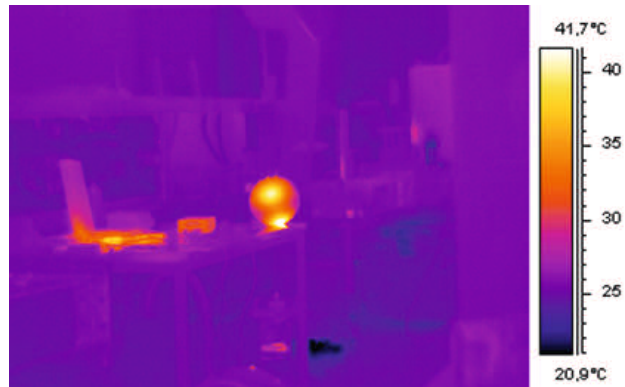


Mikrowelle unterstützt Tempern

Qualitätssicherung. Bei konventionellen Temperverfahren erfolgt die Aufheizung vom Rand zum Kern des Artikels über Wärmeleitung. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen kann dieser Vorgang bei großen Produktdurchmessern mehrere Tage in Anspruch nehmen. Die Mikrowellen-erwärmung ist unabhängig von den Wärmeleitungseigenschaften des Produkts, so dass der Kernbereich in deutlich kürzeren Zeiten aufgeheizt werden kann.



Thermokameraaufnahme in Falschfarbendarstellung zeigt Hotspots
(Bilder: Fraunhofer ICT)

**RUDOLF EMMERICH
SASCHA BAUMANN**

Tempern ist das definierte Erwärmen eines Materials bis unterhalb des Kristallitschmelzbereichs und anschließendes definiertes Abkühlen. Der Temperprozess dient der Materialveredelung und findet in der Kunststoffindustrie breite Anwendung wie z. B. der Extrusion von Halbzeugen, dem Spritzguss und als Zwischenschritt nach dem groben mechanischen Zerspanen von Halbzeugen.

Häufig dient der Temperprozess dem Abbau von Eigenspannungen. Diese Spannungen werden beispielsweise durch das Herstellungsverfahren oder anschließende mechanische Bearbeitung ins Material eingebracht. Durch den Abbau der Eigenspannungen wird die Maßhaltigkeit des späteren Produkts verbessert. Nach Herstellerangaben können die Eigenspannungen bei sehr großen Halbzeugen, in besagtem Beispiel Vollstäbe mit 500 mm Durchmesser, sogar zum Zerbersten des Halbzeuges führen. Weiterhin kann durch den Temperprozess bei teilkristallinen Thermoplasten durch Nachkristallisation die Oberflächenhärte, Verschleißfestigkeit und Steifigkeit verbessert werden.

Nach dem Stand der Technik werden die Halbzeuge in Öfen mittels Warmluft

oder mittels Paraffin- und Siliconölen auf die notwendige Temperatur erhitzt und anschließend definiert auf Raumtemperatur abgekühlt. Dieser Prozess ist durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen sehr zeitintensiv. Abhängig vom Durchmesser der zu tempernden



Bild 1. Untersuchte Halbzeuge aus den Materialien Polyamid und Polyoxymethylen

Proben kann dieses Verfahren mehrere Tage andauern.

Bei den konventionellen Temperverfahren erfolgt die Aufheizung vom Rand zum Kern über die Wärmeleitung. Mikrowellen bieten im Gegensatz dazu die Möglichkeit, das Produkt volumetrisch zu erwärmen. Dadurch wird die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe umgangen.

Der Frequenzbereich von Mikrowellen liegt zwischen 300 MHz und 300 GHz und die bekanntesten Anwendungsgebiete sind der Mikrowellenherd, die Radartechnik und die Mobilfunktechnik. Aus wirtschaftlichen Gründen werden in industriellen Anwendungen hauptsächlich die Frequenzen 2,45 GHz und 915 MHz verwendet.

