

Kühlluft flexibel führen

Durchsatzsteigerung und Verbesserung von mechanischen Produkteigenschaften

Um bei der Produktion von Blasfolien einen Blasenabriss zu vermeiden, wird in der Praxis oft die Geschwindigkeit der Kühlluft reduziert, was jedoch die Anlageneffizienz beeinträchtigt. Luftführungseinheiten können das Auftreten solcher Blaseninstabilitäten vermindern. Mithilfe von Irisblenden wurde am IKV in Aachen eine neuartige Luftführungseinheit entwickelt, um die Kühlleistung bei der Blasfolienextrusion und damit die Produktivität einer bestehenden Anlage steigern und die Effekte systematisch untersuchen zu können.

Eine flexible Luftführungseinheit in der Blasfolienextrusion erlaubt höhere Massedurchsätze und mehr Prozessstabilität

© IKV



Die Anwendungen von Blasfolien reichen von einfachen Tragetaschen bis hin zu Hygiene- und Medizinartikeln wie Babywindeln oder Folien für Wundpflaster. Allen Folienprodukten ist gemein, dass sie mit hohem Massedurchsatz und bestmöglicher Folienqualität hergestellt werden müssen, um eine hohe Effizienz der Produktionslinie zu gewährleisten. Da der Massedurchsatz stark von der entzogenen Wärmemenge aus der Blase abhängig ist, werden bestehende Kühlsysteme ständig weiterentwickelt und optimiert [1], was sich auch vorteilhaft auf die Umweltbilanz auswirkt (siehe **Kasten S. 76**).

Grundlagen und Probleme der Kühlung

Bei konventionellen Blasfolienanlagen wird die Folienblase mittels Luftkühlrinnen und Blaseninnenkühlungen konvektiv gekühlt. Diese strömen die Folienblase von außen und innen mit gekühlter Luft an, um dem Kunststoff Wärme zu entziehen. Die konvektive Kühlleistung eines Kühlringes lässt sich, unter Vernachlässigung von Wärmeleitung und Wärmestrahlung, über den in **Gleichung 1** (siehe **Kasten S. 79**) dargestellten Wärmestrom bestimmen [2, 3].

Ein wesentlicher Nachteil bei der konvektiven Kühlung ist der geringe Wärmeübergangskoeffizient α , der nach **Gleichung 2** mit der Reynoldszahl des Luftstroms korreliert. Eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten lässt sich nach **Gleichung 3**

durch eine Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft v bei konstanter Dichte ρ , charakteristischer Länge d und dynamischer Viskosität η der Luft erzielen [2, 4].

In der Schlauchbildungszone, in der sich die Folie noch im schmelzeförmigen Zustand befindet, hat die Folienblase nur eine begrenzte Schmelzefestigkeit, was die Kühlluftgeschwindigkeit aufgrund von Blaseninstabilitäten limitiert [5]. Aufgrund der Gefahr eines Blasenabrisses bei zu hohen Kühlluftgeschwindigkeiten sind Maschinenbediener von Blasfolienextrusionsanlagen häufig gezwungen, die Kühlluftgeschwindigkeiten und damit die Anlageneffizienz zu reduzieren. Ein Lösungsansatz, um solche Blaseninstabilitäten zu vermeiden, besteht im Einsatz von Luftführungseinheiten (LFE). LFE können auf vorhandene Kühlringe aufgesetzt werden und führen die Kühlluft durch einen speziell ausgelegten Strömungsspalt zwischen LFE und Folienblase (**Bild 1**). Weiterhin ist es so möglich, den sogenannten

