

Im Spannungsfeld von Wissenschaft und Praxis

Bauteilentwicklung. Ingenieurwissenschaftliche Aktivitäten sind auf Dauer nur erfolgreich, wenn sie auf die Bedürfnisse der Praxis ausgerichtet sind. Dies gilt besonders für den Bereich der Kunststoffverarbeitung, bei dem es darum geht, neue Erkenntnisse in Hinweise für die Konstruktionspraxis umzusetzen.

**FRANK EHRIG
JOHANNES KUNZ
MARIO STUDER**

In der Kunststofftechnik sind insbesondere bei der Bauteilauslegung neben Erkenntnissen der Naturwissenschaften auch die Erfahrungssystematik, Intuition und die schöpferische Kraft des Ingenieurs gefragt, um zu technisch neuen und wirtschaftlich interessanten Lösungen zu kommen [1]. Die erfolgreiche Konstruktionspraxis ist dabei auf Instrumente angewiesen, die von den Ingenieur- und Werkstoffwissenschaften erarbeitet und anwendungstauglich bereitgestellt werden. Hier geht es um Methoden, Richtlinien, Auslegungstools und Werkstoffbeschreibungen mit den entsprechenden mathematischen Modellen. Als Vision schwebt vor, Prozesse und Produkteigenschaften durchgängig unter Verwendung von Computern zu durchdenken und vorauszuberechnen [2]. Am klassischen Prozessablauf Planen und Klären, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten führt jedoch kein Weg vorbei [3].

Die Wissenschaft arbeitet intensiv an der Realisierung der genannten Vision. Mit der ständig steigenden Leistungsfähigkeit der Rechner wachsen die Möglichkeiten, aber auch die Ansprüche an Prozess- und Struktursimulationen, mit denen Bauteile virtuell hergestellt und auf ihr mechanisches, thermisches, akustisches und wie auch immer physikalisches Verhalten hin beurteilt werden können. Für die Praxis bedeutet dies einerseits den Einsatz entsprechend ausgebildeter Fachleute, aber auch die Verfügbarkeit der erforderlichen Werkstoffmodelle und -kennwerte. Hier besteht

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU110789

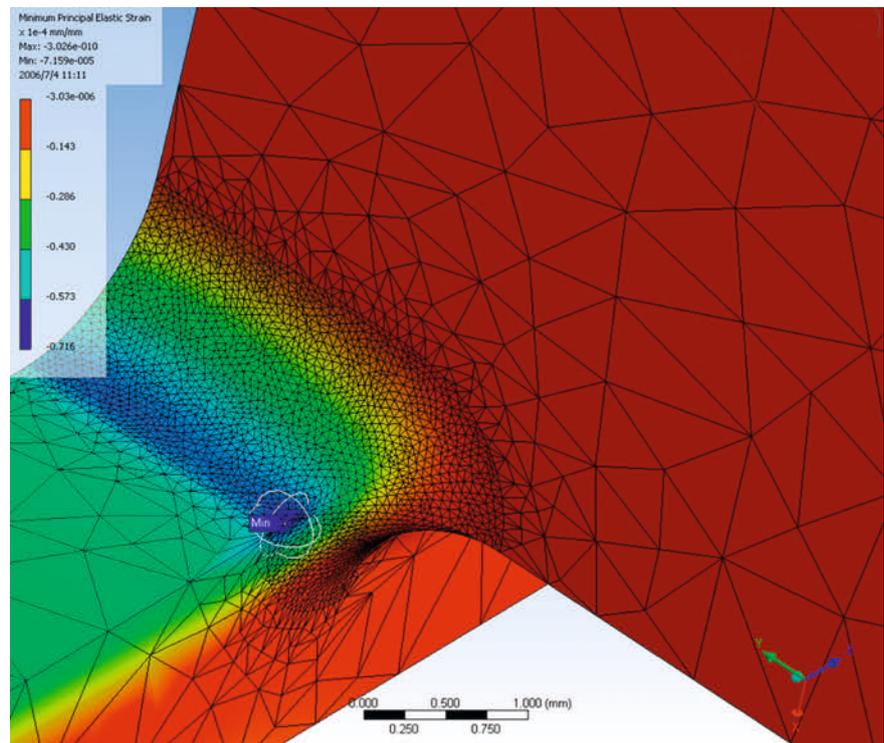


Bild 1. Überhöhung der Dehnung bei der Anbindung von Schnapphaken (Kerbwirkung)
(alle Bilder außer Bild 5: IWK)

weiterhin großer Forschungsbedarf, und die Industrie ist gefordert, die benötigten Werkstoffkennwerte systematisch zu ermitteln und der Praxis zugänglich zu machen [2]. Jedes, selbst das noch so ausgefeilte Simulationsprogramm ist nur so gut, als es im Konstruktionsalltag eingesetzt werden kann.