Mikrowellen wechselwirken mit polaren Molekülen wie beispielsweise Wasser oder technischen Kunststoffen wie Polyamid (PA) und Polyoxymethylen (POM). Durch die wechselnde Ausrichtung der Moleküle im Mikrowellenfeld wird dieser Energie entzogen und in Wärme umgesetzt. Dieses Prinzip nutzt die Haushaltsmikrowelle. Unpolare Moleküle wie beispielsweise Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE) absorbieren keine Energie aus dem Mikrowellenfeld. Um solche Materialien absorptionsfähig zu machen, müssen Zusatzstoffe eingebracht werden.

Wie aus eigener Erfahrung mit der Haushaltsmikrowelle bekannt sein dürfte, →

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU111123

neigen Mikrowellenprozesse oftmals zu einer Hotspotbildung im Material. Dieser Effekt bedeutet, dass eine warme Stelle im Produkt immer mehr Energie aus dem Mikrowellenfeld absorbiert und somit immer schneller erwärmt wird als das umgebende Material. Analog zum Dreheller in der Haushaltemikrowelle müssen somit geeignete Maßnahmen gefunden werden, um im industriellen Maßstab eine stabile Prozessführung, d.h. homogene Erwärmung zu gewährleisten.

Mikrowelle und Warmluft im Vergleich

Im Rahmen einer Studie wurde in Zusammenarbeit mit der BASF SE die Mikrowellentemperatur von technischen Kunststoffen untersucht. Die Studie besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil untersucht die Mikrowellentemperatur bei einer Frequenz von 2,45 GHz, der zweite Teil bei einer Frequenz von 915 MHz.

Im ersten Teil dieser Studie wurde der direkte Vergleich zwischen konventioneller Temperung mittels Warmluft und Temperung mittels Mikrowellen bei einer Frequenz von 2,45 GHz durchgeführt. Untersucht wurden extrudierte Halbzeuge (**Bild 1**) aus den Materialien Polyamid und Polyoxymethylen in Durchmessern von 60 bis 160 mm. Bewertungskriterien für den Vergleich der beiden Tempervarianten waren der mit einer Temperung verbundene Eigenspannungsabbau sowie die benötigte Temperzeit. Dazu wurden die Temperaturverläufe in den untersuchten Proben während des Aufheiz- und Abkühlvorgangs aufgenommen und die nach Abschluss der Temperung im Material enthaltenen Eigenspannungen ermittelt. Dieses Vorgehen wurde sowohl für die konventionelle Temperung als auch für die Temperung mittels Mikrowellen bei 2,45 GHz durchgeführt.

Die Temperung mittels Warmluft wurde in einem Klimaschrank durchgeführt. Für die Mikrowellentemperung wurde ein Demonstrator entwickelt und aufgebaut. Die Auslegung des Mikrowellentemperofens bei 2,45 GHz erfolgte mittels FEM-Simulationen. Unter anderem wurde beispielsweise der Einfluss von diversen Antennenarten und Maßnahmen zur Feldhomogenisierung auf die resultierende Erwärmung im Produkt simuliert. Aufbauend auf den Simulationsdaten ist es gelungen, eine Hotspotbildung im Material zu vermeiden und somit eine stabile Prozessführung zu gewährleisten.

