zur Folge haben können. Unabhängig von der gewählten Formteilgeometrie oder des Messaufbaus stellt die Schwindung des Werkstücks ein großes Problem dar. Neben der positiven tangentialen Schwindung des MEVEK-Werkzeugs ist ebenfalls eine axiale Schwindung der Hülse vorhanden. In Bild 2 sind zwei aufgespritzte Hülsen aus stark schwindendem PET in einer realen Messung zu sehen. Beide Hülsen wurden unter identischen Randbedingungen verarbeitet. Der Schirman-guss blockiert die axiale Schwindung an der rechten Seite der Hülse. Das hat zur Folge, dass sich der linke Teilbereich auf Grund der axialen Schwindung der Hülse bereits vor der Messung von der Oberfläche löst (linker, heller Bereich). Bei transparenten Werk-

stoffen kann dieser Anteil optisch erfasst und zumindest grob abgeschätzt werden. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass die Benetzung der Oberfläche und damit der Anteil der adhäsiv klebenden Oberfläche trotz identischer Randbedingungen deutlich differenzieren kann. Dies wirkt sich in starken Schwankungen der Entformungskraft aus, die keine reproduzierbaren Ergebnisse ermöglichen. Die erzielten Ergebnisse beziehen sich auf eine undefinierte Oberfläche und sind somit unbrauchbar.

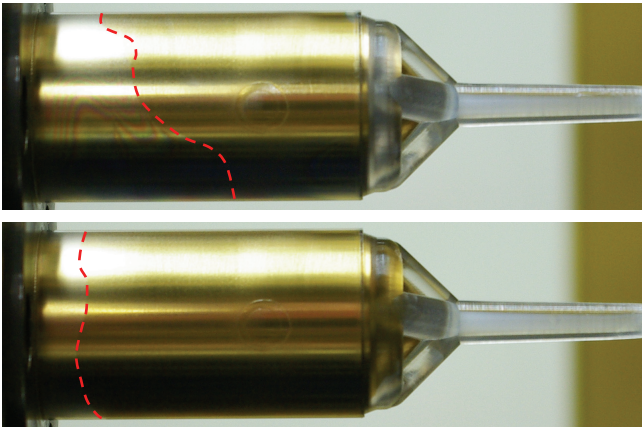


Bild 2: Unterschiede der Oberflächenbenetzung

Darüber hinaus kann nicht davon ausgegangen werden, dass die nach wie vor klebende Oberfläche (rechter, dunkler Bereich) tatsächlich vollständig adhäsiv haftet. Auch hier können Ablösungen vorherrschen, die jedoch nicht optisch zu ermitteln sind. Aus diesem Grund wäre ein Werkzeug wünschenswert, welches die Schwindung bestmöglich unterbindet und damit eine konstante Klebeverbindung zwischen Werkzeugoberfläche und Werkstück sicherstellt.

Nach langjähriger Erfahrung mit dem Messprinzip des MEVEK-Werkzeugs lässt sich jedoch sagen, dass das Messprinzip eine zuverlässige und reproduzierbare Aussage über die Entformungskräfte liefert. Die zuvor angesprochene Schwindungsproblematik tritt nur in Einzelfällen auf und kann durch eine entsprechende Anpassung der Prozessparameter meistens korrigiert werden. Ein exemplarisches Ergebnis der Entformungskraftmessung ist in Bild 3 mit dem Werkstoff PET auf einem polierten, unbeschichteten Stahlkern zu sehen. Der Graph zeigt den Mittelwert der erforderlichen axialen Entformungskraft über die Entformungszeit, welcher aus 15 Einzelmessungen gebildet wird.

In diesem Beispiel wird die Hülse über zwei Stufen ausgeworfen. Die erste Entformung (linker Bereich) zeigt einen massiven Adhäsionspeak, der im Schnitt ca. 800 N erreicht. Im Anschluss gleitet die Hülse mit einer relativ konstanten Kraft weiter vom Kern ab. Nach 0,4 s wird die Auswerferbewegung angehalten und bei 1 s (rechter Bereich) wieder gestartet. In der zweiten Auswerferstufe ist der Kraftanteil der Haftrei-

bung zu sehen. Hier wurde die Adhäsion bereits gelöst. Es ist ersichtlich, dass die auftretende Adhäsionskraft zu Beginn der Entformung weitaus höhere Werte erreichen kann und somit nicht mit einem einfachen Reibversuch gegenübergestellt werden kann. Der leichte Anstieg am Ende der Entformung ist auf minimale Unebenheiten des Kerns zurückzuführen.

