

Fokus auf den Zwischenschichten

Kontinuierliches Multilayer-Fließpressen von Kaffeekapseln

Das für Mehrschichtlösungen einsetzbare kontinuierliche Fließpressen (CCM) wird auch als kontinuierliches Mehrschicht-Fließpressen – Continuous Compression Molding Multilayer (CCMM) – bezeichnet. Zu den bekannten Vorzügen kommen weitere Vorteile gegenüber anderen Verfahren hinzu: In Verpackungsanwendungen genügen Minimalmengen von Barrierematerial für die Kompaktierung – das Verfahren ist bei niedrigen Rohstoffkosten äußerst produktiv.

Beim kontinuierlichen Mehrschicht-Fließpressen (CCMM) erhält der Hersteller Kunststoffobjekte aus mehreren, aneinander haftenden Werkstoffschichten. Das Verfahren gliedert sich in drei Hauptstufen:

- Ausbildung einer mehrschichtigen Polymerschmelze,
- Dosierung und Einbringung sowie
- Fließpressen, Umformung und Extraktion.

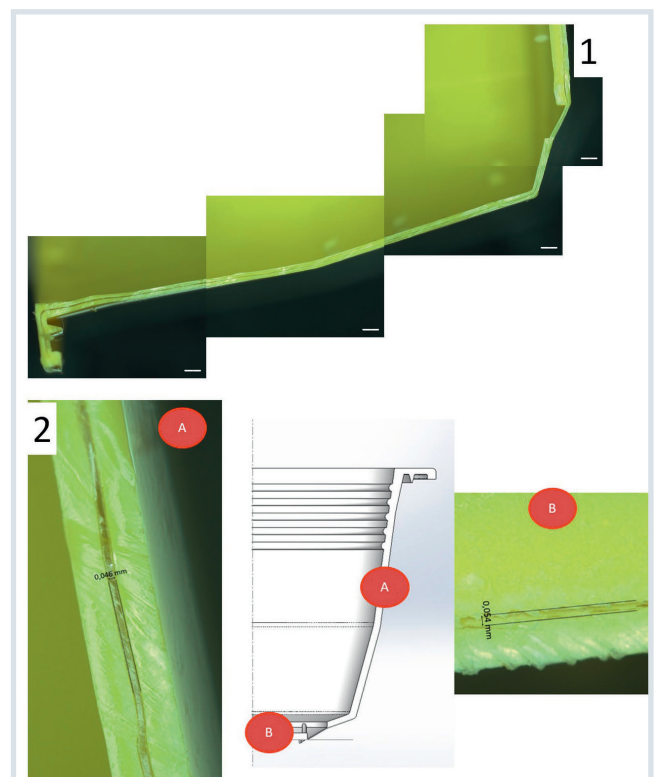
In Stufe 1 werden die verschiedenen Materialien geschmolzen, dem Mehrschichtextrusionskopf zugeführt und bilden eine Mehrschichtschmelze aus. Das Material für die mittlere Schicht (dunkelblau in **Bild 1**) wird mittig in den Co-Extrusionsblock, die beiden angrenzenden Schichten (roter Abschnitt in **Bild 1**) werden schichtweise eingebracht und umgeben die mittlere Schicht „sandwichartig“. Abschließend werden die Randwerkstoffe seitlich sukzessive zudosiert, um eine gute Haftung zu erzielen. In **Bild 1** sind die Randwerkstoffe zur Übersicht verschiedenfarbig in Orange und Grün dargestellt. Die Randwerkstoffe können je nach Konfiguration gleich oder verschieden sein.

Zur Einstellung der unterschiedlichen Polymerschichten und zur Optimierung von deren Verteilung werden vom Mehrschichtextrusionskopf mehrere Schichten zudosiert. Das ist entscheidend für die Funktionalität, denn die Anordnung der Schichten im Fertigerzeugnis ist in großem Maße von der Schichtenverteilung in der Mehrschichtschmelze abhängig.

Bild 2 zeigt, dass die Ethylenvinylalkoholschicht (EVOH) an allen vier Seiten gegen überlaufendes Material geschützt ist. Breite und Homogenität der EVOH-Schichten können durch Einwirkung auf die mechanischen Eigenschaften im Mehrschichtextrusionskopf (d.h. der o.g. Schichten) modifiziert werden. Es geht wieder um die Verteilung der Mehrschichtschmelze, um die beabsichtigte Schichtaufteilung im geformten Erzeugnis zu sichern.

