

Hochwärmeleitfähige Werkzeugmaterialien. Beim Spritzgießen ist das Werkzeug elementarer Bestandteil des Prozesses. In Anwendungen, die eine hohe Wärmeausbringung oder Abformgenauigkeit verlangen, empfiehlt sich der Einsatz von Werkzeugwerkstoffen mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit. Eine Eisen-Kobalt-Nickel-Legierung mit entsprechender Wärmeleitfähigkeit, hoher Festigkeit und einem stahlgleichen Wärmeausdehnungsverhalten kann bisher eingesetzte Materialien substituieren.



Probekörpereinsätze
aus FeCoNi-Legierung

Besser temperiert durch Hochleistungslegierung

**PETER RÖSTEL
KAI HOLL
THOMAS SEUL**

Der Werkzeugbau verwendet für Einsätze und Kerne aktuell meist die Legierungen 1.2343 (X37CrMoV5-1), 1.2083 (X40Cr14) oder 1.2767 (X45NiCrMo4) mit den bekannten Eigenschaften (Tabelle 1). Das Labor für angewandte Kunststofftechnik der Fachhochschule Schmalkalden hatte nun Gelegenheit zu untersuchen, inwieweit sich eine neuartige Eisen-Kobalt-Nickel-Legierung als Werkstoff für Spritzgießwerkzeuge eignet.

Spritzgießwerkzeuge müssen vielfältige Aufgaben erfüllen – vom Aufnehmen und Verteilen der Schmelze bis zum Entformen der Teile –, den Kräften beim Schließen, Zuhalten und Einspritzen standhalten sowie das Ausführen von Bewegungen und die Führung einzelner Werkzeulemente er-

möglichen. Dass dabei qualitativ hochwertige Produkte in einem zeiteffizienten Prozess hergestellt werden müssen, führt zu hohen dynamischen Beanspruchungen. Werkzeuge müssen also valide und hoch belastbare Produktionsmittel sein.

Die meist als Einzelstücke hergestellten Werkzeuge bestimmen die Wirtschaftlichkeit und Qualität bei der Formteilproduktion und übernehmen damit die Rolle eines Schlüsselements in der Produktion. Die Maßhaltigkeit des Produkts hängt wesentlich von der Präzision beim Werkzeugbau ab. Die Wirtschaftlichkeit wird im hohen Maß durch die Auslegung beeinflusst.

Die Zykluszeit, wovon bis zu 70 % auf die Kühlzeit entfallen, kann über die Werkzeugmaterialien gelenkt werden [1].

Nachteile von Kupfer-Beryllium-Legierungen

Dazu müssen die verwendeten Materialien vielfältigen Anforderungen genügen. Allen voran steht die Forderung einer wirtschaftlichen Bearbeitung bei Ersterstellung, Änderungen und Reparaturen des Werkzeugs. Um die Härte und Verschleißfestigkeit, z. B. gegenüber Glasfasern, Füllstoffen und Additiven, zu erhöhen, ist meist eine Wärmebehandlung geboten. Dabei müssen die Materialien eine ausreichende Zähigkeit besitzen, damit sie die Prozesskräfte sicher aufnehmen können. Darüber hinaus ist eine gewisse Korrosionsbeständigkeit gegenüber aggressiven Temperiermedien und Kunststoffanteilen notwendig [2, 3].

Ein Werkzeug fungiert beim Spritzgießen als Wärmetauscher. Es muss die durch die Kunststoffschmelze zugeführte

i Kontakt

**Fachhochschule Schmalkalden
Angewandte Kunststofftechnik
D-98574 Schmalkalden
TEL +49 3683 688-2222
→ www.angewandte-kunststofftechnik.de**

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU111018

Wärmemenge über die Temperierung abführen. Die Geschwindigkeit der Wärmeabfuhr hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Bauteile und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Eine effiziente Kühlung ermöglicht kürzere Zykluszeiten, durch homogene Wandtemperaturen wird eine höhere Bauteilqualität erreicht. Kühlkanäle können einen größeren Abstand zur Werkzeugwand haben (dünne Kerne, Vermeidung von Hotspots). Theoretisch können die Bauteilwanddicken verringert werden, da die Wahl einer höheren Massetemperatur möglich ist und somit die Fließfähigkeit der Schmelze zum Füllen beibehalten wird [3].

