

# Durch Kapseln wird aus flüssig fest

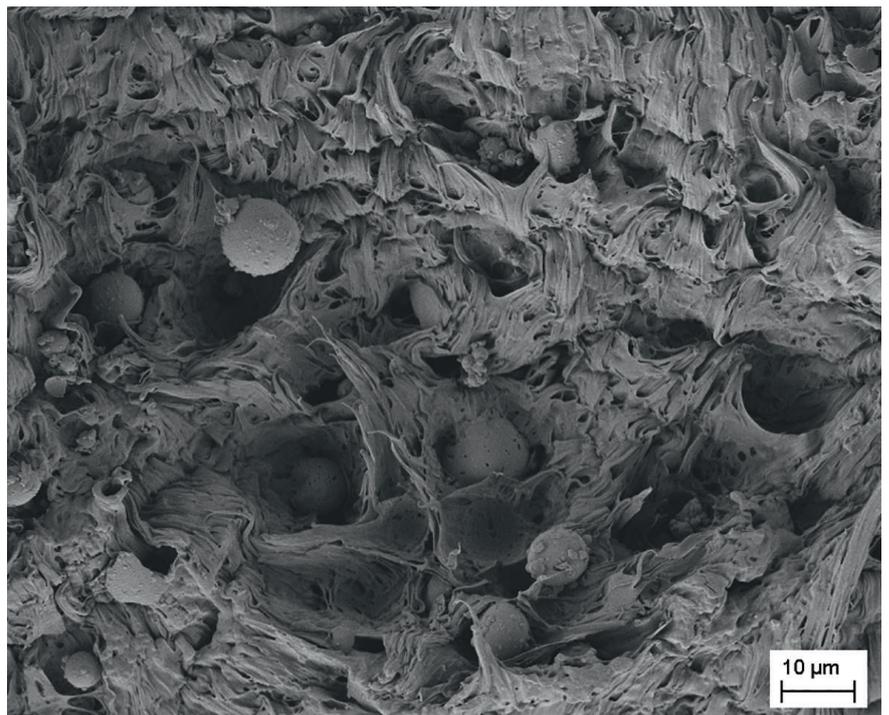
## Teil 2: Flüssige Schmierstoffe in Kunststoffbauteile integrieren

Durch Mikroverkapselung können Flüssigschmiermittel in Pseudo-Feststoffe umgewandelt werden. Die damit pulverartigen Additive lassen sich gut handhaben und die enthaltenen Schmiermittel wirken im Bedarfsfall zielgenau an der beanspruchten Stelle. Wie stark sich die Reibung bei Bauteilen mit diesen Mikrokapseln reduzieren lässt, hängt allerdings sehr vom verwendeten Matrix-Polymer und dem Material der Kapselwände ab.

**D**ie Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind essenzielle Themen des aktuellen Zeitalters. Einer Studie der Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT), Jülich, zufolge machen Reibungsverluste einen Anteil von 23 % am globalen Primärenergieverbrauch aus [1]. In diesem Bereich bestehen somit aussichtsreiche Möglichkeiten zur Energieeinsparung, mit einem realistischen Minderungspotenzial laut der Studie von 8,6 %. Eine Reibungsminderung trägt zu einem geringeren Energieverbrauch und damit zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

Aus Leichtbauaspekten und aufgrund der deutlich einfacheren Verarbeitbarkeit werden mittlerweile Komponenten tribologischer Systeme zunehmend aus Kunststoffen anstelle von Metallen gefertigt [2]. Die geringere Festigkeit dieser Werkstoffe erfordert allerdings ein besonderes Bewusstsein für Reibungsminderung und Verschleißschutz, um Schadensfälle zu verhindern, die Lebensdauer der Bauteile zu verlängern und damit Ressourcen und Kosten zu sparen. Der Einsatz von effizienten Schmiermitteln ist dafür von entscheidender Bedeutung.