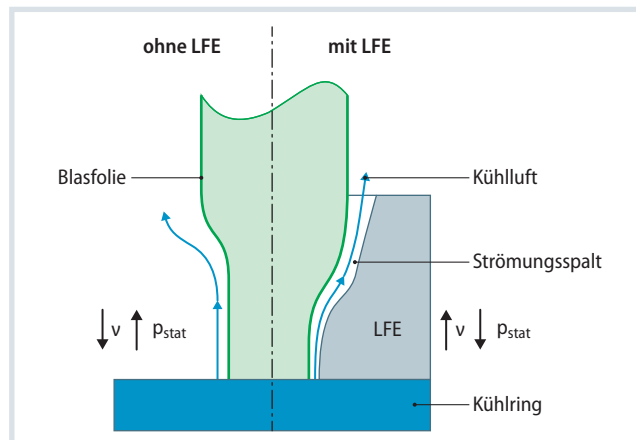


Bild 1. Schematische Darstellung des Venturi-Effekts innerhalb einer Luftführungseinheit (LFE) Quelle: [9, 10];

Grafik: © Hanser

Venturi-Effekt durch eine Verengung des Strömungsquerschnitts zwischen der Folienblase und der Luftführungseinheit zu nutzen. Der Venturi-Effekt folgt aus der Bernoulli-Gleichung, die besagt, dass die spezifische Energie entlang einer Stromlinie konstant ist [6–8]. Aufgrund des Energieerhaltungssatzes führt eine Veränderung der Fließgeometrie zu einer Ge-

schwindigkeitsänderung des Fluids, was den statischen Druck beeinflusst.

Bei einer Querschnittsverengung steigt die Strömungsgeschwindigkeit, sodass der statische Druck abnimmt. Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bei gleichzeitigem Absinken des Luftdrucks können sowohl der Wärmeübergang als auch die Blasenstabilität er- »

>extruder >**dosierer** >komponenten >pneumatische förderung >komplette anlagen

COPERION K-TRON DOSIERER. SMARTER LÖSUNGEN FÜR KOMPLEXE PROZESSE.

- + Kompaktes, modulares Design
- + Breites Anwendungsspektrum
- + Weltweit bekannt für Zuverlässigkeit und Präzision
- + Hochmoderne Steuerungen für aktuelle und zukünftige Anforderungen
- + Patentierte SFT-Wägetechnologie mit einer Gewichtsauflösung von 1:4.000.000 in 80 Millisekunden



Coperion K-Tron-Dosierer sind die ideale Lösung für komplexe Compoundierprozesse. Sie sichern zuverlässig das gleichmäßige und hochgenaue Zuführen von Produkten und somit ein optimales Endergebnis. Informationen über unsere bewährten Dosierer finden Sie auf unserer Website: www.coperion.com/dosierer

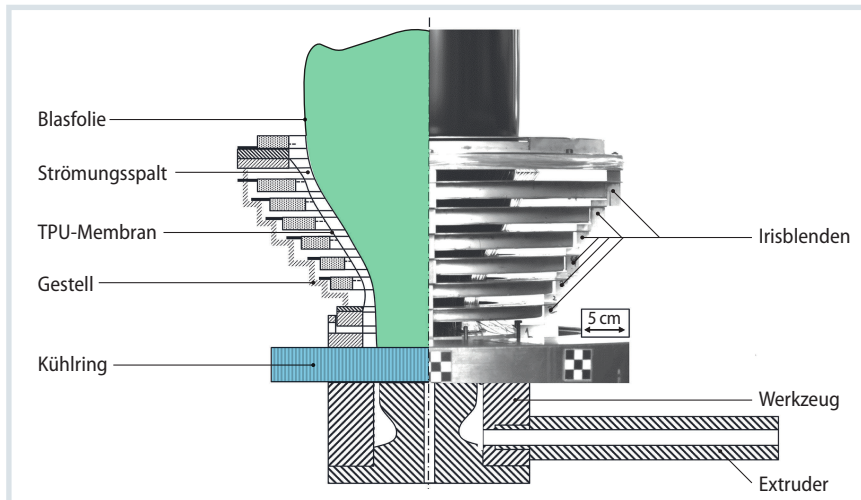


Bild 2. Schematische Darstellung (links) und prozessintegrierte Luftführungseinheit (rechts) bei der Blasfolienextrusion [10] Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