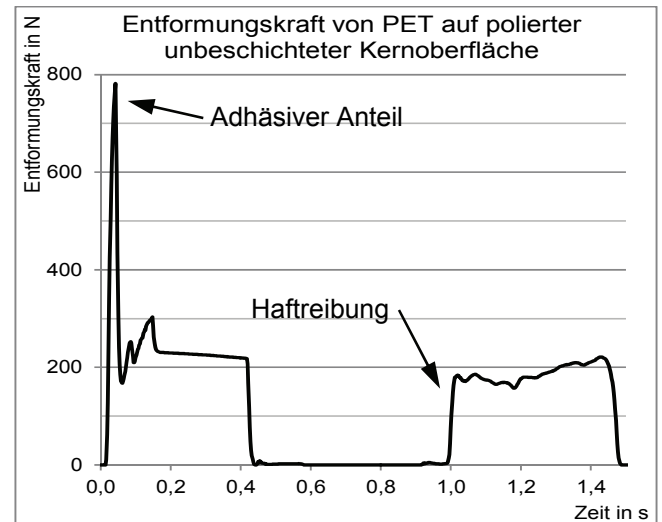


Bild 3: Entformungskraftmessung PET

Bewertung des MEVEK-Messprinzips

Trotz der positiven Aspekte des MEVEK-Werkzeugs stößt dieses teilweise an seine Grenzen. Im Folgenden sind die positiven, aber auch die negativen Aspekte dieses Messprinzips dargestellt.

Stärken

- Prinzipiell einfache Fertigung und Beschichtung der Kerne
- Praxisnahe Entformungsbewegung
- Keine zusätzlichen Störkräfte während der Entformungskraftmessung
- Lokal konstante Flächenpressung auf die Kernoberfläche
- Konstante und konturnahe Temperierung
- Einfacher und prozesssicherer Aufbau
- Benetzung der Oberfläche kann vor der Entformung bei transparenten Werkstoffen optisch begutachtet werden

Schwächen

- Sehr hohe Fertigungsansprüche an die Mantellinie der Kerne
- Axialen Schwindung der Hülse kann das Lösen der Haftverbindung vor der Messung hervorrufen
- Flächenpressung kann nicht unterbunden werden
- Flächenpressung zeitabhängig und unbekannt
- Stauchen der Hülse kann zu verfälschten Ergebnissen führen
- Die abgeformten Mikrostrukturen der Kernoberfläche werden durch die Entformung beschädigt → nachträgliche optische Begutachtung nicht möglich
- Auswerferring kann die Beschichtungen beschädigen

Neues Messprinzip

Angesichts der geringfügigen Schwächen des MEVEK-Werkzeugs soll ein neues Messprinzip die Untersuchungen der Entformungskräfte ergänzen.

Grundidee - TOMAK

In Bild 4 ist das neue Messprinzip des Torsionsprüfstandes zur Messung von Adhäsionskräften (TOMAK) in der Explosionsdarstellung zu sehen. Über das Element Momenteinleitung wird das Formteil in Scheibenform auf einen Reibring angespritzt. Einige Hinterschnitte im Element Momenteinleitung sichern das Formteil an der Angussseite. An der behandelten ringförmigen Oberfläche des Reibrings „Kontaktfläche“ entsteht eine Klebeverbindung mit dem Formteil. Während der Einspritzphase ist die Kavität geschlossen. Die dargestellte Situation stellt die Messsituation der Adhäsionskraft dar. Hierbei werden mittels eines Schieber- und Kniehebelmechanismus alle störenden Kontaktflächen zum Formteil und zum Reibring entfernt, sodass lediglich die ringförmige Kontaktfläche als Bindeglied zwischen dem Formteil und dem Reibring bestehen bleibt.

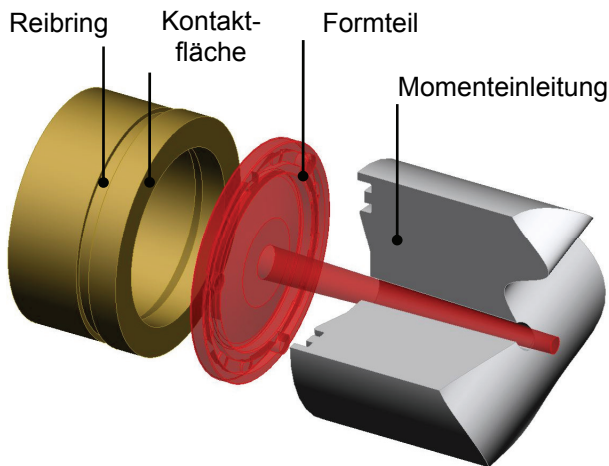


Bild 4: Messprinzip des Torsionsprüfstandes zur Messung von Adhäsionskräften (TOMAK)

