

Im TFF-Verfahren hergestellte Mikrodichtungen I, II und III aus nicht spritzgießbarem PTFE (s. Tabellen S. 20)

Kleiner, dünner, leistungsfähiger

Neues Verfahren zur Herstellung von dünnwandigen Mikroteilen Der Trend zur Miniaturisierung von Formteilen geht weiter voran. Die Mikrosystemtechnik erfordert leistungsfähige und dabei hochpräzise Mikroteile. Bislang ließen sich Mikroteile – wenn überhaupt – nur aus Standardkunststoffen herstellen. An der Hochschule Aalen wurde ein neues Fertigungsverfahren zur Herstellung von dünnwandigen, dreidimensionalen Mikroteilen aus beliebig hochviskosen, thermoplastischen Hochleistungskunststoffen entwickelt.

Durch Mikrospritzgießen lassen sich kleine Formteile aus thermoplastischen Kunststoffen herstellen. Aufgrund der Dünnwandigkeit der herzustellenden Teile bedarf es dazu leicht fließender Formmassen, um die Werkzeugkavität vollständig füllen und die Formteilgeometrie ausbilden zu können.

Autoren

Prof. Dr. Achim Frick, Leiter des Instituts Polymer Science and Processing (iPSP) der Hochschule Aalen, Aalen, achim.frick@htw-aalen.de

Arif Rochman, Dozent an der University of Malta, Malta, arif.rochman@eng.um.edu.mt

Dr. Michael Schlipf, Entwicklungsleiter, Elring Klinger Kunststofftechnik, Bietigheim-Bissingen/Heidenheim, m.schlipf@elringklinger-kunststoff.de

Dr. Claudia Stern, Entwicklung Moldflon(R), Elring Klinger Kunststofftechnik, Bietigheim-Bissingen/Heidenheim, c.stern@elringklinger-kunststoff.de



nen. Dadurch blieb die mögliche Kunststoffauswahl für eine Herstellung von Mikroteilen bislang begrenzt. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielten vor allem auf die Auswahl geeignet fließfähiger Kunststoffe und die Verbesserung ihrer Fließfähigkeit ab, um dadurch eine ausreichende und vollständige Füllung der Kavität im Spritzgießwerkzeug zu erreichen.

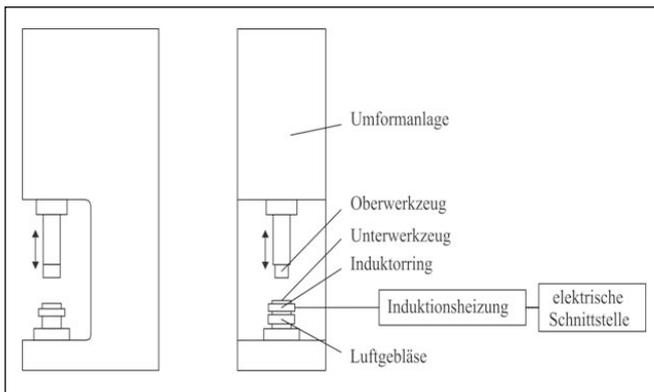
Tatsächlich zeichnen sich aber gerade die hoch und höchst molekularen Kunststoffe, die besonders schwer fließend sind, durch günstige mechanische, tribologische und chemische Eigenschaften aus. Sie können auch eine besondere Kriechbeständigkeit aufweisen. Diese Werkstoffe, beispielsweise PE-UHMW oder PTFE, sind jedoch durch ihre hohe Schmelzeviskosität im Spritzgießverfahren nicht verarbeitbar. Trotz eines hohen Bedarfs an Mikroteilen aus Hochleistungskunststoffen konnten bislang keine Teile aus solchen Kunststoffen spritzgießtechnisch hergestellt werden.

Die spanende Bearbeitung von hochmolekularen Halbzeugen zu Mikroteilen war bisher die einzige Möglichkeit der Fertigung. Dies ist jedoch weder ein ökonomisches noch ein ökologisches Verfahren. Das an der Hochschule Aalen neu

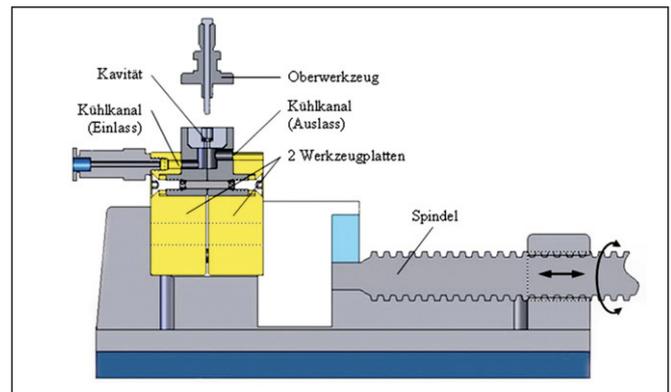
entwickelte Verarbeitungsverfahren, auf Basis eines Mikrothermoformprozesses, ermöglicht jetzt die Herstellung von dünnwandigen, dreidimensionalen Mikroteilen aus beliebigen, thermoplastischen Kunststoffen, auch aus nicht spritzgießbaren wie PTFE.