höht werden [11]. Zudem erlaubt der reduzierte Druck eine frühere Aufweitung der Folienblase innerhalb der LFE, wodurch eine größere Folienoberfläche für die Wärmeabfuhr zur Verfügung steht. Um die Vorteile des Venturi-Effekts nutzen zu können, muss allerdings eine signifikante Verringerung des Strömungsquerschnitts zwischen Folienblase und LFE erfolgen. Dies ist wegen der verschiedenen Blasenformen, die

sich abhängig vom Prozesszustand und der Folienbreite einstellen sowie der starren Geometrie bisher eingesetzter Luftführungseinheiten nur in Grenzen möglich.

Entwicklung einer flexiblen Luftführungseinheit

Daher wurde am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen ei-

ne neuartige, flexible Luftführungseinheit für die Blasfolienextrusion mit dem Ziel entwickelt, die Kühlleistung und damit die Produktivität einer bestehenden Blasfolienextrusionsanlage zu steigern. Diese Veröffentlichung geht der Frage nach, wie die entwickelte Luftführungseinheit sowohl den Massedurchsatz als auch die Folieneigenschaften Dicken-schwankungen, Mechanik und Schrumpf beeinflusst.

Bild 2 zeigt schematisch den Bereich der Schlauchbildungszone einer Blasfolienextrusionsanlage, inklusive der am IKV entwickelten flexiblen Luftführungseinheit. Hier kann der Strömungsspalt zwischen LFE und Folienblase mithilfe einer Membran eingestellt werden.

Als luftführende Membran wurde ein hochtransparentes thermoplastisches Polyurethan (TPU) vom Typ Desmopan 3690AU der Covestro AG, Leverkusen, eingesetzt. Die Transparenz der Membran ist für die Einstellung eines möglichst geringen Strömungsspalts zwischen Folienblase und Membran notwendig, um einerseits den Venturi-Effekt bestmöglich nutzen und andererseits die Einstellung des Strömungsspalts bei laufender Extrusion vornehmen zu können.

Für eine schnelle sowie radialsymmetrische Verstellung der TPU-Membran kommen sechs übereinander gestaffelte Irisblenden zum Einsatz.

Anlagentechnik und Versuchsplanung

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden an einer Blasfolienextrusionsanlage im Technikum des IKV durchgeführt. Die Extrusionsanlage besteht aus zwei Einschneckenextrudern (Typ: KFB 45/600 (L/D=24), Hersteller: Kuhne Anlagenbau GmbH, St. Augustin) mit 45 mm Schneckendurchmesser. Bei den verwendeten Schnecken handelt sich um 3-Zonen-Schnecken mit Scher- und Mischelementen.

Die Dosierung erfolgt bei allen Extrudern über eine gravimetrische Dosiereinheit (Hersteller: Plast-Control GmbH, Remscheid). Die Schmelze wird von den Extrudern in einen radialen Wendelverteiler gefördert, dessen Austrittsdüse einen Durchmesser von 80 mm aufweist. Für die Untersuchungen wird ein Düsenspalt von 1,5 mm mit einer Bügelzonenlänge von 8 mm verwendet.

Einsparpotenzial bei der Kühlung

Die stetige Optimierung der Kühlleistung hat nicht nur steigende Durchsätze zur Folge, sondern ermöglicht durch Energieeinsparungen zudem nachhaltigere Verpackungsprodukte. Der am häufigsten für Blasfolien verwendete Kunststoff ist Polyethylen (PE). Er weist im Vergleich zu anderen Kunststoffen eine besonders hohe spezifische Wärmekapazität von etwa 2,1 kJ/(kg·K) auf. Bei einer Verarbeitungstemperatur von beispielsweise 180°C muss beim Abkühlen der PE-Folie auf eine Temperatur von 100°C am Ende der Schlauchbildungszone etwa 168 kJ/kg an Wärme abgeführt werden. Bei einer mittelgroßen Blasfolienextrusionslinie mit einem Massedurchsatz von 700 kg/h erfordert dies daher eine thermische Kühlleistung von ca. 33 kW.