Wenn z. B. schnelllaufende Artikel eine beschleunigte Wärmeabfuhr oder Dekorelemente eine erhöhte Abformgenauigkeit erforderlich machen und folglich eine hohe Wärmeleitfähigkeit für formgebende Teile gefragt ist [4], kommen häufig Kupfer-Beryllium-Legierungen (CuBe2) zum Einsatz. Dabei verbessert das Beryllium mit Zugaben bis maximal 2 % die mechanischen Eigenschaften. Die Härte und die Zugfestigkeit solcher Legierungen sind im Vergleich zu den klassischen Stahlwerkstoffen geringer (Tabelle 1), für die Verarbeitung faserhaltiger Materialien sind sie nur bedingt geeignet. Lange dünne Kerne lassen sich aus CuBe2 nur schwer herstellen. Hinzu kommt, dass bei solchen hybriden Werkzeugen die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe von Nachteil sind. Nicht zu vergessen sind die toxischen Eigenschaften des Berylliums, das beim Bearbeiten in die Luft gelangen kann [2, 3, 5].

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg m ⁻³]
1.2343 / 1.2083	11 – 35	1990	7850
CuBe2	ca. 100	670 – 1150	8090 – 8620
FeCoNi	95	1500	8100

Zykluszeitgewinne mit der FeCoNi-Legierung

Eisen-Kobalt-Nickel-Legierungen (FeCoNi) sind daher eine interessante Alternative. Die untersuchte Legierung Duracon 45M (Fe: 40 %, Co: 45 %, Ni: 15 %; Hersteller: Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau) besitzt im ausgehärteten Zustand eine vergleichbare Wärmeleitfähigkeit und Dichte wie CuBe2 sowie eine Zugfestigkeit, die deutlich höher ist (Tabelle 1). Daneben verfügt sie mit $\alpha = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ über einen nahezu iden-

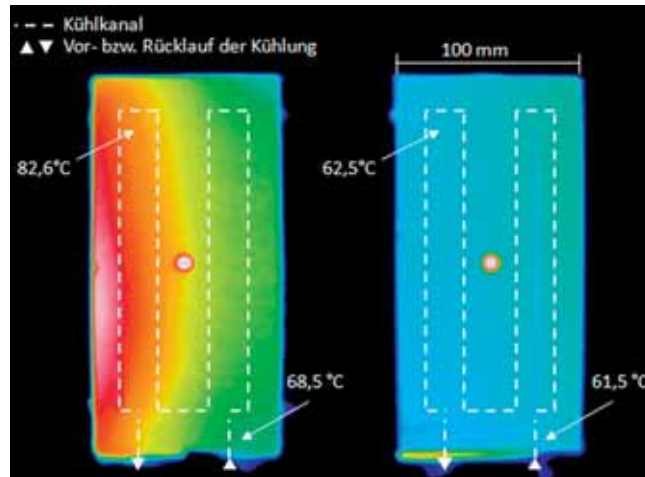


Bild 1. Die Temperaturverteilung nach Aufheizung ist bei der FeCoNi-Legierung (rechts) homogener als bei dem konventionellen Stahl (links), und die Wärme wird schneller abgeführt (Bilder, außer Bild 7: FH Schmalkalden)