Die Ausstattung von Kunststoffbauteilen mit reibungsmindernden Additiven beschränkt sich gegenwärtig vorwiegend auf Trockenschmiermittel. Bedingt durch die relativ geringe Auswahl an solchen Schmiermitteln ist jedoch die Einstellung optimaler Schmierstoff-Kunststoff-Paarungen stark eingeschränkt. Flüssige Schmiermittel bieten neben der größeren stofflichen Vielfalt den Vorteil der besseren Verteilung und Anpassung an die tribologische Belastung. Sie müssen je-



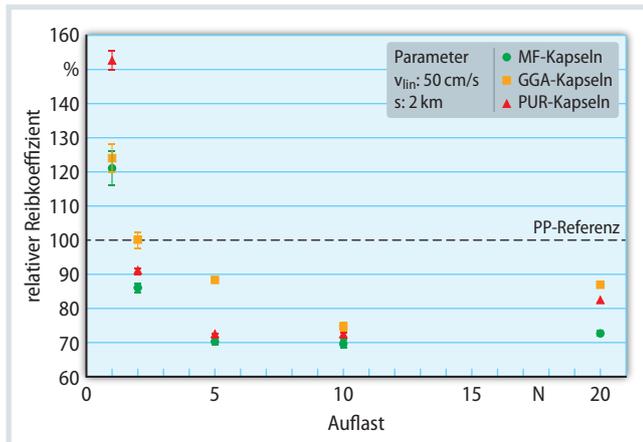
REM-Aufnahme einer PP-Matrix: Die mit Schmierstoff gefüllten Mikrokapseln lassen sich zerstörungsfrei in Polymere einarbeiten und reduzieren bei Bauteilen die Reibung und den Verschleiß

© SKZ

doch häufig durch aufwendige externe Vorrichtungen auf das Bauteil aufgetragen werden.

Am SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg, wurde daher in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP), Potsdam, ein Schmierstoffkonzept entwickelt, das die Vorteile der Trocken- und Flüssigschmiermittel miteinander vereint. Die Grundidee besteht darin, Flüssigschmiermittel durch Mikroverkapselung in Pseudo-Feststoffe umzuwandeln, die sich entsprechend gut in Kunststoffe einarbeiten

lassen. Beim Reibkontakt kommt es zur mechanischen Freisetzung des flüssigen Schmierstoffes und damit zur bedarfsgerechten und zielgenauen Selbstschmierung der beanspruchten Kunststoffoberflächen. Für die Untersuchungen wurden am Fraunhofer IAP sowohl Mikrokapseln mit Kapselwänden aus Melaminharz (MF), als auch einem Gemisch aus Gelatine und Gummi Arabicum (GGA) und ebenfalls aus Polyurethan (PUR) hergestellt. Ausführlich vorgestellt wurden die entsprechende Technik der Mikroverkapselung und die verschiedenen genutzten Verfah-



**Bild 1.** Reibkoeffizient ausgewählter PP-basierter Proben gefüllt mit unterschiedlichen Kapseltypen relativ zur PP-Referenz bei Variation der Auflast

Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser

## Die Autoren

**Rebecca Schoch, M.Sc.**, ist seit 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Gruppe Materialentwicklung des SKZ; r.schoch@skz.de

**Dr. Marieluise Lang** leitet seit 2015 die Abteilung Materialien, Compoundieren und Extrudieren des SKZ; m.lang@skz.de

**Michael Heilig, M.Sc.**, arbeitet seit 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe Fügen und Oberflächentechnik des SKZ; m.heilig@skz.de

**Dr. Thomas Hochrein** forscht seit 2007 am SKZ und ist seit 2017 dessen Geschäftsführer; t.hochrein@skz.de

**Dipl.-Ing. Monika Jobmann** leitet seit 2010 die Abteilung Mikroverkapselung und Polysaccharidchemie am Fraunhofer IAP; monika.jobmann@iap.fraunhofer.de

**Dr. Alexandra Latnikova** ist seit 2012 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer IAP in der Abteilung Mikroverkapselung und Polysaccharidchemie tätig; alexandra.latnikova@iap.fraunhofer.de

## Hinweis

Die Technik hinter der Mikroverkapselung und die verwendeten Verfahren wurden ausführlich im ersten Teil des Artikels vorgestellt. Er ist in Ausgabe 5/2020 (S. 62–65) von *Kunststoffe* erschienen.