Oft sind bei der Bauteilauslegung auch einfachere Abschätzungen mithilfe von Berechnungsformeln hilfreich. Diese basieren in der Regel auf einer wissenschaftlichen Grundlage, idealisieren aber das komplexe Verhalten zu einem Modell, das sich auf die Erfassung der entscheidenden Einflüsse beschränkt. Hier ist die Wissenschaft ebenfalls aufgerufen, der Praxis solche Hilfen zur Verfügung zu stellen, die

auch ohne umfassende Simulation zu brauchbaren Ergebnissen führen, wie beispielsweise bei der Abschätzung von Wärmespannungen mit Ein-Punkt-Daten [4] oder die Beschreibung der Kerbwirkung bei der Anbindung von Schnapphaken (Bild 1) durch einfache Berechnungsformeln [5].

Wenn die Wissenschaft neue Fertigungsverfahren entwickelt, so eröffnet sie damit der Praxis nicht nur neue Möglichkeiten für die Bauteilherstellung, sondern zumeist auch für die Bauteilkonstruktion mit bisher undenkbar Konzepten. Zu diesem Transfer gehört dann auch die Bereitstellung entsprechender Konstruktionsrichtlinien in praxisorientiert verfassten Fachunterlagen [3, 6].

Beispiel: Cool-Touch-Effekt

Ein solches neues Fertigungsverfahren ist auch das Hinterspritzen von Metallfolien [7–9]. Bei einer Foliendicke ab 0,1 mm ermöglicht es im Gegensatz zu anderen Dekorationsverfahren für Kunststoffbauteile nicht nur die Realisierung einer metallischen Oberfläche, sondern gewährleistet auch das von den Metallen bekannt-

folgt heute experimentell. Die Folge ist eine Vielzahl von Iterationsschleifen, die zeit- und kostenintensiv sind. Aufgabe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten ist die Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Bauteilqualität sowie die Erstellung von Konstruktionsrichtlinien. So sind in der Vergangenheit beispielsweise Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Haftver-

beeinflusst. Optimal wären möglichst geringe Reibwerte zwischen Metallfolie und der Oberfläche der Tiefziehwerkzeugkomponenten (Matrize und Faltenhalter), damit die Umformkräfte möglichst klein werden und der Faltenhalterdruck beliebig groß gewählt werden könnte. Dies würde die Faltenbildung verhindern und komplexe, dreidimensionale Geometrien könnten einfacher hergestellt werden.

Das gesamte Tribosystem beim Tiefziehprozess wird beeinflusst durch die Materialpaarung der Tiefziehwerkzeugkomponenten (Matrize, Faltenhalter) und des Metallfolientyps (z. B. Aluminium oder Edelstahl), von den Zwischenschichten, wie Haftvermittlerschicht, Schutzlack oder Eloxalschicht und deren Oberflächenstruktur sowie dem auftretenden Belastungskollektiv und den Umgebungsbedingungen. Die messtechnische Analyse der tribologischen Eigenschaften sollte daher unter praxisnahen Bedingungen stattfinden.