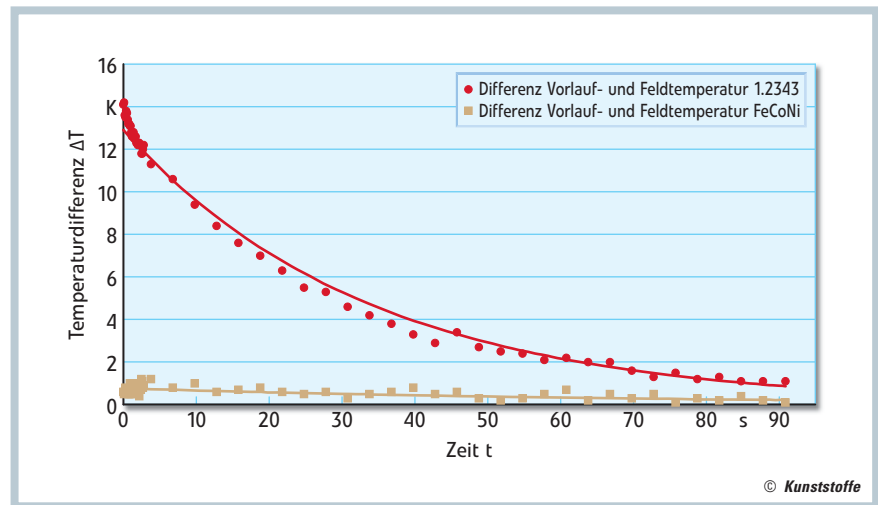


Bild 2. Bei der Abkühlung nach dem Aufheizen mit einem Heizelement benötigt der konventionelle Stahl (1.2343) etwa 70 s, um eine Temperaturdifferenz kleiner 2 K zwischen Vorlauf- und Feldtemperatur einzustellen

tischen Wärmeausdehnungskoeffizienten wie Stahl und hat keine toxischen Legie-

Tabelle 1. Die Kenn-daten im Spritzgießwerkzeugbau einsetzbarer Werkstoffe offenbaren die spezifischen Stärken und Schwächen

rungsbestandteile. Bei geeigneter Handhabung kann die FeCoNi-Legierung auf 48 HRC gehärtet werden, wobei die Temperatureinsatzgrenze bei 450 °C liegt. Um die FeCoNi-Legierung für den Einsatz in Spritzgießwerkzeugen zu validieren, werden mehrere Ansätze verfolgt. Neben den praktischen Versuchen steht eine theoretische Betrachtung über eine mögliche Verkürzung der Kühlzeit. Zur Berechnung der Kühlzeit sind Formeln nach [4] von Bedeutung. Dabei gilt es zu beachten, dass diese von idealen Verhältnissen ausgehen. Hotspots lassen sich so nicht berechnen.

In der Berechnung – jeweils mit einem amorphen (PC) und einem teilkristallinen (POM) Kunststoff – werden der 1.2343, eine CuBe2-Legierung und die FeCoNi-Legierung einander gegenübergestellt. Um die Restkühlzeit zu erhalten, wird von den Ergebnissen eine fiktive Einspritz- und Nachdruckzeit abgezogen. Die Betrachtung der Restkühlzeit ergibt, dass die höhere Wärmeleitfähigkeit der FeCoNi-Legierung unter der Annahme, dass ideale Bedingungen herrschen, Zeitgewinne von 7,5 bis 10 % gegenüber dem 1.2343 ermöglicht. Die FeCoNi-Legierung liegt damit noch besser als CuBe2. Bei nicht kühlbaren Kernen oder im Falle von Hotspots sind höhere Zeitgewinne zu erwarten, da hier die Wärme einen längeren Weg bis zur Temperierung zurücklegen muss.

Zwei Werkzeugmaterialien im direkten Vergleich

Für die praktischen Versuche werden (sowohl amorphe als auch teilkristalline)

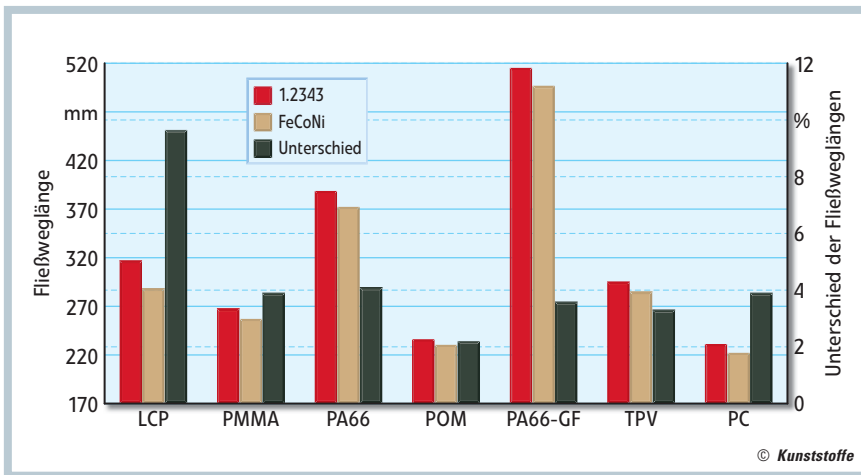


Bild 3. Durch den Einsatz der FeCoNi-Legierung konnten im Versuch die Fließweglängen je nach Material um bis zu 10% reduziert werden, was in Relation zu einer verkürzten Kühlzeit zu sehen ist