Der Messaufbau besteht aus einem Torsionsprüfstand, der in ein Spitzgusswerkzeug integriert ist. Hierbei wird über einige Hinterschnitte im Element Momenteinleitung ein Drehmoment auf das Formteil übertragen, welches die Klebeverbindung zwischen dem Formteil und dem Reibring an der der behandelten Kontaktfläche löst. Dadurch wird an den Reibring ein Moment übertragen, welches an anderer Stelle gemessen wird. Zusätzlich kann über den Reibring eine definierte Axialkraft eingeleitet werden, die zu einer definierten und konstanten Flächenpressung auf die ringförmige Kontaktfläche führt.

Nach der Messung der Adhäsionskraft wird das Formteil über eine Auswerferpneumatik im Element Momenteinleitung axial entformt.

Problematik der Schwindung

Wie bereits angesprochen führt die axiale Schwindung der Hülsen im MEVEK-Werkzeug zu Ablöseeffekten vor der Entformungskraftmessung. Die hieraus resultierenden Entformungskräfte beziehen sich auf eine undefinierte Haftoberfläche.

Die Formteilgeometrie des neuen Werkzeugs versucht diesen Effekt weitestgehend zu eliminieren. Die axiale Schwindung des Rings kann durch eine axiale Verschiebung bzw. Erzeugung einer axialen Normalkraft über den beweglichen Reibring ausgeglichen werden. Die Schwindung in radialer Richtung stellt ein großes Problem dar, da diese ein vorzeitiges Lösen der Klebeverbindung hervorrufen kann. In Abbildung 6 ist das simulierte Schwindverhalten des Formteils mit PET im Querschnitt zu sehen. Unter der Annahme einer losen Einspannung ergibt sich laut Simulation eine Schwindung in radialer Richtung von bis zu ca. 0,34 mm. In diesem Fall ist das vorzeitige Lösen beider Fügepartner an der Kontaktfläche sehr wahrscheinlich. Aus diesem Grund wird das Formteil auf zwei zylindrischen Absätzen radial fixiert (Bild 5).

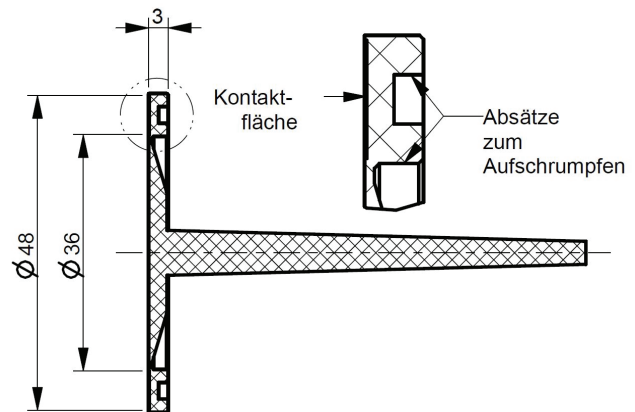


Bild 5: Formteilgeometrie

Damit wird die radiale Schwindung bestmöglich unterbunden. Zusätzlich reduziert die schmale Breite des Reibrings von 6 mm die Schwindung in radialer Richtung. In Abbildung 7 ist das simulierte Schwindverhalten in radialer Richtung dargestellt. Hierbei wird berücksichtigt, dass das Formteil auf die angesprochenen Absätze aufschwinden kann. In diesem Fall zeigt sich eine viel geringerer Verzug von max. 0,12 mm an der obersten Kante. Die tatsächliche Schwindung innerhalb der Kontaktfläche des Formteils liegt im Bereich von 0 mm ... 0,06 mm. Zwar kann hiermit das Schwinden des Formteils nicht komplett eliminiert werden, durch eine zusätzliche Aufbringung einer Axialkraft kann das vorzeitige Lösen jedoch nahezu ausgeschlossen werden.

