

eingereicht/handed in: 14.05.2020
angenommen/accepted: 22.06.2020

Lars Kraus, M. Sc., Prof. Dr. -Ing. Christian Hopmann, Dr. -Ing. Martin Facklam
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen

Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion

Eine flexible Luftführungseinheit in der Blasfolienextrusion ermöglicht Massedurchsatzsteigerungen von mehr als 60 %. Die Entwicklung ummantelt dabei die Schlauchbildungszone und erzeugt einen Strömungsspalt zwischen Folienblase und einer flexiblen Membran. In diesem Spalt erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft, was zu einem erhöhten Wärmeentzug führt. Diese Erhöhung erzeugt im Spalt als Sekundäreffekt einen lokalen Unterdruck. Als Folge ergibt sich eine frühere Aufweitung der Folienblase im Vergleich zum konventionellen Prozess, wodurch der Wärmeentzug durch eine größere Oberfläche weiter gesteigert werden kann. Der Strömungsspalt lässt sich während des Extrusionsprozesses prozesspunktunabhängig an die aktuelle Blasengeometrie anpassen.

Increased cooling capacity when using a flexible air guiding system due to the Venturi effect in blown film extrusion

A flexible air guiding system in blown film extrusion enables a mass throughput increase of more than 60 %. The development encloses the bubble expansion zone and creates a flow gap between the film bubble and a flexible membrane. In this gap, the flow velocity of the cooling air can be increased, resulting in higher heat extraction. As a side effect, the increase in flow velocity creates a local vacuum in the gap, causing the film bubble to open earlier than in the conventional process. Because of this surface enlargement the heat extraction can be improved again. During the extrusion process, the flow gap can be adjusted to the current bubble geometry independent of the process parameters.

Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion

L. Kraus, Ch. Hopmann, M. Facklam

1 EINLEITUNG

Etwa ein Drittel aller Kunststoffprodukte sind Verpackungsartikel, die wiederum größtenteils aus Kunststofffolien bestehen [1]. Die Einsatzmöglichkeiten von Blasfolien erstrecken sich von einfachen Tragetaschen oder Abdeckplanen in der Landwirtschaft bis hin zu Hygiene- und medizinischen Artikeln wie Babywindeln oder Folien für Wundpflaster. Alle Produkte haben gemein, dass sie bei maximalen Massedurchsätzen hergestellt werden müssen, um eine maximale Effizienz der Produktionsanlage zu gewährleisten. Vor allem in Deutschland spielt die Effizienz aufgrund der meist niedrigeren Energie- und Arbeitskosten vieler Wettbewerber im Ausland eine noch größere Rolle. Die Produktionskapazität einer Blasfolienanlage korreliert dabei unmittelbar mit der Kühlleistung, da die Kühlstrecke zwischen Düsenaustritt und Folienflachlegung begrenzt ist. Vor der Flachlegung muss die Folie ausreichend abgekühlt werden, um ein Anhaften des zusammengelegten Folienschlauches zu verhindern. Zur Kühlung der Blasfolie wird bei konventionellen Blasfolienanlagen die Folie an der Blasenaußenseite mit Kühlluft angeströmt. Da die Schmelze in der Schlauchbildungszone jedoch nur eine materialabhängig begrenzte Schmelzefestigkeit aufweist, ist es nicht möglich die Gebläseleistung, also die Austrittsgeschwindigkeit der Kühlluft, beliebig zu steigern. Folgen einer zu hohen Austrittsgeschwindigkeit können Blaseninstabilitäten oder gar Folienabrisse sein. Ein Lösungsansatz, um solche Blaseninstabilitäten zu vermeiden, besteht im Einsatz sogenannter Luftführungseinheiten (LFE) [2]. Solche Systeme werden auf vorhandene Kühlringe aufgesetzt, ummanteln die Schlauchbildungszone und bilden dabei zwischen Folienblase und System einen Strömungsspalt, in welchem die vom Kühlring bereitgestellte Kühlluft beschleunigt wird. Nach Bernoulli kommt es zur Ausbildung des Venturi-Effekts, sodass die Beschleunigung der Kühlluft bei gleichem Volumenstrom eine Abnahme des statischen Druckes im Strömungsspalt verursacht. Diese Druckreduzierung erlaubt eine frühere Aufweitung der Folienblase und somit eine vergrößerte Oberfläche für die Wärmeabfuhr aus dem Folienschlauch. Die stetige Nachfrage nach mehr individualisierten Produkten führt heutzutage zu immer häufigeren Material- und Prozesswechseln, was in unterschiedlichen Blasengeometrien innerhalb der Produktion resultiert [3]. Bisher am Markt erhältliche Luftführungseinheiten sind in ihrer Flexibilität limitiert, sodass diese meist nur für eine prozess- und