Verfahrensprinzip mit Abformungskonzept

Das Abformungskonzept des neuen Verfahrens basiert auf dem Fließen des zu verarbeitenden Kunststoffs in einem thermoelastischen Zustand. Die Werkzeugkontur wird durch den thermoelastischen Kunststoff abgeformt, um die gewünschte dreidimensionale Formteilgeometrie zu erzeugen. Im thermoelastischen Zustand ist das Polymer weniger fließfähig als im vollständig geschmolzenen Zustand. Das für das neue Verfahren verwendete Ausgangsmaterial (Vorformling oder Pulver) wird daher so präpariert, dass der zur vollständigen Konturabformung notwendige Fließweg des Materials gering ist und dass die Kavität mit dem viskosen Material vollständig gefüllt werden kann. Aufgrund der Fließverarbeitung im thermoelastischen Zustand wird das neue Verfahren als Thermofließformen (TFF) bezeichnet.



Prinzip des Thermofließformens (TFF)



Maschinenprinzip der Thermofließformanlage

Das volumetrisch abgestimmte Ausgangsmaterial wird in das vorgewärmte Werkzeug eingebracht und indirekt bis zu seinem thermoelastischen Zustand erwärmt. Durch den Druck des beweglichen Werkzeugstempels (obere Werkzeughälfte) fließt das Material in die Kavität und bildet die Formteilgeometrie. Während der Abkühlungsphase erstarrt der Kunststoff und das Formteil kann aus dem Werkzeug entfernt werden.

Es besteht die Möglichkeit, das Verfahren zu variieren. Das Material kann auch vollständig aus der Schmelze verarbeitet werden. Der Druck des beweglichen Stempels auf die Schmelze lässt die Kavität füllen. Nach Füllung der Kavität kann die erzeugte Formteilgeometrie noch zusätzlich durch Thermoformen ausgebildet werden. Voraussetzung dazu ist, dass sich der Kunststoff noch im thermoelastischen Zustand befindet. Der Oberstempel ist hier mit einem beweglichen Einsatz und Vakuumkanal ausgestattet. Nach dem Befüllen der Kavität und dem Ausbilden der Grundgeometrie des Formteils bewegt sich der Einsatz im Oberstempel in eine definierte, zweite Position. Dies erzeugt zwei Funktionen. Es wird eine zusätzliche Kavität für eine Thermoformkontur gebildet und zusätzlich der Vakuumkanal (Saugkanal) zur Unterstützung des kombinierten Thermoformprozesses geöffnet. Nach der vollständigen Konturausbildung des Teils folgen die Abkühlung und Entformung.

Das kombinierte TFF-Verfahren stellt insbesondere an den Werkzeugbau sehr große Anforderungen. Für die Machbarkeitsstudie wurde daher zunächst ausschließlich die erste Verfahrensvariante gewählt.

Thermofließformanlage im Versuch

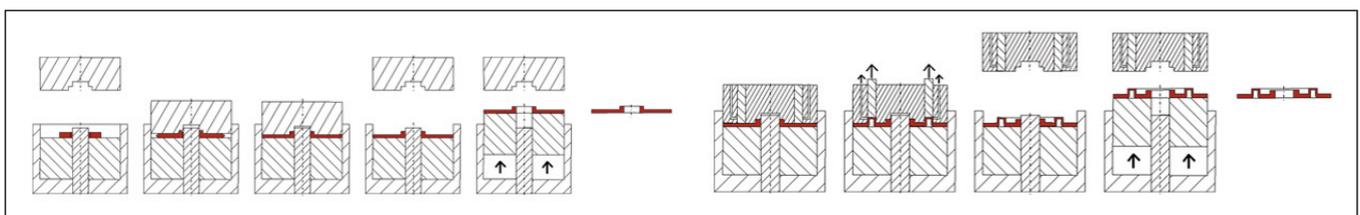
Die Thermofließformanlage für den Versuch besteht aus einer servoelektrischen Umformeinheit, einem Formwerkzeug bestehend aus einem beweglichen Ober- und feststehenden Unterwerkzeug sowie einer Heizung für das Werkzeug. Für die Durchführung der Versuche war das bewegliche Oberwerkzeug an der Achse der Umformeinheit montiert. Das Unterwerkzeug war zur Bewegungsachse zentriert und auf dem Tisch der Umformanlage befestigt. Als Heizung wurde eine Induktionsheizung verwendet.