Zur Aufnahme der Temperaturverläufe in den Proben wurden faseroptische

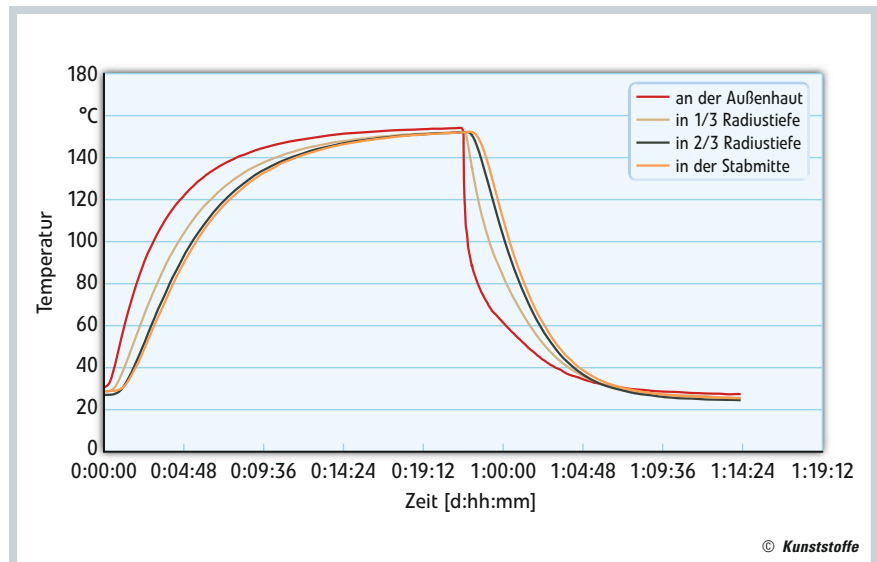


Bild 2. Temperaturverläufe für die konventionelle Temperung von PA (D = 130 mm)

Sensoren verwendet. Diese ermöglichen, sowohl im konventionellen Tempverfahren als auch im Mikrowellenfeld, Temperaturmessungen durchzuführen. Die Sensoren wurden auf der Außenhaut der Probe (Temp1), in einer Tiefe von 1/3 des Radius (Temp2), in 2/3 des Radius (Temp3) und in der Stabmitte (Temp4) angebracht.

In **Bild 2** sind die Temperaturen über der Versuchszeit für die konventionelle Temperung von PA mit einem Durchmesser von 130 mm aufgetragen. Die Solltemperatur betrug 150°C. Die Temperaturen nähern sich asymptotisch der Solltemperatur an. In der Aufheizphase bedeutet dies, dass ca. 1/3 der Aufheizzeit für die letzten 10°C benötigt wird. Nach ca. 17 Stunden wurde in der Stabmitte die Solltemperatur erreicht.

In **Bild 3** sind die Temperaturen über der Versuchszeit für die Mikrowellentemperung bei gleichem Material, Durchmesser und Solltemperatur aufgetragen. Im Gegensatz zur konventionellen Temperung ist gut zu erkennen, dass die Temperatur im Stabinnern den anderen Temperaturen deutlich vorseilt. Die Solltemperatur wurde im Stabinnern bereits nach ca. einer Stunde erreicht. Weiterhin ist zu bemerken, dass keine asymptotische Annäherung an die Solltemperatur vor-

liegt. Die Erwärmungsrate nimmt beim Annähern an die Solltemperatur im Gegensatz zur konventionellen Temperung sogar zu.

Die Mikrowellentemperatur wurde von Raumtemperatur d.h. einem nicht vorgeheizten Ofen aus gestartet. Die Temperaturen zum Rand hin liegen immer deutlicher unter der Solltemperatur, da die Wärmeverluste an die Umgebung eine gleichmäßige Erwärmung ausschließen. Eine Mikrowellentemperung ohne einen vorgeheizten Temperofen würde somit kaum Zeitersparnis bewirken, da sich nun die Randbereiche der Proben asymptotisch der Solltemperatur annähern.

Frequenzen im Vergleich

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass eine Mikrowellentemperung ohne vorgeheizten Ofen bei 2,45 GHz keinen Vorteil gegenüber der konventionellen Temperung bietet. In einem Kombinationsverfahren aus konventionellem Heizen und Mikrowellenheizen wird die Aufheizzeit jedoch deutlich verringert.

Die Ermittlung der im Material enthaltenen Eigenspannungen wurde mit einer Methode ähnlich dem Verfahren nach Davidenkov [1] durchgeführt. Dazu wurden aus den Halbzeugen Ringe definierter Geometrie ausgearbeitet. Durch Schlitzen der Ringe und anschließende künstliche Alterung werden Aufklaffungen an diesen beobachtet. Diese Aufklaffungen sind ein Maß für die im Material enthaltenen Eigenspannungen.