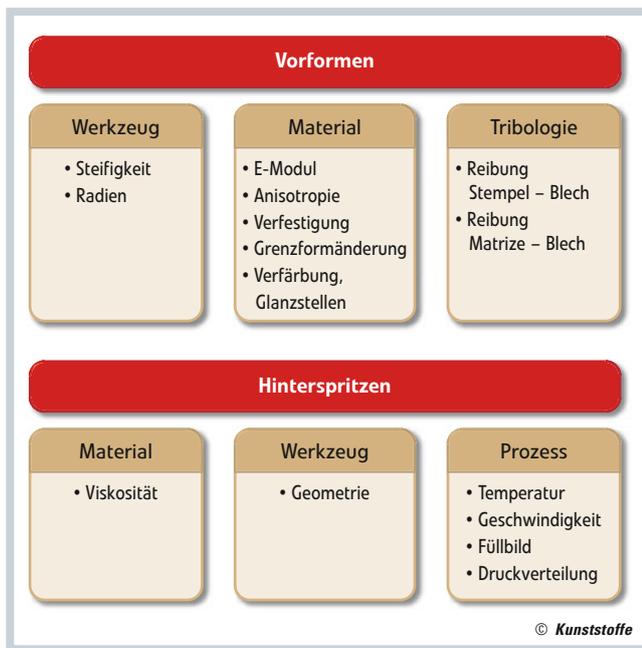


Bild 2. Einflussgrößen beim Hinterspritzen von Metallfolien

Reibwerte messen

Bei Tiefziehoperationen werden sehr große Kräfte auf die Metallfolie aufgebracht, um die Faltenbildung zu verhindern. Dies führt zu großen Flächenpressungen, die bei Standard-Reibwertmes-

te Kältegefühl beim Berühren, was auch als Cool-Touch-Effekt bezeichnet wird. Für dreidimensionale Bauteilgeometrien wird in einer mehrstufigen Prozesskette zunächst ein Zuschnitt aus der Metallfolie ausgestanzt und dieser anschließend in einem Tiefziehwerkzeug umgeformt. Im letzten Arbeitsgang wird dieser Vorformling dann mit Kunststoff im Spritzgießwerkzeug hinterspritzt. Wichtige Bewertungskriterien für die hergestellten Bauteile sind Faltenbildung, Rissbildung, Verfärbung und Abformung der Konturen. Die Qualität der Bauteile wird hierbei von einer Vielzahl an Einstell- und Prozessparametern der beiden Teilprozesse sowie von den Materialeigenschaften der dünnen Metallfolien und des hinterspritzten Kunststoffes beeinflusst. In **Bild 2** sind die Einflussgrößen für die Teilprozesse Umformen und Hinterspritzen zusammengestellt.

Teilprozesse auslegen und abstimmen

Das Auslegen und Abstimmen der Teilprozesse zur Erzielung qualitativ ausreichender Bauteile ist sehr komplex und er-

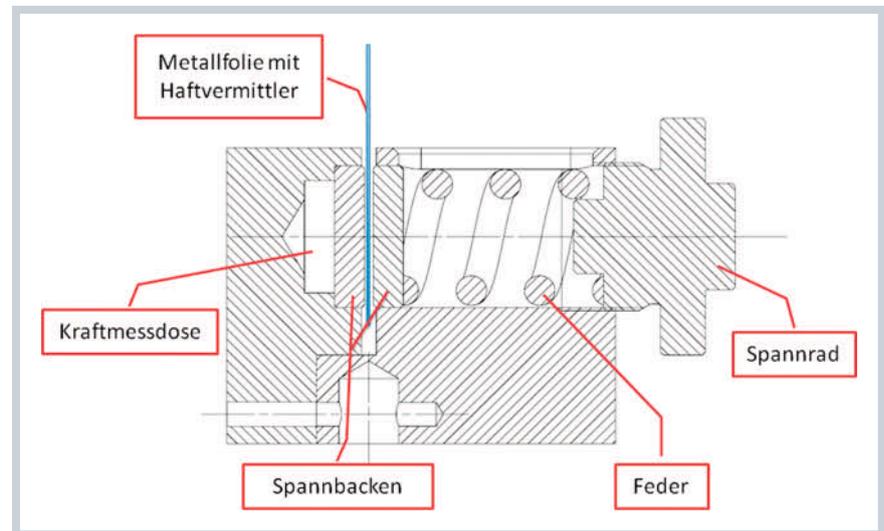


Bild 3. Reibwertmessgerät als Schnittdarstellung

mittler zur Verbindung der Metallfolie mit dem hinterspritzten Kunststoff für unterschiedliche Anwendungsfälle durchgeführt worden [10]. Es hat sich aber auch gezeigt, dass der Haftvermittler maßgeblich die tribologischen Verhältnisse zwischen Werkzeug und Metallfolie beim vorgelagerten Tiefziehprozess und damit die Qualität des Vorformlings

sungen nicht erreicht werden können. Daher wurde eigens ein Reibwertmessgerät entwickelt, das in **Bild 3** schematisch dargestellt ist. Der Probekörper wird zwischen zwei Spanbacken festgeklemmt und die aufgebrachte Kraft gleichzeitig mittels Kraftmessdose gemessen. Die Spannkraft kann stufenlos bis auf 8 kN eingestellt werden. Hierdurch lässt sich →