Für eine erste Machbarkeitsstudie wurde zunächst ein einfaches Werkzeug konstruiert. Das teilbare Werkzeug besteht aus einem Unter- und Oberwerkzeug, das jeweils einen auswechselbaren Einsatz besitzt. Die beiden Einsätze bilden im geschlossenen Zustand die gewünschte, abzubildende Formteilgeometrie (Kavität). Das untere Werkzeug ist in Längsrichtung teilbar (zwei Werkzeugplatten), was der besseren Entformung des hergestellten Formteils dient.

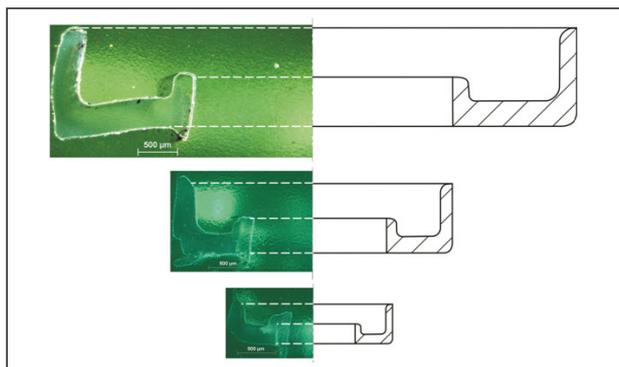
Die erste Werkzeughalteplatte ist durch Spannbacken fest montiert. Sie ist außerdem mit einer Öffnung für den Ein-

lass der Kühlluft versehen. Die zweite Halteplatte befindet sich an der beweglichen Spannbacke des Werkzeughalters. Sie lässt sich mithilfe einer Spindel bewegen. Die bewegliche Spannbacke erlaubt es, das längsteilbare Unterwerkzeug zu öffnen und zu schließen. Die zweite Platte ist ebenfalls mit einer Öffnung versehen, die als Auslass für die Kühlluft dient. Die beiden Öffnungen sind versetzt angeordnet, um eine bessere Luftdurchströmung und damit eine bessere Kühlwirkung der Formkavität zu gewährleisten.

Das Thermofließformen soll eine ähnlich kurze Zykluszeit für die Fertigung eines Formteils besitzen wie das Spritzgießen. Um das zu erzielen, wird das TFF-Werkzeug durch ein induktives Heizungssystem erhitzt. Das im Werkzeug befindliche Ausgangsmaterial (Kunststoffpulver oder Vorformling) erfährt durch den Kontakt mit dem Werkzeug eine indirekte Erwärmung. Der Induktoring der Heizung ist so positioniert, dass die an der Werkzeughalteeoberfläche induktiv entstandene Wärme gut in den Kavitätsbereich gelangt. Es ist darauf zu achten, dass die Außengeometrie und die Masse der zu erwärmenden Bereiche des Ober- und Unterwerkzeugs näherungsweise gleich sind. Sind die induktiv zu erwärmende Masse und der Abstand der Masse zum Induktoring gleich, dann lässt sich die Formkavität im Ober- und Unterwerkzeug homogen aufheizen.



Das teilbare Formwerkzeug ist in Werkzeughalteplatten montiert.



Ist-Soll-Vergleich der hergestellten Mikroformteile aus PTFE (Durchmesser: 7,5 mm, 4 mm und 2,5 mm)

In Vorbereitung der TFF-Versuche wurde das Werkzeug mit unterschiedlicher Heizzeit bei 45 Prozent der maximalen Heizleistung von 10 kW aufgeheizt und die erreichbare Temperatur des Ober- und Unterwerkzeugs gemessen. Damit ließ sich ein Heizzeit-Temperatur-Diagramm erstellen, dem später die Einstellung der Induktionsheizung für eine gewünschte Verarbeitungstemperatur entnommen werden kann. Die Ist-Temperatur wird für den jeweiligen Verarbeitungsversuch noch mal gemessen und kontrolliert.

Für die Verarbeitung, beispielsweise von PTFE, muss das Unterwerkzeug bis auf 317 °C aufgeheizt werden. Die Heizzeit beträgt dabei etwa 10 Sekunden. Die Abformung der Werkzeugkontur erfolgt mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,1 mm/s und die anschließende Abkühlzeit beträgt 20 Sekunden.