## Dank

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des AiF-Projektes IGF 19921 BG als gemeinschaftliches Projekt des Fraunhofer IAP und des SKZ erarbeitet. Das Vorhaben wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich bei den Projektbegleitern für die Unterstützung im Projekt sowie die Bereitstellung von Schmierstoff- und Polymermustern.

## Service

### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2020-09](http://www.kunststoffe.de/2020-09)

ren im ersten Teil des Fachartikels (erschienen in *Kunststoffe* 5/2020, S. 62–65).

Auf Basis erster Untersuchungen zur Kompatibilität zwischen Kapselwandmaterial und den Matrixpolymeren Polypropylen (PP) bzw. Polyoxymethylen (POM) im Labormaßstab wurden die Rezepturen für die Compoundierversuche im Technikummaßstab festgelegt. **Tabelle 1** zeigt eine Übersicht der entsprechenden Rezepturzusammensetzungen für die Mikro-kapsel-Kunststoff-Compounds. Der gravimetrische Anteil an Mikro-kapseln wurde so gewählt, dass alle Proben jeweils einen zehnpromzentigen Schmierstoffanteil beinhalteten.

### Selbstschmierende Kunststoffbauteile

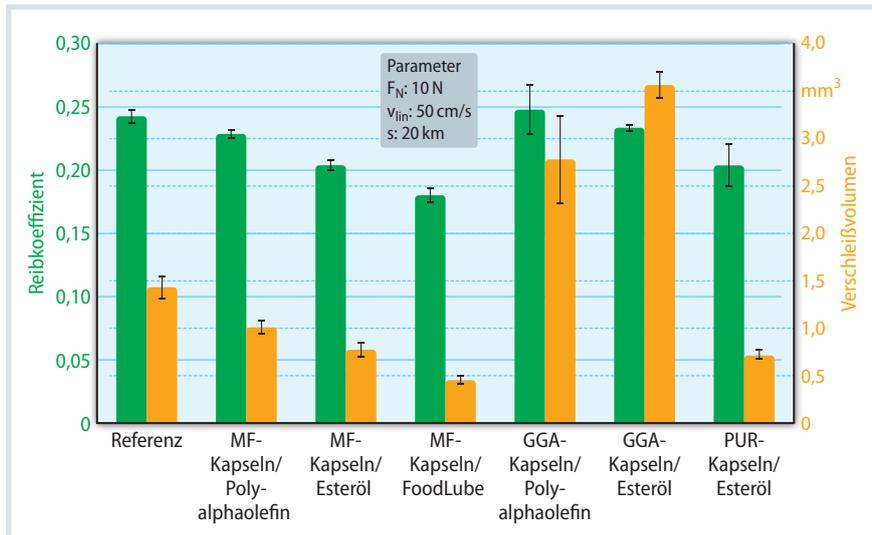
Die Einarbeitung der Mikro-kapseln in die Matrixpolymere PP und POM erfolgte an einem gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextruder des Typs ZSK 26 Mcc des Herstellers Coperion GmbH, Stuttgart. Aufgrund ihrer geringen Schüttdichte wurden die Mikro-kapseln über eine Seitenbeschickung mit Feed Enhancement Technology (FET) zudosiert. Die Granulierung erfolgte mittels Kaltabschlag. Die Herausforderung im Compoundierprozess lag insbesondere darin, die Schneckenkonfiguration und Maschinenparameter so einzustellen, dass eine Zerstörung der Mikro-kapseln durch die im Extruder eingebrachte Scherung verhindert und trotzdem eine gleichmäßige Verteilung der Kapseln in der Polymermatrix sichergestellt werden konnte.