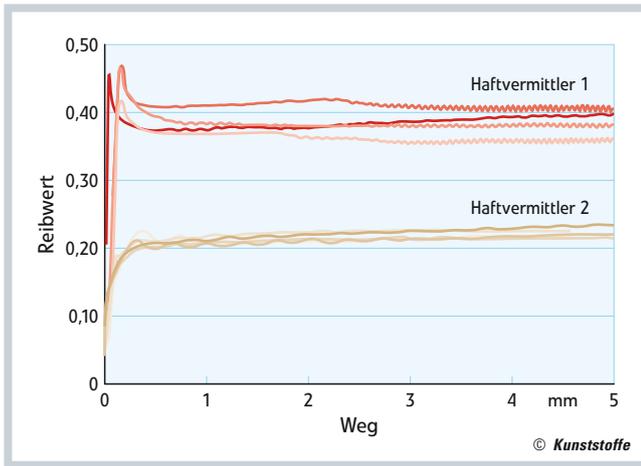


Bild 4. Reibwerte unterschiedlicher Haftvermittler gegen eine polierte Stahloberfläche

ebenfalls die maximal zulässige Flächenpressung vor der ersten Oberflächenbeschädigung ermitteln. Um die Reibwertmessung vorzunehmen, wird der Probekörper senkrecht zu den Spannbacken herausgezogen und gleichzeitig die Verschiebekraft gemessen. Das Verhältnis zwischen der benötigten Verschiebekraft und der Normalkraft beschreibt den Reibwert. Durch die einfache Austauschbarkeit der Spannbacken können verschiedene Werkstoffpaarungen gemessen und der Einfluss verschiedener Beschichtungen getestet werden, um die optimalen Verhältnisse für den Tiefziehprozess zu bestimmen. Beispielhaft wurden im Rahmen erster Untersuchungen zwei Haftvermittlersysteme miteinander verglichen. **Bild 4** zeigt deutliche Unterschiede bei den Reibwerten.

Die erzielten Messresultate lassen sich sehr gut mit dem Coulombschen Reibungsmodell annähern. Dieses wird durch zwei konstante Reibwerte für die Haft- und die Gleitreibung beschrieben

und ist geschwindigkeitsunabhängig, was auch bei den Messungen festgestellt wurde. Ziel weiterer Untersuchungen ist die Implementierung dieser Werte in die FE-Simulation, um dem Konstrukteur die Auslegung des Tiefziehprozesses von Metallfolien zu erleichtern. In einem ersten Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Weidmann Plastics Technology AG, Rapperswil/Schweiz, der Vorformprozess für das Praxisbauteil Ladekante berechnet (**Bild 5**). Die Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Lage der Falten am Auslauf der rippenförmigen Designelemente. Auch die Ausprägung der Falten, die durch unterschiedliche Rottöne im Berechnungsergebnis wiedergegeben wird, stimmt gut überein.

Beispiel Schwindungs- und Verzugsverhalten

Die Berechnung des Schwindungs- und Verzugsverhaltens von Spritzgießbautei-

len ist ein wichtiges Instrument zur Reduktion von Entwicklungskosten und -zeit, indem aufwendige Iterationsschleifen reduziert und verkürzt werden. Für die realistische Berechnung des auf komplexen Mechanismen beruhenden Verzugsverhaltens sind Werkstoffmodelle erforderlich, die den Randbedingungen beim Abkühlvorgang gerecht werden. Dabei steht der Einfluss der hohen Abkühlgeschwindigkeit auf das Relaxationsverhalten im Vordergrund.

Einfluss der Beanspruchung auf das mechanische Verhalten

Das mechanische Verhalten von Kunststoffen wird von vielen Faktoren beeinflusst. Die wichtigsten sind die Temperatur und die Belastungsgeschwindigkeit, die die Steifigkeit um mehrere Zehnerpotenzen beeinflussen können [11]. Weitere nicht zu vernachlässigende Einflussfaktoren sind die Umgebungsbedingungen Feuchte und Strahlung sowie die verschiedenen Belastungsformen (Belastungsart und -höhe). Zusätzlich zu diesen direkten Einflüssen wird das Verhalten des Kunststoffs in starkem Maße von seiner Belastungsgeschichte geprägt [12].