Die Mehrschichtschmelze passiert die Extrusionsdüse mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit, die mit Volumenpumpen von jedem einzelnen Extruder stromabwärts geregelt wird. Das Material wird dann ins Freie extrudiert (**Bild 3**). Anschließend wird eine kleine Portion der Schmelze, die aus der Düse austritt (und als Endprodukt gewogen wird), von einem Fördersystem abgetrennt bzw. portioniert; das Fördersystem trennt die kleine Portion der Mehrschichtschmelze ab und befördert sie in die Form (**Bild 4**).

Das Fördersystem wird unmittelbar vor der Form um 90° geschwenkt (**Bild 5**). Die Form mit Matrize und Stempel ist in dieser Prozessstufe offen und für die Aufnahme der zu formenden Materialmenge bereit.



EVOH-Verteilung in einer im CCMM-Verfahren hergestellten Mehrschicht-Kapsel: 1) Vollständige Verteilung über den Querschnitt der Kapsel.

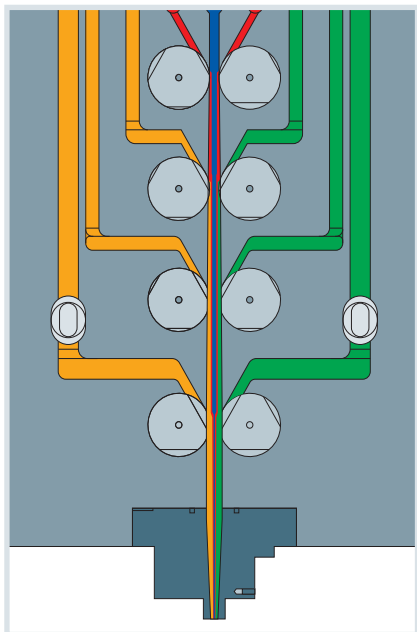
2) Vergrößerung zweier Kapselbereiche (Boden und Wand) © Sacmi

Die Dosis wird über der Matrize der Form platziert, das Fördersystem ist unbeladen und wieder bereit zum Abtrennen der nächsten Portion. Abschließend wird die Portion komprimiert: durch den Stößelhub im Hohlraum der Form schließt sich die Form. Während der Karusselldrehung kühlt das Teil komplett ab. Am Taktende wird die Form geöffnet, das Fertigprodukt extrahiert und über einem Förderband ausgerichtet (**Bild 6**).

Beitrag der Verträglichkeitsvermittler

Derzeit meist zur Herstellung von Mehrschicht-Kaffeekapseln eingesetzt, ist der Einsatz des CCMM-Verfahrens auch in anderen Sektoren wie der Herstellung von Bechern, Tabletts und Vorformlinge für Flaschen und anderen PET-Behältern denkbar. Je

Bild 1. Bildung der Mehrschicht-Schmelze im Co-Extrusionswerkzeug (Querschnitt) Quelle: Sacmi; Grafik: © Hanser



nach Produktanforderung, besteht das Enderzeugnis aus drei bis neun Schichten. Für Kaffee kapseln z.B. ist die Reihenfolge Polypropylen – Kompatibilisator – Ethylvinylalkohol (EVOH) – Kompatibilisator – Polypropylen.

Speziell für Kaffee kapseln ist EVOH das Barrierematerial, da es die Eigenschaften einer Sauerstoffbarriere für die Verpackung mitbringt. Polypropylen ist wiederum als Strukturbildner wichtig. Die Eigenschaften des Polypropylens in Verbindung mit der Produktgestaltung bestimmen das mechanische Produktverhalten. In dieser Konfiguration wird ein Kompatibilisator benötigt, da EVOH und PP unverträglich sind.

Dennoch brauchen nicht alle Barrierematerialien einen Verträglichkeitsvermittler zum Anbinden am äußeren Baupolymer. Bei Verwendung von Polyamid (Barrierematerial) und Polyethylenterephthalat (PET) erhält man zum Beispiel ein dreischichtiges Verpackungsprodukt ohne Kompatibilisator, wobei die Polyamidschicht in der Mitte und die PET-Schichten als Ummantelung angeordnet sind.

Mitunter ist der ohne Verträglichkeitsvermittler erreichte Haftgrad für die Anforderungen der jeweiligen Anwendung nicht ausreichend; so kann sogar bei der Kombination Polyamid und PET das Einbringen eines Kompatibilisators zwischen beiden Materialien nötig sein, wodurch ein 5-schichtiger Aufbau