Mit den genannten Verarbeitungsparametern wurden drei verschiedene Mikrodichtungen hergestellt (s. Bild S. 18 und Tabellen S. 20). Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Mikrodichtungen aus PTFE dienten ringförmige Vorformlinge. Diese sind aus PTFE-Folien und mithilfe einer Stanzvorrichtung präpariert.

Gut abgeformtes Versuchsergebnis

Der Erfolg und die Qualität der Abformversuche mittels TFF-Verfahren werden zunächst nach der vollständigen Konturausbildung der zu erzeugenden Geometrie bewertet. Die Außen- und Innendurchmesser sowie die Aufzüge der Mikrodichtungen sind gut abgeformt. Die erkennbare, weiße Linie an den Mikrodichtungen entspricht der Trennlinie im geteilten unteren Werkzeug.

Die Abformung unterschiedlicher Mikro-Geometrien (hier: Außen-Durchmesser 7,5 bis 2,5 mm) ist mittels TFF-Verfahren prinzipiell sehr gut möglich. Mit dem Verfahren lassen sich aus nicht

Mikroformteilen sind weniger verfahrenstechnisch, als vielmehr werkzeugtechnisch bedingt. Die verwendeten Formwerkzeuge wurden unter Werkstattbedingungen gefertigt. Es wurden keine speziellen Mikrobearbeitungstechniken angewandt.

Durch die Verwendung eines Vorformlings oder einer Pulvermenge mit definierter Masse beim Thermofließformen zur Herstellung eines gewünschten Mikroformteils ist das TFF-Verfahren praktisch abfalllos. Die TFF-Formteile sind anschnittlos und daher spritzgegossenen Formteilen überlegen, da sie auch bei ringförmigen Teilen keine Bindenaht und damit keine mechanische Schwachstelle aufweisen. Bindenähte stellen bei der Montage von Formteilen und bei deren Einsatz stets kritische Stellen dar, die ein besonderes Versagensrisiko bilden.

spritzgießbaren Thermoplasten Mikroformteile herstellen. Bei den erzeugten Prototypen ist ein gewisser Formteilverzerrung zu beobachten.

Die beobachtbaren Ist-Soll-Abweichungen bei den hergestellten

Thermofließformverfahren

Mit dem neu entwickelten Thermofließformverfahren (TFF-Verfahren) ist es möglich, verschiedenste thermoplastische Kunststoffe, unabhängig von ihrer Schmelzviskosität, zu verarbeiten. Zu diesen Werkstoffen zählen beispielsweise ultrahochmolekulare Kunststoffe wie PE-UHMW und PTFE, die durch Spritzgießen nicht verarbeitet werden können. Im TFF-Verfahren lassen sich erstmals Mikroformteile für mikrosystemtechnische Anwendungen mit höchsten Anforderungen an deren mechanische, tribologische, chemische oder thermische Beständigkeit herstellen. Durch Verwendung von PTFE als Werkstoff können hohe Anforderungen an die Temperatur- oder Chemikalienbeständigkeit erfüllt werden. Untersuchungsergebnisse belegen, dass PTFE im TFF-Verfahren sehr gut verarbeitbar ist. Das TFF-Verfahren kann die abfallreiche, spanende Bearbeitung von PTFE-Halbzeugen ersetzen. Das TFF-Verfahren hat das Potenzial, unter Verwendung eines Mehrfachwerkzeugs und einer optimalen Verfahrensoptimierung Mikroformteile in großen Mengen kostengünstig herzustellen.

Eine Einführung des TFF-Verfahrens in die Praxis industrieller Fertigung ist in absehbarer Zeit denkbar. Das Verfahren erlaubt, Mikroformteile aus thermoplastischen Kunststoffen mit neuartigen Eigenschaften für die Realisierung von innovativen Produkten erfolgreich herzustellen. Es wird darüber hinaus erwartet, dass das Verfahren auch eine einfache Herstellung von Mehrkomponenten-Mikroformteilen erlaubt, was bislang ebenfalls nicht möglich war.

Soll-Geometrien der hergestellten Mikrodichtung

Maße	Mikrodichtung I	Mikrodichtung II	Mikrodichtung III
Außendurchmesser Da [mm]	7,5	4	2,5
Innendurchmesser Di [mm]	3	2	1
Aufzughöhe hA [mm]	1,4	1	0,8
Aufzugdicke dA [µm]	250	200	150
Wanddicke dB [µm]	400	250	150
Innenaufzug = 1/2 hA			

Geometrie der Vorformlinge zur Herstellung der Mikrodichtungen I bis III mittels TFF-Verfahren

Mikrodichtung	Maße des Vorformlings		
	Da [mm]	Di [mm]	d [mm]
I	6	4	1
II	4	2	0,5
III	2,5	1	0,5