An den Stellen an denen die Mikrowellentemperung vergleichbare Temperaturen wie die konventionelle Temperung er-

i Kontakt

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
 Produktbereich Polymer Engineering
 D-76327 Pfinztal
 → www.ict.fraunhofer.de

reichte, war auch der Spannungsabbau vergleichbar.

Der zweite Teil der Studie untersuchte das Erwärmungsverhalten der Halbzeuge bei einer Frequenz von 915 MHz. Die Versuche wurden direkt in der Mikrowellenkavität und ohne zusätzliche Maßnahmen zur Feldhomogenisierung durchgeführt. Die Temperaturmessungen erfolgten analog zum ersten Teil der Arbeit. Zusätzlich wurden nach Abschluss der Temperung und Entnahme der Proben aus der Mikrowellenkavität Thermokamerabilder aufgenommen.

Im Vergleich zu Mikrowellenstrahlung bei einer Frequenz von 2,45 GHz besitzt die Mikrowellenstrahlung bei 915 MHz eine um ca. Faktor 3 größere Wellenlänge.

Bild 4 zeigt eine Thermokameraaufnahme in Falschfarbendarstellung. Die homogene Temperaturverteilung ist gut ersichtlich. Die Probe bestand aus POM und hatte einen Durchmesser von

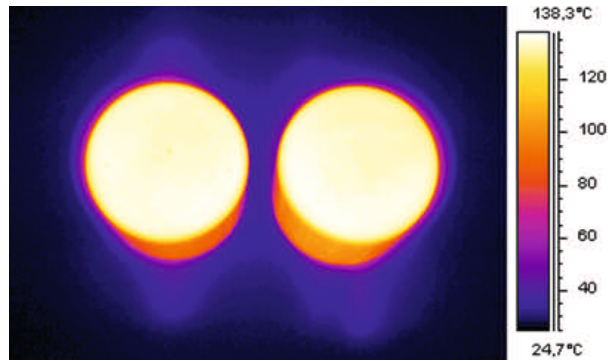


Bild 4. Thermokameraaufnahme in Falschfarbendarstellung zeigt die homogene Temperaturverteilung

anzunehmen, dass bei großen Probendurchmessern ebenfalls ein Kombinationsprozess aus konventioneller Heizung und Mikrowellenheizung benötigt wird.

Fazit

In diesem Projekt wurde eine stabile Prozessführung bei der Mikrowellentemperatur entwickelt. Die Untersuchungen der Eigenspannungen zeigten, dass beim kon-

Die Mikrowellentemperatur bei 915 MHz bestätigte für Proben mit einem Durchmesser kleiner der halben Wellenlänge, dass auf ein Kombinationsverfahren verzichtet werden kann. Für Proben größer der halben Wellenlänge wird ebenfalls ein Kombinationsverfahren empfohlen. Die benötigte Zeit für die Erwärmung der Proben kann mithilfe der Mikrowellenerwärmung deutlich reduziert werden. Im Falle der „reinen“ Mikrowellentemperatur bei einer Frequenz von 915 MHz wurde die Aufheizzeit einer Probe aus POM mit einem Durchmesser 70 mm von ca. 7 Stunden auf ca. 8 Minuten reduziert. ■

DANK

Unser Dank gilt der BASF SE und Muegge Electronic GmbH für ihre Unterstützung.

LITERATUR

- 1 Dr. sc. Techn. Horst-Dieter Tietz, Grundlagen der Eigenspannungen, Springer-Verlag Wien-New York, 1982

DIE AUTOREN

DR. PHYS. RUDOLF EMMERICH, geb. 1964, ist seit 1994 als Leiter der Fachgruppe Mikrowellen und Plasma für das Fraunhofer ICT, Pfinztal, tätig.