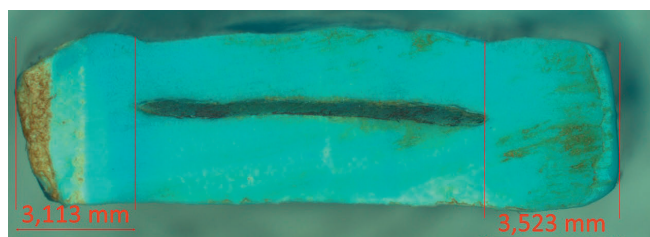


Bild 2. Querschnitt der Mehrschichtschmelze beim Austritt aus der Extrusionsdüse. Die hellblaue Fläche stellt das eingefärbte Polypropylen (PP), die schwarze Linie EVOH (oxidiert mit Jod zur besseren Sichtbarkeit) dar. Der durchsichtige Verträglichkeitsvermittler ist schwer zu erkennen © Sacmi

entsteht. Mit dem CCMM-Verfahren ist das problemlos möglich, doch nicht mit allen Abformverfahren machbar. Bei der Co-Injektion beispielsweise sind die Hersteller auf maximal drei Schichten festgelegt.

Barrierematerialien und Verträglichkeitsvermittler sind normalerweise Spezialpolymere, die so ausgelegt sind, dass die Verpackung gradierte Eigenschaften aufweist; sie sind deshalb wesentlich teurer als die thermoplastischen Standardprodukte PP und PET. Darum ist der Anteil der Spezialpolymere am Fertigprodukt zu optimieren, damit das Enderzeugnis sowohl gute Gebrauchseigenschaften besitzt als auch wirtschaftlich ist. »

Ethylenanteil	MFR (Melt flow rate)	OTR (Oxygen transmission rate)
[Mol-%]	[g/10min]	[cm ³ /m ² ·d]
29	4	0,2
27	4	0,1
27	8	0,1
27	2	0,2
32	1,6*	0,3
35	17	0,5
35	22	0,3
38	1,7*	0,7
44	5,5*	1,9
48	6,4*	3,7

MFR gemessen bei 210°C (* bei 190°C) und 2,16 kg
OTR gemessen bei 20°C und 65% relativer Feuchtigkeit

Tabelle 1. Schmelze-Massenfließrate (MFR) und Sauerstofftransportrate (OTR) ausgewählter handelsüblicher EVOH-Typen in Abhängigkeit vom Ethylenanteil, gemessen an einer 20 µm dicken Folie Quelle: Sacmi

Die Autoren

Fiorenzo Parrinello ist Labor- sowie Forschungs- und Entwicklungsleiter im Geschäftsbereich Closures Preforms & Containers bei Sacmi, Imola/Italien.

Fabrizio Pucci ist Leiter Forschung & Entwicklung Verpackungstechnologie im Geschäftsbereich Closures Preforms & Containers bei Sacmi.

Cristian Spadoni ist Laborleiter Verschlusstechnologie im Geschäftsbereich Closures Preforms & Containers bei Sacmi.

Giovanni Mazzotti ist Techniker für die Forschung & Entwicklung Verpackungstechnologie im Geschäftsbereich Closures Preforms & Containers bei Sacmi; Giovanni.Mazzotti@sacmi.it

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-09

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

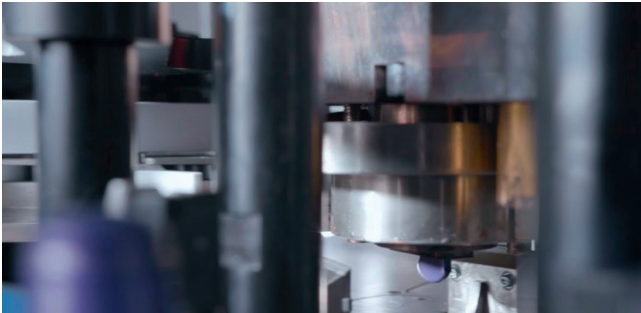


Bild 3. Die Mehrschichtschmelze (unten rechts) beim Austritt aus der Extrusionsdüse © Sacmi

Einsatz von Ethylenvinylalkohol (EVOH)

Ethylenvinylalkohol ist ein aus Ethylen und Vinylalkohol bestehendes Copolymer. Der Anteil des Vinylalkohols (Molprozent) im Polymer bestimmt die Barriereigenschaften von EVOH, die sich mit zunehmendem Vinylalkoholanteil verbessern. Auf dem Markt sind EVOH-Sorten mit unterschiedlichem Ethylenanteil. Hier verbessern sich die Barriereigenschaften mit abnehmendem Ethylenanteil (Molprozent). Der Ethylenanteil wirkt sich auch auf die Viskosität des geschmolzenen Polymers aus. Der Ethylenanteil ist insofern entscheidend, da er zum limitierenden Faktor für ein Abformverfahren werden kann. Daher geht es beim Endprodukt für die gewünschte Isolation um einen Kompromiss aus Viskosität, Barrierewirkung und Polymerdicke.