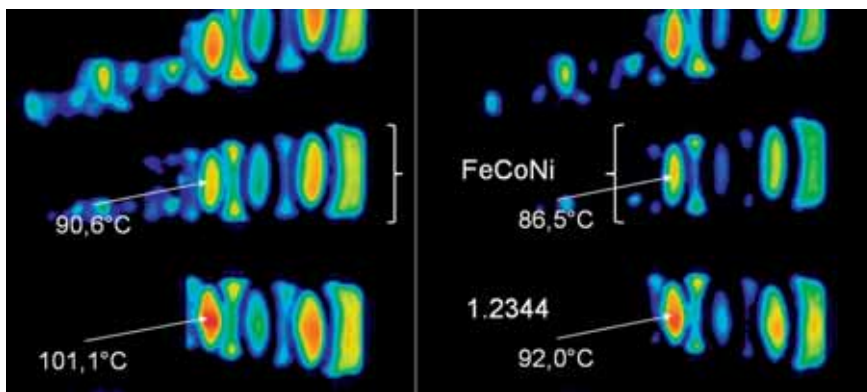


Bild 4. Für einen bei der E-proPlast GmbH, Schmalkalden, durchgeführten Feldversuch wurden in ein Spritzgießwerkzeug für PET-Preforms Kerne aus der FeCoNi-Legierung eingebaut. Das Bild zeigt die Temperaturverhältnisse direkt nach der Entformung (im Vergleich zu 1.2344)

Kunststoffe gewählt, deren Anwendung oft eine hohe Abformgenauigkeit oder Wärmeausbringung verlangt, u.a. LCP, POM, PA, PC, PMMA und TPV. Die Grenzen zwischen den Anforderungen sind jedoch fließend. Dazu werden für ein vorhandenes Probekörperwerkzeug jeweils Einsätze für eine D2-Schwindungsplatte (DIN EN ISO 294-3), eine Fließspirale und eine Spiegelplatte aus 1.2343 sowie der FeCoNi-Legierung hergestellt.

Um das Abkühlverhalten der beiden Werkstoffe zu vergleichen, werden die mit Wasser konstant temperierten Spiegelplatten (60°C) gleichzeitig mit einem Heizelement (160°C) in Kontakt gebracht. Nach dem Entfernen des Heizelements werden die Temperaturen auf den Platten an je zwei Stellen (Vorlauf und Feld) thermografisch (Thermokamera NEC G 120; Hersteller: NEC) ermittelt. Dabei wird eine Emissionsgradfolie verwendet, die die Messung verbessert. Die Temperaturverteilung in den Platten direkt nach dem Entfernen des Heizelements (Bild 1) veranschaulicht die schlechtere Wärmeabfuhr beim konventionellen

Stahl, die sich in einem Temperaturunterschied von 14 K an den beiden Messpunkten ausdrückt. Hingegen stellt sich in der FeCoNi-Legierung eine homogene Verteilung der Wärme sowie eine Temperaturdifferenz von nur 2 K zwischen den Messpunkten ein. Die Messung zeigt, dass

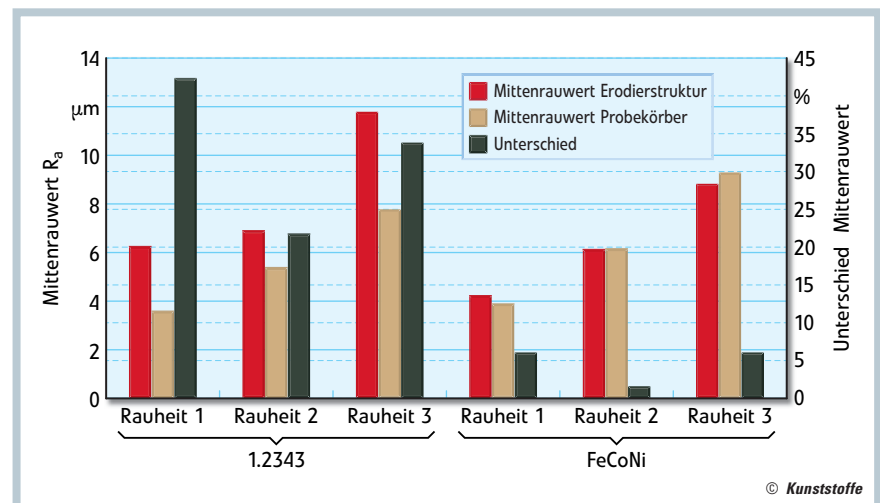


Bild 5. Die Messung des Mittenrauwerths auf PE-Platten ergab einen deutlich geringeren Unterschied zwischen Werkzeug und Formteil bei Verwendung der FeCoNi-Legierung

es etwa 70 s dauert, bis der 1.2343 das gleiche Temperaturniveau erreicht wie die FeCoNi-Legierung (Bild 2).