In der Praxis werden für Extrusionslinien bei solchen Massedurchsätzen Kühlaggregate mit einer Kühlleistung von 100 kW eingesetzt, die in Summe (Kühlring und Innenkühlung) rund 7500 m³/h Kühlluft mit einer Temperatur von

7°C bereitstellen. Die Differenz aus thermisch abzuführender Prozesswärme und der eingesetzten Kühlleistung geht als reine Verlustleistung in die Umgebung über.

Die elektrische Leistungsaufnahme derartiger Kühlaggregate beträgt bei üblichen Wirkungsgraden ca. 35 kW. Wird die Kühlleistung z.B. durch optimierte Systeme um 10% erhöht, kann die Energieeffizienz der Blasfolienanlage so weit gesteigert werden, dass bei 7200 Betriebsstunden pro Jahr 25 000 kWh (entsprechend einem CO₂-Äquivalent von ca. 15 t) pro Blasfolienanlage eingespart werden können.

Pro Kilogramm produzierter Blasfolie bedeutet dies zwar nur eine Einsparung von 2,97 g CO₂, allerdings werden allein in Deutschland ca. 2,28 Mio. t Kunststoff zu Folien für Verpackungsanwendungen verarbeitet, sodass sich ein branchenweites CO₂-Einsparpotenzial von mehreren tausend Tonnen ergibt.

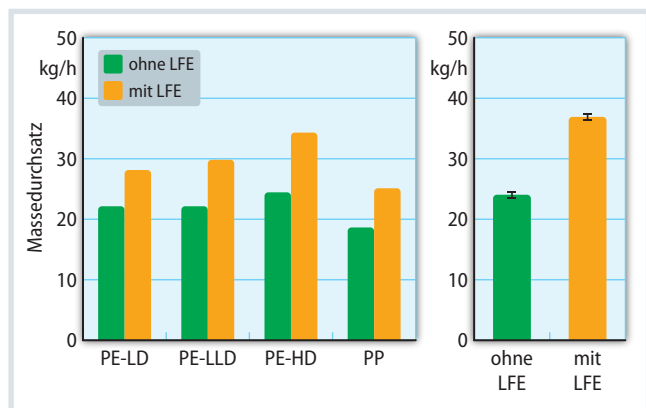


Bild 3. Der Einsatz der am IKV entwickelten LFE resultiert im Vergleich zum konventionellen Prozess in gesteigerten Massedurchsätzen (links Mittelwerte, rechts Prozesspunkt, siehe Text) Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

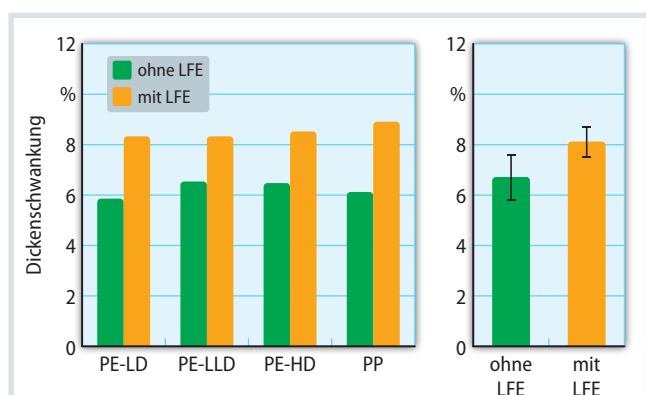


Bild 4. Mit der Luftführungseinheit sind die Foliendickenschwankungen im Vergleich zum konventionellen Prozess höher Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