Tabelle 1 zeigt die Sauerstoffübertragungsgeschwindigkeiten (OTR) für handelsübliche EVOH-Sorten in Abhängigkeit vom Ethylenanteil. Wie daraus hervorgeht, sind die Sorten mit den besten Barriereigenschaften ($< 0,2 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$) diejenigen mit den geringeren Strömungsgeschwindigkeiten (MFR). Obwohl Sorten mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und einer Sauerstoffübertragungsgeschwindigkeit $\text{OTR} > 0,3 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$ auf dem Markt sind, fehlen schnell fließende Sorten mit einem OTR-Wert $< 0,3 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Kann ein Abformverfahren keine langsam fließenden Materialien verarbeiten, muss es zwangsläufig EVOH mit Barriereigenschaften verwenden, die mit denen von Sorten mit niedriger MFR nicht mithalten können. Infolgedessen muss für die gewünschte Lagerstabilität der EVOH-Anteil erhöht werden.

Die Kosten der in der Tabelle aufgeführten Materialien steigen mit abnehmendem Ethylenanteil. Die Kosten steigen jedoch nicht linear mit Verbesserung der Barriereigenschaften. Wie sich aus dem Vergleich von Sauerstoffübertragungsgeschwindigkeit und Kosten ergibt, sollte die Wahl auf die teureren Sorten mit geringen Ethylenanteilen fallen mit Barriereigen-

schaften, dank derer die Menge des Barrierematerials innerhalb der Verpackung minimiert werden kann.

Verarbeitungstechnologien

Die Barriereigenschaften bei Verpackungen hängen vom verwendeten Material und dessen Verteilung ab. Folglich sind Materialauswahl und Verarbeitung entscheidend. Verfahren zur Herstellung von Mehrschichtprodukten sind Pressen, Co-Injektion [1] und Thermoformen [2–4]. Die Hauptmerkmale dieser Formverfahren enthält **Tabelle 2**.

Die Kompaktierung ist äußerst flexibel in der Vielfalt verwendbarer Polymere. So können Barrierematerialien mit geringem Ethylenanteil, höherer Viskosität und besserer Gasdichtheit eingesetzt werden. Dabei können im Endprodukt geringere EVOH-Anteile genutzt werden – bei gleichbleibender Barrierewirkung – im Vergleich zu Artikeln, die bei der Abformung EVOH-Schichten mit schlechteren Barriereigenschaften verwenden. Die verwendeten Materialien führen zu geringeren Stückkosten. Als weiteren Vorteil erzielt das Fließpressverfahren eine geschlossene hohlraumfreie EVOH-Schicht über die gesamte Höhe der Verpackung, was hervorragende Barriereigenschaften garantiert.

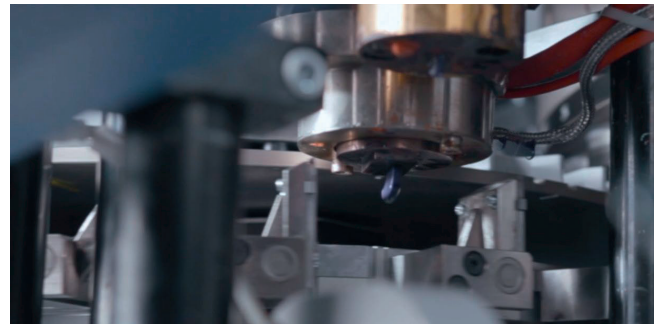


Bild 4. Das Abtrennen und Fördern der gewünschten Schmelzeportionen ist eine wichtige Etappe im Gesamtprozess © Sacmi

Tabelle 2. Hauptmerkmale der Barrierschicht bei Verpackungen, hergestellt durch Pressen, Co-Injektion und Thermoformen

Quelle: Sacmi

Technologie	Barrierematerial	Dicke des Barrierematerials	Barrierematerialverteilung	Lücken oder freie Stellen	EVOH-Anteil [% m/m]
Pressen	Harz mit geringem Ethylenanteil	dünne EVOH-Schicht	komplett innerhalb des geformten Produkts	unwahrscheinlich, doch mit Bilderkennungssystem zu ermitteln	3–4%
Co-Injektion	Harz mit hohem Ethylenanteil (hohe MFR)	dünne EVOH-Schichten sind schwierig zu erhalten	komplett, aber schwierig zu erzielen	vorhanden im Flansch und an der Einspritzstelle	6–8%
Thermoformung	Harz mit geringem Ethylenanteil	ungleichmäßige Dicke	Defekte/Fehler können auftreten	wahrscheinlich infolge des Streckens	5–7%