Dass ein Werkzeugwerkstoff mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit die Prozesswärme aus dem verarbeiteten Kunststoff schneller abführt, lässt sich mit dem Fließspiraleneinsatz nachweisen. Dazu wird mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Druck (jeweils werkstoffabhängige Werte) ohne Nachdruck so lange eingespritzt, bis kein weiterer Schneckenhub möglich ist. Die Bearbeitungsparameter werden zwischen den unterschiedlichen Einsätzen nicht verändert. Dabei wird deutlich, wie sich durch die schnellere Abkühlung die erreichten Fließweglängen um 2 bis 10% verringern (Bild 3), was in Relation zu einer entsprechend kürzeren Kühlzeit zu sehen ist.

In einem Feldversuch werden in ein Werkzeug zur Herstellung von Preforms für PET-Flaschen Kerne aus der FeCoNi-Legierung eingebaut und unter Serienbedingungen getestet. Die Temperatur gerade entformter Preforms wird thermografisch bestimmt (Bild 4). Dabei weisen die auf FeCoNi-Kernen gespritzten Preforms, abhängig von der Kühlwassertemperatur, eine zwischen 3 und 10 K geringere Entformungstemperatur auf.

Erhöhte Abformgenauigkeit

Abhängig vom Anwendungsfall verbessert eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit die Abformgenauigkeit. Für die Untersuchung werden verschiedene Rauheitsklassen in eine Seite des D2-Platten-Einsatzes nach VDI 3400 durch Erodieren eingebracht. Die unterschiedlich rauen Felder werden im Tastschnittverfahren (Rauheitsmessgerät: Turbo Wave; Taster: TKU 300; Her-

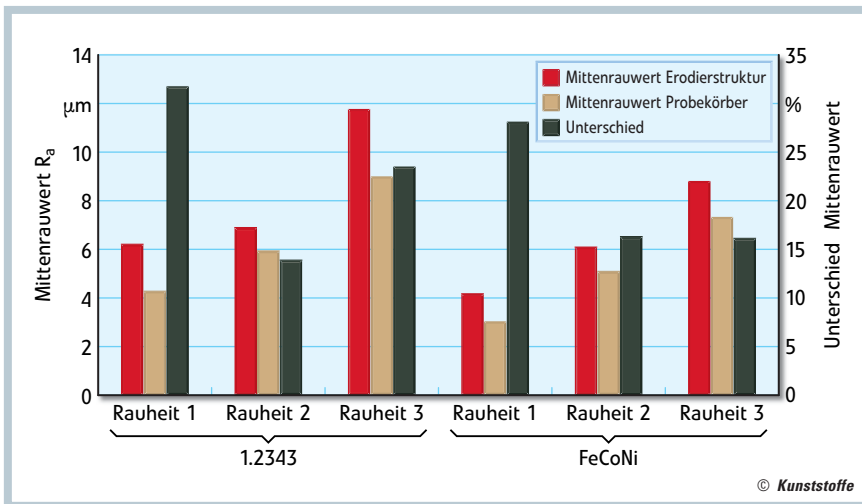


Bild 6. Die Messung des Mittenrauherwerts auf Formteilen aus schwerfließendem PMMA ergab, anders als bei den PE-Platten, keine Verbesserungen der Abformgenauigkeit



Bild 7. Die FeCoNi-Legierung (rechts) zeigt eine bessere Korrosionsbeständigkeit als ein 1.2343 (links). Die Proben wurden für 24 h in Temperierwasser (pH-Wert: 8,0; Gesamthärte: 5 °dH) bei 85 °C eingelagert (Bild: Vacuumschmelze GmbH)

steller: Jenoptik AG) gemessen. Ergebnis: Bei gleichen Erodierparametern unterscheiden sich die erreichten Oberflächenrauheiten von 1.2343 und der FeCoNi-Legierung nach der Bearbeitung. Eine Normierung der Ergebnisse macht diese aber dennoch vergleichbar.