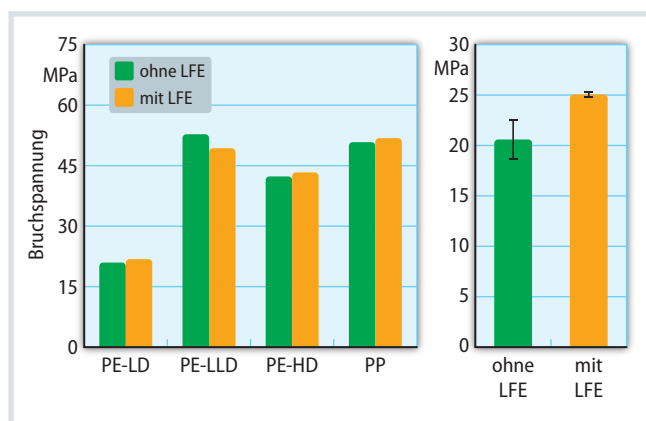


Bild 5. Bruchspannungen: Im Durchschnitt steigen die Werte beim LFE-Einsatz; im Fall von PE-LD (rechts) ergibt sich in einem Prozesspunkt z. B. eine Zunahme um ca. 5 MPa Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

Als Materialien kommen ein PE-LD (2102 N0W), ein PE-LLD (6118) und ein PE-HD (FO4660) der Sabic Europe B. V., Geleen/ Niederlande, sowie ein PP (Moplen EP 310 D) der Basell Polyolefine GmbH, Frankfurt, zum Einsatz. Die Ausstoßleistung der Anlage variiert je nach Prozesspunkt zwischen ca. 15 kg/h und 40 kg/h.

Der Versuchsdurchführung liegt für jedes Material mit und ohne LFE ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Variationsstufen zugrunde (Tabelle 1).



Unsere Verfahrenstechnik...

...beginnt dort, wo die der Ein- und Doppelschneckenextruder endet!

Mit seinem einzigartigen modularen System erfüllt der Planetwalzenextruder von ENTEX Ihre Anforderungen an Ihre Produktionsprozesse. Nutzen Sie unsere Erfahrung aus über 30 Jahren Entwicklungsarbeit und überzeugen Sie sich von der Leistungsfähigkeit und den Vorteilen unserer Extrusionsanlagen. Wir bieten Ihnen ein System mit dem Sie auch in Zukunft noch die Anforderungen des Marktes erfüllen.

Überzeugen Sie sich und besuchen uns im Internet unter www.entex.de – oder kontaktieren Sie uns direkt!

Nutzen Sie unser Know-How für Ihre Produktionsprozesse und hochwertigen Produkte und stellen Sie sich den Anforderungen des Marktes von morgen mit dem Planetwalzenextruder von ENTEX!



Besuchen Sie uns auf unserer Messe

Auf der POWTECH Stand 1-560

ENTEX®
extrusion without limits

Zentrale
ENTEX Rust & Mitschke GmbH, Heinrichstraße 67a, 44805 Bochum, Deutschland
Telefon +49 (0) 234/89122-0, Fax +49 (0) 234/89122-99, info@entex.de, www.entex.de

Tochtergesellschaft
ZHEJIANG ENTEX MACHINERY CO., LTD, No. 88, Fuyuan Road
Yaozhuang Town, Jiahsan Country, Jiaxing City, Zhejiang province 314117, China
Telefon +86-573-89104626 / 89104627 / 89104630, Fax +86-573-89104620
entexsh@entex.com.cn, www.entex.com.cn

Die Autoren

Lars Kraus, M.Sc., ist Gruppenleiter Verfahrenstechnik Extrusion am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen und zudem hauptverantwortlich für die Arbeitsgruppe Blasfolienextrusion; lars.kraus@ikv.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung und zudem Leiter des IKV.

Dr.-Ing. Martin Facklam ist Leiter der Abteilung Extrusion und Kautschuktechnologie am IKV

Dank

Das IGF-Vorhaben 20100 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Institutionen gilt unser Dank. Neben diesen Institutionen danken die Autoren den Firmen Sabic Europe, Geleen/Niederlande, Basell Polyolefine GmbH, Frankfurt, und der Covestro AG, Leverkusen, für die Bereitstellung der Versuchsmaterialien.