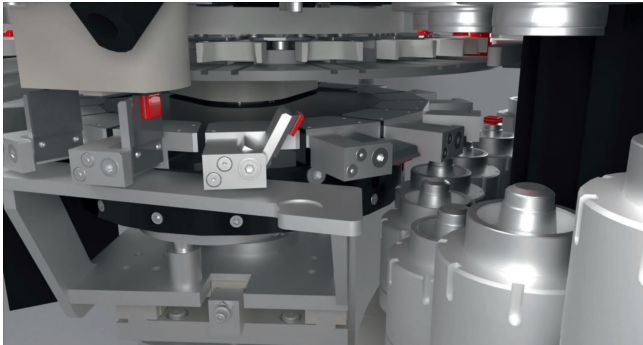
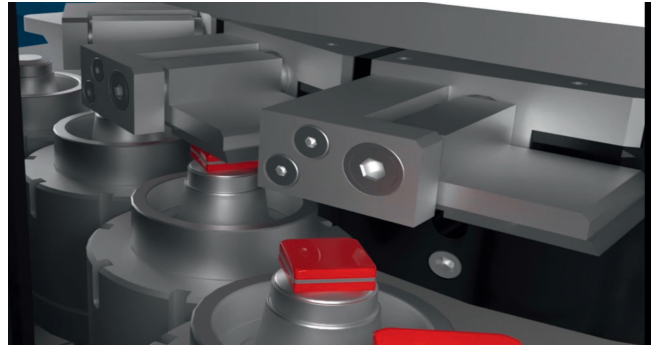


Bild 5. Nahaufnahme: Abtrennen der Mehrschichtdosis und das Fördersystem, das vor Erreichen der Form um 90° schwenkt © Sacmi



Strömungsdynamische Simulation verkürzte die Entwicklungszeiten für dieses Verfahren und erbrachte den Nachweis, dass man dank CCMM-Prozess durchweg Kapseln mit kontinuierlicher EVOH-Verteilung erhält. **Bild 7** zeigt die vollständige und homogene Verteilung der verschiedenen Materialschichten beim Schließen der Form.

Das **Titelbild** und **Bild 8** vergleichen die reale Verteilung in den mit drei verschiedenen Verfahren hergestellten Kapseln. Alle Bilder beziehen sich auf Stichproben aus dem normalen Einzelhandel. Wie im **Titelbild** dargestellt, ist bei der formgepressten Kapsel die innere EVOH-Schicht homogen und über die gesamte Höhe des Produkts durchgängig. Aus den Querschnitten in **Bild 8** geht hervor, wie es in einigen Fällen durch Co-Injektion zur suboptimalen Anbindung der drei Schichten kommt und sich die Kapselschichten nachfolgend separieren.

Weiterhin ist es mit Co-Injektion schwierig, eine geschlossene EVOH-Schicht zu erhalten. Es ist nicht unüblich, dass gerade an der (mit einem Pfeil markierten) Einspritzstelle und in anderen Bereichen EVOH-freie Stellen bleiben. Diese Stellen ohne Barrierematerial beeinflussen die finale Sauerstoffübertragungsgeschwindigkeit stark, da sie sauerstoffdurchlässig sind und der Verpackungsinhalt folglich oxidiert.

Bei der Kompaktierung genügt es, den Kompatibilisator als homogene Schicht auf die Grenzfläche zwischen beiden zu kompatibilisierenden Materialien aufzubringen. Bei anderen Abformverfahren, die maximal drei Materialschichten beherrschen, muss der Verträglichkeitsvermittler der äußeren Polymerschicht beigemischt werden. Demzufolge werden wesentlich größere Mengen Kompatibilisator für die gewünschte Wirkung benötigt. Die Mengen von Verträglichkeitsvermittlern, wie sie übli- »

Technologie	anhaftende Schicht	anhaftender Anteil
Pressen/Verdichten	einzelne Schichten	2–4%
Co-Injektion	gemischt im Hauptmaterial	10–15%
Thermoformen	einzelne Schichten	3–5%

Tabelle 3. In verschiedenen Formverfahren eingesetzte Mengen von Verträglichkeitsvermittlern im Vergleich Quelle: Sacmi