Welche Verbesserung die FeCoNi-Legierung bringt, hängt nicht zuletzt vom verwendeten Kunststoff ab. So sind bei der Verarbeitung von PE die Unterschiede der Strukturen zwischen Kavität und Formteilen bei dem FeCoNi-Einsatz um ein Vielfaches geringer als beim konventionellen Stahl (Bild 5). Im Gegensatz dazu lässt ein schwerfließendes PMMA, insbesondere bei feinen Strukturen, keine hohe Abbildungstreue erwarten (Bild 6).

Um auf breitem Feld einsetzbar zu sein, muss ein Werkzeugwerkstoff vor allem korrosivem Angriff widerstehen, sei es

durch Kühlwasser oder die verarbeiteten Kunststoffe selbst. Zur Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit werden einfache Probekörper aus der FeCoNi-Legierung sowie aus 1.2343 für 24 h in temperiertem Wasser (85 °C) eingelagert. Die FeCoNi-Legierung lässt eine vielfach bessere Korrosionsbeständigkeit erkennen als ein 1.2343 (Bild 7).

Die FeCoNi-Legierung ist mit den gängigen Methoden (Drehen, Fräsen, Bohren) zerspanbar und lässt sich gut schleifen. Anwender müssen jedoch, verglichen mit dem 1.2343, mit einem leicht erhöhten Werkzeugverschleiß rechnen. Erodieren und Lasermaterialbearbeitung sind problemlos möglich. Die Wärmebehandlung sollte unter Wasserstoffatmosphäre durchgeführt werden. Grundsätzlich ist eine Oberflächenhärte von 48 HRC erreichbar.

Fazit

Im Vergleich mit einem 1.2343 hat sich die FeCoNi-Legierung Duracon 45M als Werkstoff im Spritzgießwerkzeugbau qualifiziert. Die Legierung dürfte zukünftig problemlos Anwendung in der Verpackungsindustrie und bei Herstellern von Preforms, technischen Teilen, Bauteilen aus Hochtemperatur-Kunststoffen, Sichtbauteilen und strukturierten Formteilen finden. Dabei muss nicht die gesamte Formkontur mit der Legierung abgebildet sein. Ein Einbau des Materials in Hotspots, langen Kernen oder bei strukturierten Oberflächen reicht aus, um die Vorteile dieses Legierungstyps auszuspielen. Weitere Anwendungen in Extrusionsblasformwerkzeugen oder bei Duroplastwerkzeugen sind denkbar. ■

DANK

Der Dank der Autoren gilt der Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau, für die Bereitstellung der Einsätze für das Probekörperwerkzeug, der Thüringischen Weidmüller GmbH, Wutha-Farnroda, für die Bereitstellung der Versuchsmaterialien sowie der E-proplast GmbH, Schmalkalden, für die Unterstützung bei der Durchführung der thermografischen Untersuchungen am Preformwerkzeug.

LITERATUR

- 1 Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. Carl Hanser Verlag, 6. Auflage, München, Wien 2011
- 2 Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P.: Spritzgießwerkzeuge. Carl Hanser Verlag, 6. Auflage, München, Wien 2007
- 3 Menning, G.: Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung – Bauarten, Herstellung, Betrieb. Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, München, Wien 1995
- 4 Zöllner, O.: Optimierte Werkzeugtemperierung. Firmenschrift der Bayer AG, Leverkusen 1999
- 5 N.N.: Sicherheitsdatenblatt Beryllium, W.C. Heraeus GmbH, Hanau, 07.01.2000

DIE AUTOREN

PETER RÖSTEL, M. ENG., geb. 1983, ist seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für angewandte Kunststofftechnik der Fachhochschule Schmalkalden tätig.

DIPL.-ING. (FH) KAI HOLL, geb. 1982, ist seit 2009 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für angewandte Kunststofftechnik der FH Schmalkalden tätig.

PROF. DR.-ING. THOMAS SEUL, geb. 1969, ist seit 2007 an der FH Schmalkalden Professor für die Fertigungstechnik und Werkzeugkonstruktion. Seit Januar 2008 hat er das Amt des Prorektors für Forschung und Transfer an der Hochschule inne.

© Carl Hanser Verlag, München 2012. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe dieses Sonderdrucks und der Übersetzung behält sich der Verlag vor.