materialabhängige Blasengeometrie optimiert sind. Ändert sich die Blasengeometrie, muss das starre System ersetzt werden, was zu unwirtschaftlichen Rüstzeiten und Anlagenstillständen führt. Vor diesem Hintergrund wird am IKV eine Luftführungseinheit mit einer anpassbaren Strömungsspaltgeometrie auf Basis einer flexiblen Luftführungsmembran entwickelt, um die Kühlleistung und somit den Massedurchsatz material- und prozesspunktunabhängig zu erhöhen.

Das Ziel der vorliegenden Veröffentlichung besteht in der Untersuchung einer möglichen Kühlleistungs-, bzw. Massedurchsatzsteigerung im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Wärmetransportmechanismen

Um das Abkühlverhalten von Blasfolien unmittelbar nach dem Werkzeugaustritt zu beschreiben, müssen die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung sowie die Konvektion als Wärmetransportmechanismen betrachtet werden. Die Wärmeleitung stellt den einfachsten Wärmetransportmechanismus dar, welche den Wärmefluss innerhalb eines Körpers beschreibt. Gemäß Gleichung 1 ist diese linear abhängig von der Wärmeleitfähigkeit λ [4]:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit: $\frac{\dot{Q}}{A}$: Flächenbezogene Wärmestromdichte
 λ : Werkstoffspezifische Wärmeleitfähigkeit
 $\frac{dT}{dx}$: Temperaturgradient orthogonal zu einer Fläche konstanter Temperatur

Wärmeleitung kann aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen in Extrusionsrichtung (axial) und über dem Blasfolienumfang (tangential) meist vernachlässigt werden. Bedingt durch die geringe Foliendicke ist die Wärmeleitung lediglich in Foliendickenrichtung (radial) signifikant relevant [5].

Anders als der Wärmetransport durch Wärmeleitung ist die Wärmestrahlung nicht an Materie gebunden, sondern beruht auf elektromagnetischer Emission. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt die durch Strahlung an die Umgebung abgegebene Wärme [4]:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{Gl. 2})$$

mit: \dot{Q} : Emittierte Wärme
 ε : Emissionsgrad

| | |
|------------|--|
| σ : | <i>Stefan-Boltzmann-Konstante</i> |
| A : | <i>Repräsentative Oberfläche des emittierenden Körpers</i> |
| T : | <i>Absolute Temperatur des emittierenden Körpers</i> |

Da Wärmestrahlung im Vergleich zu den anderen Wärmetransportmechanismen deutlich kleiner ausfällt, kann diese in der Regel bei der Blasfolienextrusion vernachlässigt werden.

Beim Wärmetransport durch die Oberfläche eines Körpers ist zudem die Biot-Zahl entscheidend. Die Biot-Zahl Bi ist definiert als [6]:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (\text{Gl. 3})$$