DIPL.-ING. (FH) SASCHA BAUMANN, geb. 1977, ist seit 2001 als Mitarbeiter der Fachgruppe Mikrowellen und Plasma für das Fraunhofer ICT, Pfinztal, tätig.

SUMMARY

MICROWAVES SUPPORT ANNEALING

QUALITY ASSURANCE. In conventional annealing methods, heating proceeds from the surface to the core of the article by means of heat conduction. Due to the poor thermal conductivity of polymers, this process can take several days where product diameters are large. Microwave heating is independent of the heat conduction properties of the product, and so the core region can be heated in a much shorter time.

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

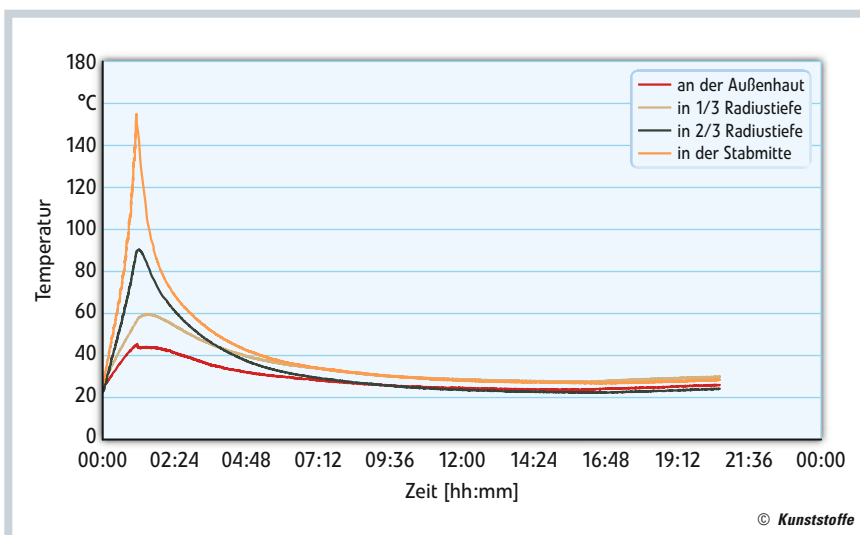


Bild 3. Temperaturverläufe für die Mikrowellentemperatur von PA (D = 130 mm) bei 2,45 GHz

70 mm. Bei diesem Versuch ist es gelungen, die Probe in ca. 8 min homogen auf eine Solltemperatur von 150°C zu erwärmen.

Das **Titelbild** zeigt eine PA-Probe mit einem Durchmesser von 180 mm. Es ist gut ersichtlich, dass sich bei diesem Versuch zwei Hotspots in der Probe ausbildeten.

Die bei einer Frequenz von 915 MHz durchgeführten Versuche zeigen, dass für Proben mit einem kleineren Durchmesser als der halben Wellenlänge eine homogene Mikrowellentemperatur ohne zusätzliche konventionelle Heizung und Maßnahmen zur Feldhomogenisierung machbar ist. Proben die Durchmesser größer als die halbe Wellenlänge aufweisen zeigen Hotspotbildung. Es ist somit

ventionellen wie auch beim Mikrowellenverfahren der Spannungsabbau vergleichbar ist.

Die Untersuchungen der Temperaturverteilung in den Halbzeugen belegten, dass bei einer Mikrowellentemperatur bei 2,45 GHz ohne vorgeheizten Temperofen die Problematik des asymptotischen Annäherns an die Solltemperatur im Vergleich zur konventionellen Temperung lediglich umgekehrt wird. Statt die Probe vom Rand her zum Kern hin zu erwärmen, wird die Probe vom Kern zum Rand hin erwärmt. Somit ist für die Mikrowellentemperatur bei 2,45 GHz ein Kombinationsprozess zu empfehlen, um eine Reduktion der Temperzeit zu erreichen.