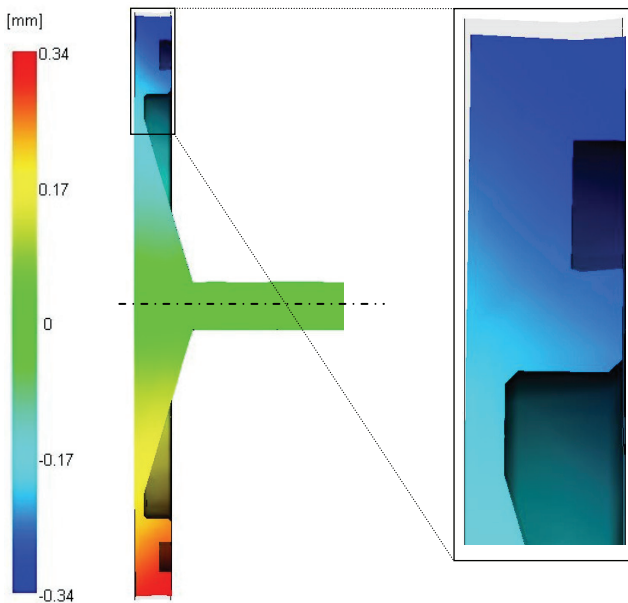


Bild 6: Simuliertes Schwindverhalten in radialer Richtung – nicht eingespannt

Erzeugung definierter Flächenpressungen

Im Vergleich zum Messprinzip des MEVEK-Werkzeugs, welches eine undefinierte und nicht konstante Flächenpressung auf den Kern hervorrufen kann, kann dieser Aufbau eine definierte Normalkraft auf die Kontaktfläche erzeugen. Der Reibring (Abbildung 4, Element Reibring) kann mittels eines Pneumatikzylinders eine Axialkraft übertragen. Neben konstanten Normalkräften und damit konstanten Flächenpressungen ist es hierdurch auch denkbar, die Normalkraft bis auf ein Minimum zu reduzieren und damit den Anteil der Haft- und Gleitreibung, welcher die Entformungsproblematik ebenfalls beeinflusst, nahezu zu eliminieren. Dadurch kann lediglich der Anteil des adhäsiven Klebens untersucht werden.

Nachträgliche optische Untersuchungen der abgeformten Oberfläche

Da die Messung der Adhäsionskraft über die Torsion des Formteils erfolgt und damit nicht mehr von der Entformungsbewegung abhängig ist, können einzelne Spritzlinge ohne eine Messung der Adhäsionskraft und somit ohne Torsion der Formteile zueinander entformt werden. Dies bietet den Vorteil einer unbeschädigten Formteiloberfläche, da diese bei der axialen Entformung nicht durch Scherung beansprucht wird. Somit können die abgeformten Mikrostrukturen der Werkzeugoberfläche näher untersucht und in die Messergebnisse einbezogen werden.

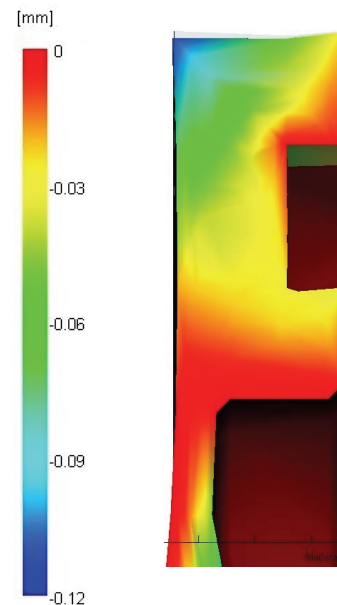


Bild 7: Simuliertes Schwindverhalten in radialer Richtung – Formteil schwindet auf Absätze auf

Erwartungen an das neue TOMAK-Messprinzip

Das neue Werkzeug zur Untersuchung der Adhäsionskraft stellt eine sinnvolle Ergänzung des bereits vorhandenen MEVEK-Werkzeugs dar, indem es dessen Schwächen kompensiert und neue Untersuchungen ermöglicht. Auf der anderen Seite weist dessen Komplexität eine gewisse Gefahr an Messfehlern auf, sodass es ebenfalls einige Schwächen aufweist. Mit der Beaufschlagung einer konstanten Normalkraft sowie der Möglichkeit einer nachträglichen Untersuchung der abgeformten Oberflächen ergeben sich neue und vielversprechende Möglichkeiten bei der Untersuchung der Adhäsionskraft.

Bewertung des neuen TOMAK Messprinzips

Die Integration eines präzisen Messsystems in ein Spritzgießwerkzeug, welches bis zu 2000 bar Spritzdruck standhalten muss, erwies sich als äußerst problematisch. Durch eine geeignete Konstruktion gelingt jedoch die Entkopplung des Messsystems und des massiven Spritzapparates. Die Komplexität sowie weitere Aspekte bringen jedoch auch die Gefahr einiger Schwächen mit sich.