Diese Einflüsse machen eine analytische Beschreibung des mechanischen Verhaltens unmöglich und erfordern den Einsatz von mechanischen Ersatzmodellen [12]. Erst mithilfe von vielen parallel geschalteten Feder-Dämpfer-Elementen (verallgemeinertes Maxwell-Element) gelingt es zum Beispiel, das Spannungsverhalten über mehrere Temperaturzyklen hinweg in guter Übereinstimmung zum Experiment wiederzugeben. Dabei wird das total monotone Verhalten des Relaxationsmoduls durch eine endliche Summe von Exponentialfunktionen beschrieben. Der Einfluss von Temperatur und Spannung wird nach dem Prinzip der Zeit-Temperatur- und Zeit-Spannungsverschiebung entsprechend berücksichtigt [13].

Eine derartige Beschreibung des nichtlinear viskoelastischen Verhaltens beruht auf der Tatsache, dass Temperatur- und Spannungseinwirkungen die Fließvorgänge im Werkstoff beeinflussen und nicht die elastischen Eigenschaften [12]. Wird demnach eine Kunststoffprobe z. B. mit einer konstanten Auslenkung auf Biegung oder Torsion beansprucht und die Temperatur abgesenkt, dann hat die Temperaturabnahme keine Spannungszunahme zur

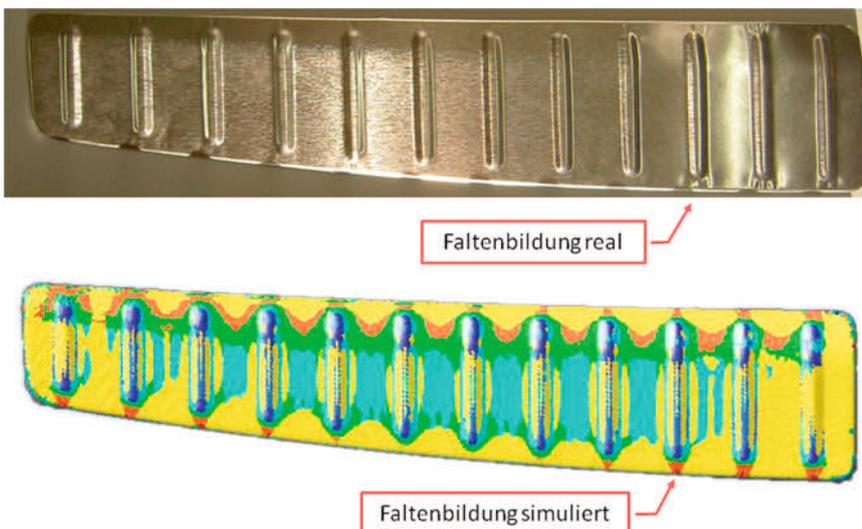


Bild 5. Vergleich der berechneten und realen Faltenbildung nach dem Vorformprozess (Bild: Weidmann Plastics Technology AG, Rapperswil/IWK)

Folge, sondern beeinflusst lediglich die Geschwindigkeit, unter der die Spannung relaxiert. Dieses Verhalten wurde bei Experimenten mit Abkühlgeschwindigkeiten von bis zu 2,5°C/min beobachtet [14].

Bei den Urformprozessen oder schockartigen Belastungen durch niedrig temperierte Medien liegen allerdings deutlich größere Abkühlgeschwindigkeiten mit mehreren 100°C/min vor, wonach die Frage der allgemeinen Gültigkeit der Fließvorgänge durch Temperatur und Zeit im Raum steht. Deren Beantwortung erfordert die Initiierung eines geeigneten Experiments.

Relaxationsverhalten bei hoher Abkühlrate ermitteln

Die Schwierigkeit bei der Ermittlung des Relaxationsverhaltens bei hohen Temperaturgradienten besteht darin, die Einflüsse der thermischen Längenänderungen von Messeinrichtung und Probekörper möglichst gering zu halten. Das gelingt mit einer Messeinrichtung, in der die Kunststoffprobe auf Torsion beansprucht wird (Bild 6). Dabei werden Probekörper und Messgerät auf eine bestimmte Temperatur gebracht und durch Eintauchen in ein niedrig temperiertes Wasserbad schockartig abgekühlt. Vor dem Eintauchen wird die Probe auf einen bestimmten Drehwinkel verdreht, der während des Abkühlvorgangs konstant gehalten wird. Als Messgröße zur Bestimmung des Relaxationsverhaltens wird das vom Probekörper übertragene Drehmoment erfasst.