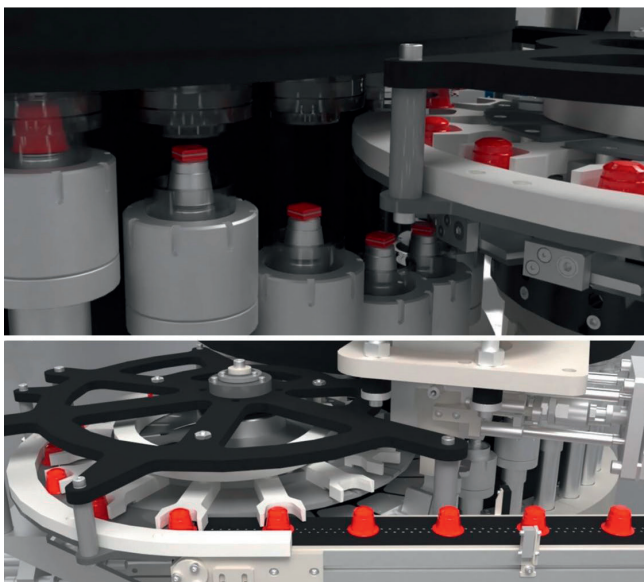


Bild 6. Extrahieren der Kapsel aus der Form © Sacmi

Die Wandstärke stets im Griff

RAYEX S XT

- Präzise Vermessung von Wandstärke, Exzentrizität und Durchmesser
- Einfache und schnelle Einrichtung für neue Produkte
- Hochwertige Röntgenquellen mit höchster Lebensdauer

Family owned since 1957, Zumbach is a global leader in the industry. Driven by innovation and experience. We are here for you and ready to build the future together.

www.zumbach.com • sales@zumbach.ch

Bild 7. Computersimulation: Verteilung der fünf Materialschichten beim Fließpressen von Kaffeekapseln. Zur besseren Übersicht ist nur die Hälfte der effektiven EVOH-Schicht dargestellt (rot) © Sacmi

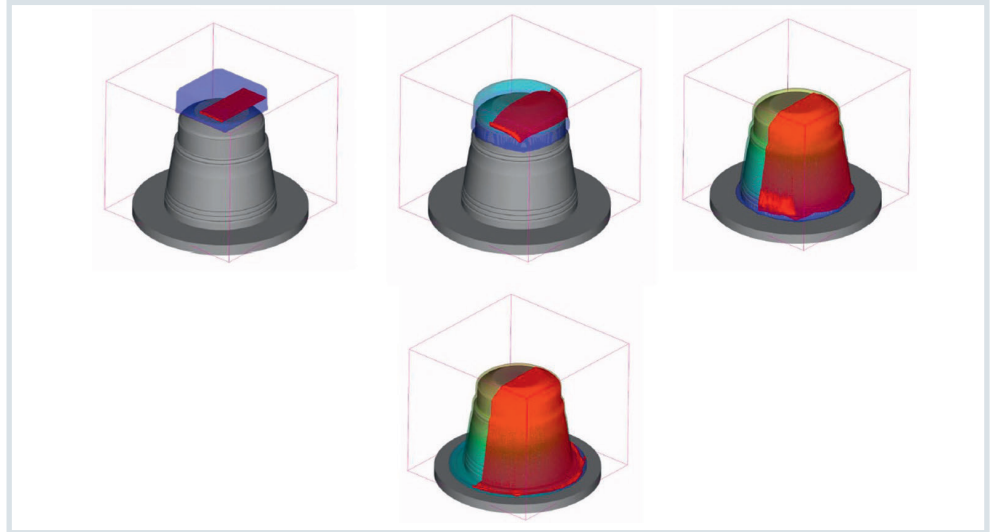


Tabelle 4. Kosten für 1 Mio. Kapseln je nach Zusammensetzung der Verpackung
Quelle: Sacmi

	EVOH [Masse-%]	Verträglichkeitsvermittler [Masse-%]	Farbstoffe [Masse-%]	Äußere Schichten [Masse-%]	Rohstoffkosten pro 1 Mio. Kapseln [EUR]
Fall 1	4	2	1,8	92,2	4364
Fall 2	6	4	1,8	88,2	4749
Fall 3	7	5	1,8	86,2	4936
Fall 4	7	12	1,8	79,2	5453

cherweise bei Abformverfahren verwendet werden, stehen in **Tabelle 3**. Wie auch beim Barrierematerial kommt die Kompaktierung mit weniger Kompatibilisator aus als andere Abformverfahren. Eine formgepresste Kapsel mit OTR_{Luft} -Werten von üblicherweise weniger als $0,0005 \text{ cm}^3/\text{Kapsel} \cdot \text{Tag}$ (Kapseloberfläche ca. 2500 mm^2) besteht aus 4% EVOH und 2% Kompatibilisator.

Der Materialpreis stellt 50–60% der Gesamtkosten der Kapsel dar. Aus der Kostenanalyse ergibt sich der Nutzen der Optimierung der kostenintensivsten Materialien der Mehrschichtverpackung (**Tabelle 4**). Internen Tests zufolge bringen die ökonomischen Vorzüge der Kompaktierung keine Kompromisse bei der Produktqualität mit sich. Es konnte nachgewiesen werden, dass Kapseln mit hervorragenden Barriereigenschaften und Schichtanbindung in der Form herstellbar sind.