Stärken

- Erzeugung einer definierten, konstanten und homogen verteilten Normalkraft bzw. Flächenpressung möglich
- Ermöglicht damit ein kontraktionsfreie Untersuchung der Adhäsionskräfte

Schwächen

- Praxisferne Entformungssituation → reines Versuchswerkzeug
- Zusätzliche Störkräfte durch eine axiale Lagerung vorhanden (jedoch bekannt)
- Nicht ideale Temperierung des Probekörpers

- Einfache und kostengünstige Fertigung der zu untersuchenden Oberflächen
- Negative radiale Schwindung wird bestmöglich unterdrückt
- Beschichtung nicht in Kontakt mit zusätzlichen Elementen
→ Beschädigung unwahrscheinlich
- Torsion der Probekörper nicht zwingend für die Entformung erforderlich
→ Abgeformte Oberflächen können nachträglich optisch untersucht werden
- Konstante Kontakfläche während der Messung
- Komplexer und fehleranfälliger Aufbau
- Negative Aspekte der radialen Schwindung können nicht vollständig eliminiert werden
- Oberflächenbenetzung kann nicht vor der Messung kontrolliert werden

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem aktuellen MEVEK-Werkzeug besitzt das IKFF ein Messwerkzeug, welches eine zuverlässige und kostengünstige Untersuchung der Entformungskräfte unterschiedlicher Werkzeugbeschichtung-Kunststoff-Paarungen ermöglicht. Die stetige Optimierung sowie langjährige Erfahrung dieses Messprinzips führte zu einem großen Erfahrungsschatz im Bereich der Entformungskraftuntersuchungen.

Für eine systematischere Untersuchung wurde ein zusätzliches Werkzeug konzipiert, welches, aufbauend auf einem neuen Messprinzip, einige kleine Schwächen des MEVEK-Werkzeugs kompensiert und neue Untersuchungsmöglichkeiten bietet. Die damit gewonnenen Erkenntnisse können das allgemeine Verständnis der adhäsiven Klebekräfte verbessern. Das Ziel der gewonnenen Erkenntnisse ist eine systematische Auswahl werkstoff- und prozessspezifischer Beschichtungen sowie die Entwicklung neuer Beschichtungen, die die adhäsiven Klebekräfte zwischen Werkstück und Werkzeugoberfläche verringern.

In Zusammenarbeit mit der Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH, dem Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST sowie der MHT - Mold & Hotrunner Technology AG und der Böhler-Uddeholm Deutschland GmbH werden aktuell neue Beschichtungen zur Reduzierung der adhäsiven Klebekräfte entwickelt und untersucht. Die ersten Voruntersuchungen zeigen hier vielversprechende Ergebnisse.

Die gewonnenen Erkenntnisse müssen nicht zwingend zur Reduzierung der Haftung beitragen. Ebenso kann die Erhöhung der Klebekräfte einen interessanten Ansatz darstellen. Am IKFF wird in einem weiteren

Forschungsthema die gezielte Erhöhung der Klebekraft an Einlegeteilen, die mit Hilfe induktiver Erwärmung realisiert werden soll, untersucht [5].

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Allianz Industrie Forschung (AIF) für die Förderung des Projekts durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) mit dem Förderkennzeichen KF2843301SL1. Darüber hinaus sei den erwähnten Kooperationspartnern für die Unterstützung gedankt.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Gleich, Henning: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [2] Freudenschuß, Günter: Haft- und Entformungskräfte beim Spritzgießen und Abhängigkeit von Stahlwerkstoff, Oberflächenstruktur, Beschichtung und Kunststofftyp, Masterarbeit, Universität Leoben, 2008
- [3] Burkard, E.; Walther, W.; Schinköthe, W.: Einfluß von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungsverhalten beim Spritzgießen, Tagungsbeitrag zum 16. Stuttgart Kunststoff-Kolloquium, Universität Stuttgart, 1999
- [4] Kopczynska, Agnieszka: Oberflächenspannungsphänomene bei Kunststoffen - Bestimmung und Anwendung, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2008
- [5] Maier, M.; Schinköthe, W.; Landfried, R.; Gadow, R.: Spritzgusswerkzeuge mit keramischen Formbereichen zur prozessintegrierten induktiven Erwärmung von Einlegeteilen, Tagungsbeitrag 23. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, Universität Stuttgart, 2013