Erste Messergebnisse zeigen, dass zu Beginn des Eintauchens eine leichte Zunahme des Drehmoments eintritt (Bild 7) und dass demnach nicht nur die Fließvorgänge, sondern auch die elastischen

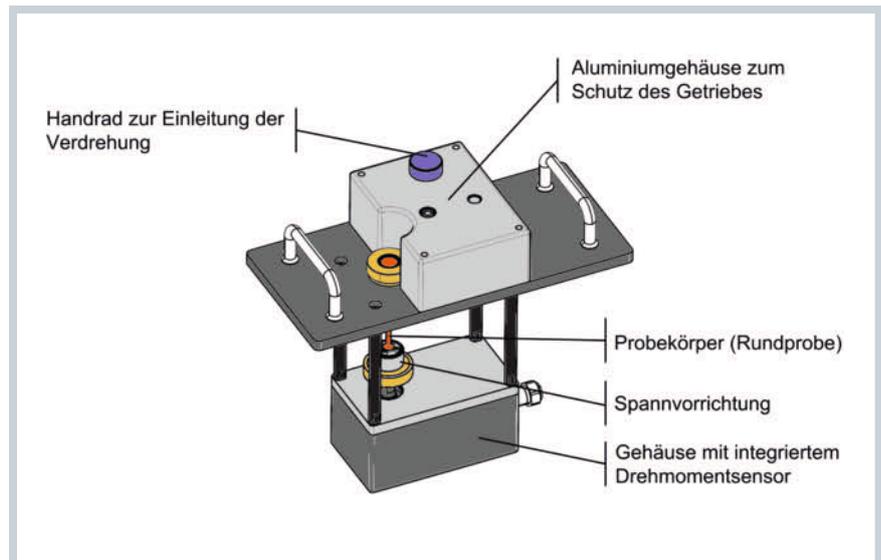


Bild 6. Messeinrichtung zur Ermittlung des Relaxationsverhaltens bei hohen Temperaturgradienten

Eigenschaften von der Temperatur abhängig sein können [15]. Diese interessante Feststellung soll durch weiterführende Untersuchungen an unterschiedlichem Probenmaterial untermauert und als Ergebnis ein Rechenmodell zur Beschreibung dieses Verhaltens ausgearbeitet werden.

Fazit

Der Transfer von der Wissenschaft zur Praxis ist keine Einbahnstraße. Im Gegenteil: Die Wissenschaft braucht die Impulse der Anwender für die Definition neuer anwendungsorientierter Forschungsziele. Damit stehen Wissenschaft und Praxis in einem fruchtbaren Spannungsfeld des gegenseitigen Gebens und Nehmens. Mit seinem erfolgreich praktizierten Motto „Forschung für die Praxis“ hat sich das Aachener Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) innerhalb der Kunststofftechnik als Vorbild mit großer Ausstrahlung erwiesen. ■

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Michaeli zum 65. Geburtstag und zur Emeritierung gewidmet.

DIE AUTOREN

PROF. DR.-ING. FRANK EHRIG, geb. 1967, studierte und promovierte am IKV der RWTH Aachen. Seit 2005 ist er an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil/Schweiz und leitet das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK); fehrig@hsr.ch

PROF. DIPL.-ING. JOHANNES KUNZ, geb. 1940, lehrte von 1974 bis 2005 an der HSR in den Fachgebieten Technische Mechanik und Kunststofftechnik, war 2005 Mitgründer des IWK und ist seit seinem Übertritt in den Ruhestand Institutspartner; jkunz@hsr.ch

DIPL.-ING. FH MARIO STUDER, MSc ETH ME, geb. 1980, studierte an der HSR und an der ETH Zürich. Seit 2005 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWK, dessen Fachbereich Bauteilauslegung/Werkstoffmechanik er seit Mitte 2010 leitet; mstuder@hsr.ch

LITERATUR

Die ausführliche Literaturliste kann kostenfrei abgerufen werden unter www.kunststoffe.de/A058

SUMMARY

AT THE INTERFACE BETWEEN SCIENCE AND APPLICATION

PARTS DEVELOPMENT. Engineering activities are only successful in the long term if they are oriented to practical needs. That applies particularly to plastics processing, where new findings have to be implemented as practical design recommendations.