Qualitätskontrolle der Ovalität und der Barrierschicht

Ein weiterer Vorzug des CCMM-Verfahrens ist, dass die Kapseln den Abformprozess in vororientierter Position verlassen (**Bild 9**) und dadurch auf der Linie ohne Einbau einer Positioniereinrichtung zwischen Formmaschine und Bilderfassungssystem geprüft werden können.

Mit der CCMM-Lösung von Sacmi werden alle Kapseln mithilfe zweier Bilderfassungssysteme geprüft. Das erste System misst die Ovalität der Kapsel und prüft sie auf unerwünschte schwarze Punkte oder Einschlüsse, Blasen, Farbvariationen etc. Kapseln, die die Anforderungen nicht erfüllen, werden automatisch ausgeschleust. Das zweite Inspektionssystem analysiert die interne Barrierschicht, prüft deren Ausbildung über die gesamte Höhe der Kapsel und schleust Artikel mit defekter Barrierschicht aus. Aus der Farbtintensität auf dem vom System zur In-

spektion der Barrierschicht aufgezeichneten Bild kann der EVOH-Anteil in der Kapsel abgeleitet werden. Die Bilderfassungssysteme (**Bild 9**) sind hilfreich zur unmittelbaren Identifikation einer „Maschinendrift“ als Folge von Fehlern wie Materialmangel am Extruder bzw. Feuchtigkeit in der EVOH-Schicht.

Die **Tabellen 5 und 6** stellen die OTR-Werte – gemessen an Kapseln unterschiedlicher Größe – in Abhängigkeit von der Anzahl der Barrierschichten dar. Alle Werte beziehen sich auf mit dem CCMM-Verfahren hergestellte Kapseln. Aus den Daten in **Tabelle 6** ist ersichtlich, dass es bei Einsatz von Hochleistungs-Barrierematerialien und deren ordnungsgemäßer Verteilung in der Kapsel möglich ist, Kapseln mit hervorragenden OTR-Werten abzuformen, die eine hohe Lagerstabilität der verpackten Produkte sichern.

EVOH ist ein hydrophiles Polymer; wird es der Luft ausgesetzt, neigt es zur Aufnahme von Wasser. Mit zunehmender ab-

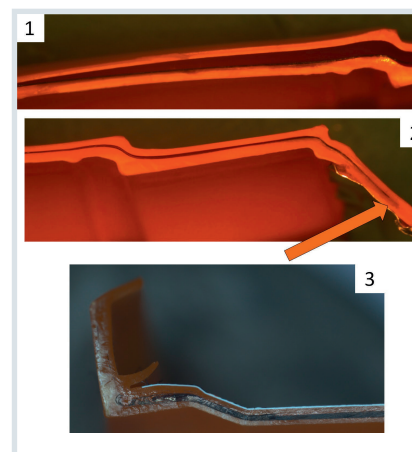


Bild 8. Verteilung des EVOH in einer Mehrschichtkapsel, hergestellt durch Co-Injektion: 1) Mögliche Auswirkung einer Schichtdelamination; 2) und 3) Mögliche Hohlräume in bzw. Unvollständigkeit der EVOH-Schicht © Sacmi

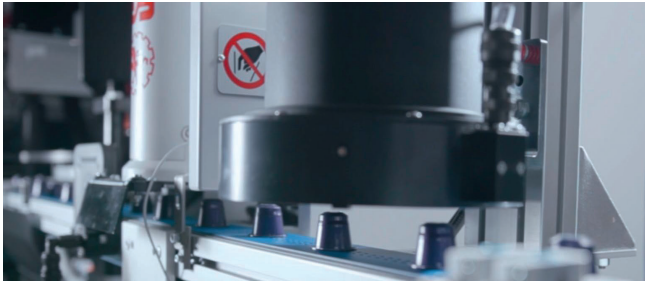


Bild 9. Fortlaufende Analyse aller gefertigten Kapseln mit zwei verschiedenen Kontrollsystemen © Sacmi

sorbierter Feuchtigkeit lässt die Barrierewirkung nach. Daher wurde ein bestimmtes Los von Kapseln in regelmäßigen Intervallen einer OTR-Analyse unterzogen. Damit sollte nachgewiesen werden, dass die Kapseln nicht irreversibel Wasser absorbieren (wodurch sich die Sauerstoffpermeabilität des geformten Objekts verschlechtern würde). Die Daten wurden beim Abformen von zwei Stichproben 5-schichtiger Kapseln (PP – Verträglichkeitsvermittler – EVOH – Verträglichkeitsvermittler – PP) erhoben. Bei den Stichproben wurden verschiedene Sorten EVOH gleicher Menge verwendet.