Alle Compounds ließen sich erfolgreich produzieren. Lediglich bei der Herstellung der POM-Mikro-kapsel-Compounds kam es zu einem geringfügigen Ölaustritt. Um das ausgetretene Öl zu absorbieren

und im anschließenden Spritzgießverfahren eine verbesserte Prozessführung zu gewährleisten, wurden dem Granulat zusätzlich 2 Gew.-% Talkum händisch zugemischt. Nach der Weiterverarbeitung im Spritzgießverfahren wurden die Prüfkörper anschließend mittels Rasterelektronenmikroskop (REM; Typ: Supra 40VP der Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena) analysiert. Eine intakte und gleichmäßige Einarbeitung der Mikro-kapseln konnte bei allen untersuchten Proben bestätigt werden (**Titelbild**).

Für die Analyse des tribologischen Verhaltens wurden typische Materialpaarungen ausgewählt, bestehend aus jeweils einem Mikro-kapsel-Kunststoff-Verbund und 100Cr6-Stahl. Die Charakterisierungen fanden praxisnah an einem Tribo-meter des Unternehmens CSM Instruments, Peseux/Schweiz, mit einer Kugelscheibe-Anordnung statt. Dabei wurden Zugstabschultern der Mikro-kapsel-Kunststoff-Proben jeweils als rotierende Scheibe mit einer Dicke von 4 mm und einem Laufdurchmesser von 8 mm und eine feststehende Stahlkugel mit einem Durchmesser von 6 mm als Gegenkörper verwendet. Die Prüfungen erfolgten unter Variation der Geschwindigkeit im Bereich von 5 bis 100 cm·s<sup>-1</sup> und einer Auflast im Bereich von 1 bis 20 N. Die Analyse der Reibkoeffizientenverläufe wurde jeweils in Dreifachbestimmung durchgeführt.

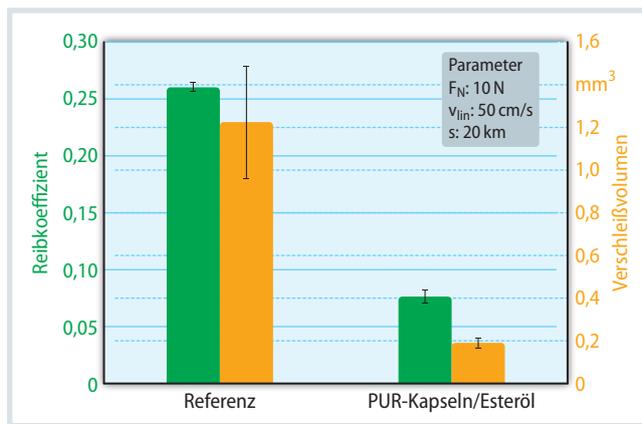
Die Auflastvariation an ausgewählten PP-Proben mit jeweils unterschiedlichem Kapselwandtyp verdeutlicht, dass eine Verringerung des relativen Reibkoeffizienten gegenüber der PP-Referenz erst ab einer Auflast von ca. 2 N eintritt (**Bild 1**). Bei zu geringer Flächenpressung werden die Mikro-kapseln nicht zerstört und »



**Bild 2.** Mittlere Reibkoeffizienten und Verschleißvolumina der PP-basierten Proben nach tribologischer Langzeitbeanspruchung über eine Strecke von 20 km Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser

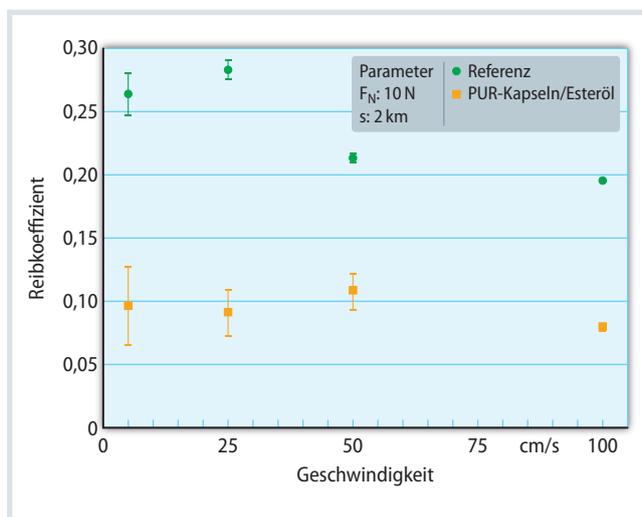
**Bild 3.** Mittlere Reibkoeffizienten und Verschleißvolumina der POM-basierten Proben nach tribologischer Langzeitbeanspruchung über eine Strecke von 20 km

Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Vergleich des Reibkoeffizienten der mit Mikro kapseln gefüllten und der ungefüllten POM-Proben bei Variation der Geschwindigkeit

Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser



das Schmiermittel folglich nicht freigesetzt. Das entwickelte Schmierstoffkonzept setzt demnach eine gewisse Mindestauflast voraus. Langzeituntersuchungen mit einer Auflast von 10 N und einer Geschwindigkeit von  $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , bei denen eine Reibstrecke von 20 km abgefahren wurde, zeigen deutlich, dass sich insbe-

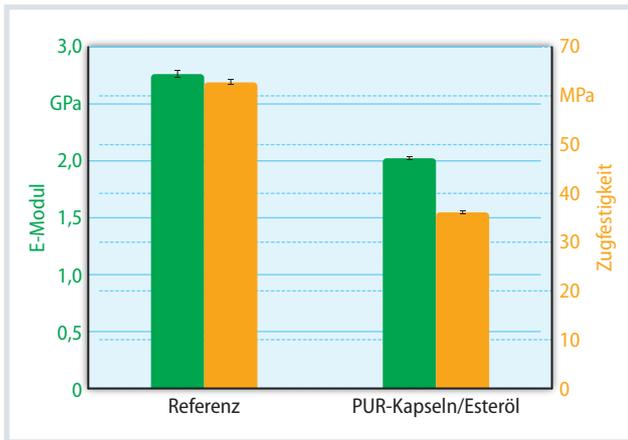
sondere durch den Einsatz von MF- und PUR-Kapseln der Reibkoeffizient sowie das Verschleißvolumen signifikant gegenüber der ungefüllten PP-Referenz reduzieren lassen (**Bild 2**). Die deutlichsten selbstschmierenden Effekte ergaben sich bei Probe 203. Sie besteht aus einer PP-Matrix und mit dem Schmiermittel Food-

Lube gefüllten MF-Kapseln und erreicht eine Reibreduktion um 25 % und eine Verschleißreduktion um 68 %. Der Einsatz von GGA-Kapseln in einer PP-Matrix bewirkt dagegen keine Verringerung des Reibkoeffizienten. Aufgrund des auftretenden Stick-Slip-Effektes ist das Verschleißvolumen bei diesen Proben (204 und 205) sogar stark erhöht.

Besonders deutlich wird die selbstschmierende Wirkung des neuen Schmierstoffkonzepts bei Langzeitmessungen (Auflast: 10 N, Geschwindigkeit:  $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) an POM-basierten Proben (**Bild 3**). Gegenüber der POM-Referenz ist der Reibkoeffizient von Probe 207 bestehend aus einer POM-Matrix und mit dem Syntheseester FM01 und 2 Gew.-% Talkum gefüllten PUR-Kapseln um 70 % reduziert. Das Verschleißvolumen konnte sogar um 85 % gesenkt werden. Ein konstant leicht abfallender Reibkoeffizientenverlauf verdeutlicht zudem, dass während des gesamten Testlaufs stets eine ausreichende Menge an Schmiermittel bereitstand. Die Variation der Geschwindigkeit im Bereich von 5 bis  $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  zeigt, dass der Reibkoeffizient von Probe 207 unter den gewählten Bedingungen im gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich konstant bei ungefähr 0,10 liegt (**Bild 4**). Das Konzept der schmierstoffgefüllten Mikro kapseln ist für POM somit insbesondere bei niedrigen Reibgeschwindigkeiten, bei denen der Selbstschmierungseffekt von POM noch nicht zum Tragen kommt, sehr effektiv.