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

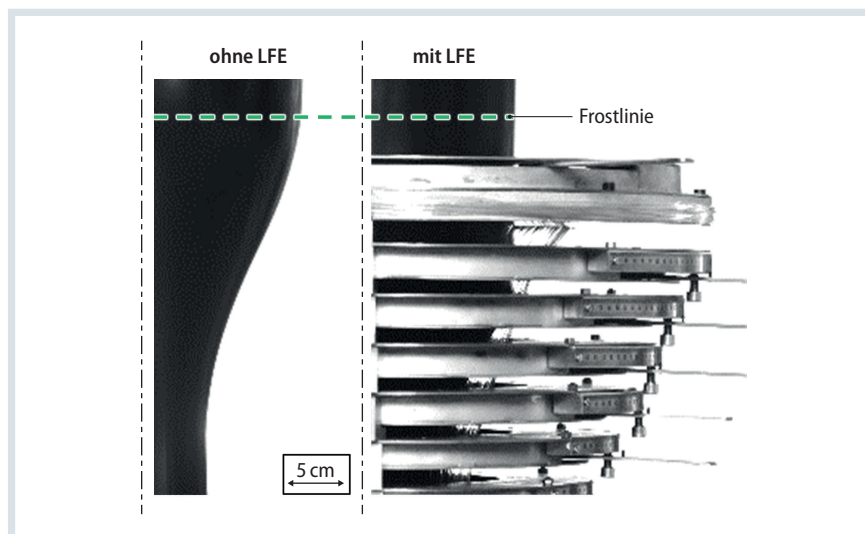


Bild 6. Der Einsatz der Luftführungseinheit (LFE) hat im Vergleich zum konventionellen Prozess eine frühzeitige Aufweitung der Folienblase zur Folge Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

Massedurchsatz und Foliendickenschwankung

Die Ergebnisse der Versuchsreihen sind in den Diagrammen zusammengefasst: Die **Bilder 3 bis 8** zeigen links jeweils den Mittelwert aus allen untersuchten Prozesspunkten mit und ohne Luftführungseinheit. Alle gezeigten Werte sind signifikant. Zur Verdeutlichung der hohen Signifikanz zeigt das rechte Diagramm in jedem Bild einen beispielhaften Prozesspunkt aus dem Versuchsplan (PE-LD bei BUR = 3,2, Foliendicke 60 µm, Gebläseleistung 100 %, $T_{sch} = 200^\circ\text{C}$; Prozessparameter vgl. **Tabelle 1**).

Mit der entwickelten Luftführungseinheit ist es möglich, im laufenden Betrieb die luftführende Membran an die Blasengeometrie anzupassen. Dadurch kann der Venturi-Effekt prozesspunktunabhängig vom Maschinenbediener hervorgerufen werden. Im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess ohne LFE lässt sich der Massedurchsatz im Mittel für alle untersuchten Materialien um

ca. 30 % steigern (**Bild 3**). Je nach Prozesspunkt kann sogar eine Steigerung von bis zu ca. 60 % erzielt werden.

Neben dem Massedurchsatz ist zudem die Schwankung der Foliendicke über dem Umfang des Folienschlauchs als Qualitätsmerkmal zu untersuchen und für das produzierende Unternehmen besonders praxisrelevant. In den Versuchen zeigte sich, dass die entwickelte LFE zu einer durchschnittlichen Zunahme der Foliendickenschwankung von ca. 3 % führt (**Bild 4**), je nach Prozesseinstellung auch weniger (in **Bild 4** rechts z.B. nur ca. 1,5 %).