Read the complete article in our magazine *Kunststoffe international* and on www.kunststoffe-international.com

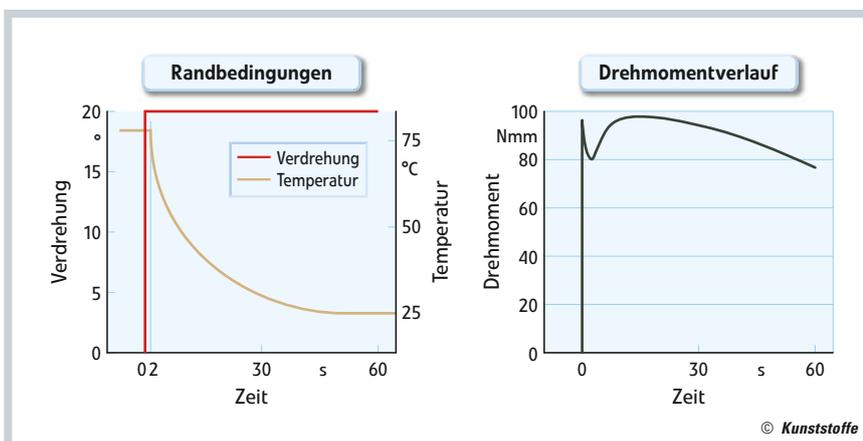


Bild 7. Zeitlicher Verlauf des Drehmoments beim Abkühlvorgang

IM SPANNUNGSFELD VON WISSENSCHAFT UND PRAXIS

VON FRANK EHRIG, JOHANNES KUNZ UND MARIO STUDER

Kunststoffe 7/2011, S. 58–61

- 1 N.N.: Zum Selbstverständnis der Kunststofftechnik. Präambel. Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kunststofftechnik WAK. www.wak-kunststofftechnik.de
- 2 Michaeli, W.: Kunststoffgerecht konstruieren. *Konstruktion* 53 (2001) 10, S. 3
- 3 Kunz, J.; Michaeli, W.; Herrlich, N.; Land, W. (Hrsg.): *Kunststoffpraxis: Konstruktion*. Weka Media, D-Kissing, Aktualisierungsstand April 2011
- 4 Kunz, J., Studer, M.: Wärmespannungen mit Ein-Punkt-Daten abschätzen. *Kunststoffe* 98 (2008) 8, S. 99–104
- 5 Kunz, J.; Studer, M.: Die Kerbwirkung bei der Anbindung von Schnapphaken. *Kunststoffe* 97 (2007) 7, S. 46–51
- 6 Michaeli, W.; Brinkmann, T.; Lessenich-Henkys, V.: *Kunststoffbauteile werkstoffgerecht konstruieren*. Carl Hanser Verlag, München 1995
- 7 Ehrig, F.; Wey, H.-R.: Folientechnik für metallische Oberflächen. *Kunststoffe* 97 (2007) 11, S. 72–74
- 8 Michaeli, W.; Mäsing, R.: Hochwertiges Cool-Touch-Dekor. Das Hinterspritzen edler Metalle mit integrierter Umformung wird am IKV erforscht. *Kunststoffberater* 54 (2009) 5, S. 27–28
- 9 Ehrig, F.; Wey, H.-R.: In der Simulation vereint. *Kunststoffe* 100 (2010) 3, S. 33–36
- 10 Ehrig, F.; Wey, H.-R.; Holzinger, M.; Studer, M.: Cool Touch, Dekorative Bauteile durch das Hinterspritzen von Metallfolien. *Spritzgießen 2007, Tagungsband 4283*, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. VDI-Verlag Düsseldorf 2007
- 11 Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*, 5. Auflage., Carl Hanser Verlag, München 2002
- 12 Lewen, B.: Das nichtlinear viskoelastische Verhalten von Kunststoffen am Beispiel der Zeit-Temperatur-Verschiebung und der Querkontraktionszahl. Diss. RWTH-Aachen, 1991
- 13 Michaeli, W.; Küsters, K.: Wärmespannungen berechnen. *Konstruktion* 62 (2010) 10, S. 11–12
- 14 Schöche, N.: *Wärmespannungen in Bauteilen aus Thermoplasten*. Diss. Universität-GH Essen, Shaker-Verlag, Aachen 1987
- 15 Strässle, C.: *Konzipierung einer Vorrichtung zur Ermittlung des Relaxationsverhaltens polymerer Werkstoffe bei hoher Abkühlrate*. Unveröffentlichte Projektarbeit am IWK Rapperswil, 2010. Betreuer: M. Studer