### Reibkoeffizient um 70 % reduzieren

Der Einfluss der eingearbeiteten Mikro kapseln auf die mechanischen Kennwerte der Mikro kapsel-Kunststoff-Verbunde wurde mittels Zugprüfung nach der Norm DIN EN ISO 527 analysiert. Für die Untersuchungen kam eine Universal-Prüfmaschine des Typs Z010 der ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, mit einer Kraftmessdose mit 10 kN zum Einsatz. Unabhängig vom Kapselwandmaterial konnte bei allen Proben auf Basis von PP und POM eine Verringerung der E-Modul- und Zugfestigkeitswerte festgestellt werden (**Bild 5**). Die reduzierten Werte sowie mikroskopische Untersuchungen der Bruchflächen lassen darauf schließen, dass keine ausreichende Anbindung zwischen den Kapselwandmaterialien und dem jeweiligen Matrixpolymer besteht. Durch eine



**Bild 5.** Die mit Mikro kapseln gefüllte POM-Probe zeigt gegenüber der POM-Referenz reduzierte E-Modul- und Zugfestigkeitswerte Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser

gezielte Modifizierung der Anbindung zwischen Kapsel und Matrix kann diesem Effekt eventuell entgegengewirkt werden. Auf die Bruchdehnung der Proben hatten die eingearbeiteten Mikro kapseln keinen signifikanten Einfluss. Einzig bei den PP-Proben mit GGA-Kapseln (Probekörper 204 und 205) wurde eine deutlich geringere Bruchdehnung gegenüber der PP-Referenz gemessen. Grund dafür sind die im Vergleich zu den anderen Kapseltypen sehr großen GGA-Kapseln.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass durch die passende Wahl an Kapselwandmaterial und Schmierstoff eine große Reduktion von Reibung und Verschleiß erzielt werden kann. Im Hinblick auf die mechanischen Kennwerte der selbstschmierenden Verbundwerkstoffe sind allerdings noch Verbesserungen bei der Kapselanbindung an die Polymermatrix notwendig. Das Fraunhofer IAP und das SKZ planen dafür eine weitere Zusammenarbeit. Sie soll den Einsatz des Schmier-

stoffkonzepts in der Praxis sicherstellen. Unternehmen, die Interesse an den weiteren Forschungsaktivitäten haben, können diese im projektbegleitenden Ausschuss unterstützen.

**Passendes Material, geringere Reibung**

Durch die umfangreichen Forschungsarbeiten steht ein neues Schmierungs system zur Verfügung, das einen lang lebigeren, energiesparenderen und wartungsärmeren Gebrauch von Kunststoffbauteilen ermöglicht. Aufbauend auf den Erkenntnissen können nun selbstschmierende Verbundwerkstoffe hergestellt werden, die explizit auf die jeweilige Anwendung und Materialpaarung abgestimmt sind. Dadurch ergeben sich tribologisch deutlich verbesserte Kunststoffe, die gegenwärtige kostenintensive externe Schmier systeme ersetzen und völlig neue Anwendungsfelder erschließen können. ■

| Probenbezeichnung | Polymermatrix | Kapselwand | Kapselkern  | Kapselanteil in Gew.-% |
|-------------------|---------------|------------|---|------------------------|
| 201               | PP            | MF         | Polyalphaolefin (Grundöl mit löslichen Additiven) | 10,8                   |
| 202               | PP            | MF         | Esteröl (Grundöl)                                 | 10,8                   |
| 203               | PP            | MF         | FoodLube  | 10,8                   |
| 204               | PP            | GGA        | Polyalphaolefin (Grundöl mit löslichen Additiven) | 15,4                   |
| 205               | PP            | GGA        | Esteröl (Grundöl)                                 | 15,4                   |
| 206               | PP            | PUR        | Esteröl (Grundöl)                                 | 13,8                   |
| 207*              | POM           | PUR        | Esteröl (Grundöl)                                 | 12,5                   |

\* vor Spritzgießprozess 2 Gew.-% Talkum händisch zugemischt

**Tabelle.** Rezepturzusammensetzungen der Mikro kapsel-Kunststoff-Compounds Quelle: SKZ

**HANSER**

## Vorsprung KI

ISBN 978-3-446-46295-3 | € 39,99

ISBN 978-3-446-46477-3 | € 29,99

ISBN 978-3-446-45914-4 | € 29,99

Bestellen Sie jetzt unter [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)