Als ein Erklärungsansatz für die Zunahme der Foliendickenschwankung kann möglicherweise die Faltenbildung der luftführenden Membran dienen. Bei der Inbetriebnahme der entwickelten LFE zeigte sich, dass ein faltenfreies Einspannen der TPU-Membran nicht möglich war, sodass ein inhomogener Strömungsquerschnitt zwischen luftführender Membran und Folienblase entsteht. Bereiche mit einem großen Strömungsspalt führen zu

Prozessparameter	Einheit	niedriges Niveau				hohes Niveau			
Aufblasverhältnis BUR*	[-]	2,4				3,2			
Foliendicke d_{Folie}	[µm]	60				180			
Gebläseleistung $P_{Gebläse}$	[%]	50				100			
Schmelzetemperatur T_{sch}	[°C]	PE-LD 180	PE-LLD 190	PE-HD 200	PP 220	PE-LD 200	PE-LLD 210	PE-HD 200	PP 240

* BUR: blow-up ratio

Tabelle 1. Vollfaktorieller Versuchsplan Quelle: IKV

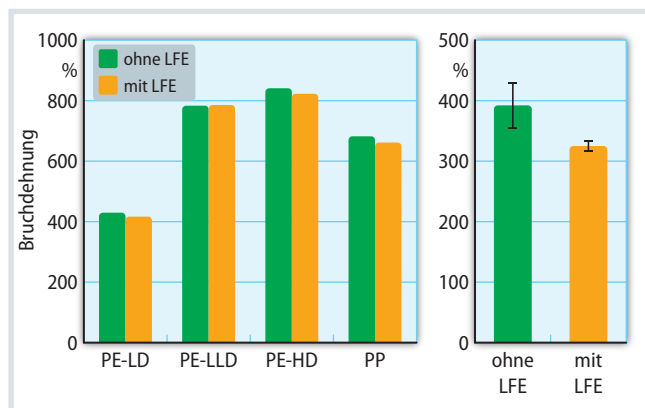


Bild 7. Der Einsatz der LFE führt im Vergleich zum konventionellen Prozess zu sinkenden Bruchdehnungen Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

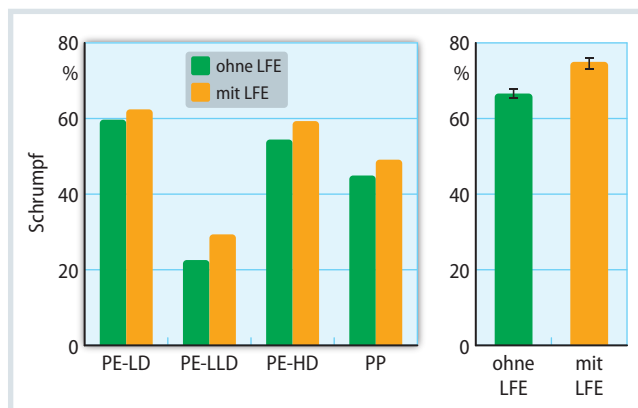


Bild 8. Der Einsatz der LFE führt im Vergleich zum konventionellen Prozess zu gesteigerten Schrumpfeigenschaften Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

geringeren Strömungsgeschwindigkeiten und somit zu einer schlechteren Kühlleistung als Bereiche kleinerer Strömungsspalte. In der Theorie wird die Folienblase in Bereichen eines großen Strömungsspalts in Extrusionsrichtung länger gedehnt, was zu Dünnstellen in der Folie führt.

Mechanische Folieneigenschaften

Während sich die Foliendickenschwankung durch den Einsatz einer Luftführungseinheit im Mittel leicht erhöht, zeigt die Luftführungseinheit auf die mechanischen Kennwerte hingegen einen positiven Einfluss. Bruchspannung und -dehnung wurden mit einer Universalprüfmaschine (Typ: Zwick Z10, Hersteller: Zwick-Roell GmbH & Co KG, Ulm) in einem Versuchsablauf nach DIN EN ISO 527-1 ermittelt. Die Einspannlänge der Proben, die mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von 200 mm/min belastet wurden, betrug 50 mm.