Der verwendete Anteil für EVOH wurde so gewählt, dass die erreichte OTR größer als die Empfindlichkeit des Geräts ist, wo-

durch sich die OTR-Änderungen über die Zeit bewerten und quantifizieren ließen.

Bild 10 zeigt, wie die Sauerstofftransportrate faktisch unverändert bleibt über die Zeit. Die beobachteten Schwankungen resultieren aus normalen Schwankungen, wie sie zwangsläufig auftreten bei Messungen, die unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden. Wichtig ist hier der Hinweis darauf, dass keine Verschlechterung der Ergebnisse über die Zeit beobachtet wurde; selbst wenn eine OTR-Erhöhung bemerkt wird, fällt OTR nach wenigen Wochen wieder zurück.

Die Durchführung der OTR-Analyse erfolgt erst, nachdem sich die Kapseln im betrieblichen Umfeld „setzen“ konnten und eine ausgeglichene Temperatur und Feuchtigkeit aufwiesen (das Ergebnis wird durch diesen zwangsläufigen Prozess beeinflusst). Die OTR-Daten als Funktion der Zeit zeigen jedoch auf, dass die Kapseln die Feuchtigkeit nicht irreversibel absorbieren und deren Eigenschaften über die Zeit unverändert bleiben.

Außerdem fallen beim CCMM-Prozess- wie auch beim CCM-Prozess – keine Abfälle an. Das ist bei der Herstellung von Mehrschichtmaterialien von besonderem Wert, da die erneute Verarbeitung von Multi-Material-Abfällen zu einigen Problemen bei der Extrusion führt (Verträglichkeitsprobleme, Bildung von EVOH-Gelen etc.), die den technologischen Prozess erschweren und die Menge der Abfälle begrenzen, die erneut in die Produktion eingespeist werden können. ■

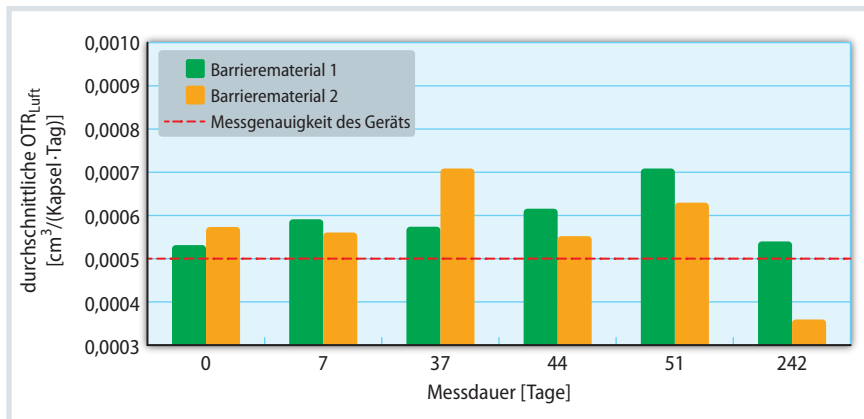


Bild 10. Sauerstoffdurchlässigkeit der Kapseln, die mit zwei verschiedenen Sorten von Barrierematerial hergestellt wurden

Quelle: Sacmi; Grafik: © Hanser

EVOH	OTR _{Luft}	OTR _{Luft}	OTR _{Sauerstoff}	OTR _{Sauerstoff}
[Masse-%]	[cm³/Kapsel · Tag]	[cm³/m² · Tag]	[cm³/Kapsel · Tag]	[cm³/m² · Tag]
0	0,1150	46,36	0,5473	220,7
2,3	< 0,0005*	< 0,2016*	< 0,0024*	< 0,9600*
3,8	< 0,0005	< 0,2016	< 0,0024	< 0,9600
6,5	< 0,0005	< 0,2016	< 0,0024	< 0,9600

* Der Prozess erfordert spezielle Einstellungen; optimale EVOH-Verteilung ist nicht immer realisierbar.

Tabelle 5. Sauerstofftransportrate von CCMM-Kapseln mit 2480 mm² Oberfläche (gemessen bei 25 °C und 35% rel. Feuchte) Quelle: Sacmi

EVOH	OTR _{Luft}	OTR _{Luft}	OTR _{Sauerstoff}	OTR _{Sauerstoff}
[Masse-%]	[cm³/Kapsel · Tag]	[cm³/m² · Tag]	[cm³/Kapsel · Tag]	[cm³/m² · Tag]
2	0,0032	1,0207	0,0152	4,86
4	0,0011	0,3509	0,0052	1,67
6	0,00059	0,1871	0,0028	0,89

Tabelle 6. Sauerstofftransportrate von CCMM-Kapseln mit 3135 mm² Oberfläche (gemessen bei 21 °C und 40% rel. Feuchte)

Quelle: Sacmi