Bild 5 zeigt, dass die Bruchspannung in Extrusionsrichtung durch den Einsatz einer LFE im Durchschnitt zunimmt. Wie in **Bild 6** zu sehen ist, findet beim Einsatz der Luftführungseinheit eine frühzeitige Aufweitung der Folie statt, durch die sich die Folienblase bereits in der LFE zu einem früheren Zeitpunkt in ihrer Breite vollständig ausgebildet hat. Bis zum Erreichen der Frostlinie, die durch die Kristallisationstemperatur T_k des Kunststoffs charakterisiert ist, befindet sich der Folien Schlauch in einem schmelzeförmigen Zustand und kann daher in Extrusionsrichtung deutlich stärker verstreckt werden als im konventionellen Prozess. Dadurch ergeben sich innerhalb der Folie stärkere

Orientierungen, die eine Zunahme der Bruchspannung zur Folge haben. Die eingebrachten Orientierungen sorgen gleichzeitig dafür, dass die Folie bereits stärker vorgestreckt ist als im konventionellen Prozess ohne LFE. Als Folge kann die Folie bei Belastung nur zu einem geringeren Teil weiterverstreckt werden, sodass die Folien bei Verwendung der LFE eine geringere Bruchdehnung aufweisen als die konventionell hergestellten Folien (**Bild 7**).

Diese Zunahme der Orientierungen in Extrusionsrichtung lassen sich zudem über Schrumpfmessungen visualisieren. So zeigt **Bild 8** stärkere Schrumpfeigenschaften der Folie im Vergleich zum konventionellen Prozess. Im betrachteten Prozesspunkt (**Bild 8 rechts**) nimmt der Schrumpf der Folie mit LFE im Vergleich zum konventionellen Prozess um ca. 10 % zu. Bei den Schrumpfmessungen gilt: Je größer der Orientierungsgrad, desto größer ist der resultierende Schrumpf. Dies ist auf Relaxationsprozesse innerhalb der Folie zurückzuführen.

Fazit und Ausblick

Die Entwicklung einer flexiblen Luftführungseinheit in der Blasfolienproduktion erlaubt es, während des Extrusionsprozesses eine TPU-Membran mithilfe von Irisblenden an die Foliengeometrie anzupassen und so das Potenzial konventioneller Kühlringe signifikant zu erhöhen. So lässt sich der Venturi-Effekt unabhängig von Prozessparametern und eingesetzten Materialien gezielt hervorrufen, wodurch der Durchsatz im Vergleich zum konventionellen Prozess im Mittel um ca. 30 % steigt, die Dickenschwankung der Folie jedoch um durchschnittlich 3 % zu-

nimmt. Zudem erhöhen sich die Bruchspannungen sowie Schrumpfeigenschaften, während die Bruchdehnungen der hergestellten Blasfolie geringer ausfallen.

Um die Nutzung der Entwicklung innerhalb der Produktion zu erleichtern, sollte eine Regelung für den automatischen Betrieb der LFE entwickelt werden. Dazu gehören z.B. Konzepte, die eine automatische Anpassung des Strömungsspalts vorsehen, um ein Höchstmaß an Prozessstabilität zu gewährleisten und ein einfaches Anfahren des Prozesses zu ermöglichen. ■

Gleichungen

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

mit: \dot{Q} : Wärmestrom

A : Blasfolienoberfläche

α : Wärmeübergangskoeffizient

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen der Blasfolienoberfläche und der Kühlluft

$$\alpha_m = \frac{\lambda}{d} \cdot Nu(Re, Pr) \sim Re \quad (2)$$

mit: λ : Wärmeleitfähigkeit

d : charakteristische Länge

Nu : Nusselt-Zahl

Pr : Prandtlzahl

Re : Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (3)$$

mit: ρ : Dichte der Kühlluft

v : Strömungsgeschwindigkeit

η : dynamische Viskosität der Luft