Hierbei entspricht α dem Wärmeübergangskoeffizienten des strömenden Fluids (Kühlluft), d der Foliendicke und λ der Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes [3]. Eine kleine Biot-Zahl besagt, dass Temperaturunterschiede innerhalb eines festen Körpers größer sind als in der Grenzschicht des Fluids, sodass eine Verbesserung des äußeren Wärmeübergangs, z.B. durch erzwungene Konvektion, den Prozess wesentlich beschleunigt. Aufgrund der sehr geringen Foliendicke durch biaxiale Verstreckvorgänge in der Schlauchbildungszone und der aktiven Folienkühlung (Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten) durch Kühlringe ist die Biot-Zahl in der Blasfolienextrusion meist kleiner als 0,1 [6], sodass der dominierte Wärmeübergangsmechanismus für die Kühlung der Folie die Konvektion ist. Gleichung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen der konvektiv abzuführenden Wärme und den davon abhängigen Größen [4, 7]:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 4})$$

| | | |
|------|--------------|---|
| mit: | \dot{Q} : | <i>Wärmestrom</i> |
| | A : | <i>Oberfläche der Blasfolie</i> |
| | α : | <i>Wärmeübergangskoeffizient</i> |
| | ΔT : | <i>Temperaturdifferenz zwischen der Blasenoberfläche und der Kühlluft</i> |

Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Kühlleistung sind demnach die Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche A (Oberfläche der Blasfolie), die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten α sowie die Vergrößerung der treibenden Temperaturdifferenz zwischen der Blasenoberfläche und der vom Kühlring bereitgestellten Kühlluft. Eine Verringerung der Kühllufttemperatur zur Vergrößerung der treibenden Temperaturdifferenz ΔT ist technisch möglich, führt aber sowohl zu hohen Kosten durch die entsprechende Kühlung als auch zu Kondensatbildung unterhalb des Taupunkts an kalten Anlagenteilen wie beispielsweise dem Kühlring oder der Blaseninnenkühlung (IBC). Diese Kondensate (Wasser, flüchtige Kunststoffbestandteile) können durch den Kühlluftstrom auf die Folie geschleudert werden und dort Fehlstellen verursachen [8, 9]. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist eine Funktion der Nusselt-Zahl, welche wiederum mit der Reynolds-Zahl und der Prandtl-Zahl korreliert. Da die Prandtl-Zahl lediglich verschiedene nicht beeinflussbare

Materialkennwerte vereint, lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient α und damit der Wärmestrom \dot{Q} durch eine Erhöhung der Reynolds-Zahl realisieren, indem die Strömungs-geschwindigkeit der Kühlluft gesteigert wird [10].

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot d}{\eta} \sim \alpha \quad (Gl. 5)$$

mit:

| | |
|----------|---------------------------------------|
| v : | Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft |
| ρ : | Dichte der Kühlluft |
| d : | charakteristische Länge |
| η : | dynamische Viskosität der Luft |

2.2 Kühlkonzepete in der Blasfolienextrusion

In der industriellen Praxis haben sich Kühlringe etabliert, welche die Folienblase mit Kühlluft anströmen. Die Kühlluft wird zuvor in einer Ringkammer durch Strömungskanäle gleichmäßig über den Folienumfang verteilt, sodass eine homogene Wärmeabfuhr aus der Blasfolie sichergestellt ist [11-13]. Um als Folienhersteller auf dem internationalen Markt auch in Zukunft konkurrenzfähig bleiben zu können, müssen bestehende Kühlringe stetig weiterentwickelt werden, sodass die kontinuierliche Optimierung der Kühlstrecke seit jeher einen zentralen Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung darstellt [14]. In der Vergangenheit wurden daher zahlreiche Studien mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluss aerodynamischer Phänomene und verschiedener Kühlringdesigns auf die Kühleffizienz bei der Blasfolienextrusion zu untersuchen. *Menges* und *Predöhl* befassten sich mit der Folienkühlung, um daraus auf die inneren Eigenschaften der Folie zurückzuschließen [7]. *Campbell*, *Obot* und *Cao* sowie *Sidiropoulos* und *Vlachopoulos* untersuchten die Aerodynamik der Luftströmung, um den Wärmetransport besser vorhersagen sowie die auf die Blase wirkenden Kräfte ermitteln zu können [5, 15-18]. Darüber hinaus standen Vergleiche zwischen Ein- und Doppellippenkühlringen hinsichtlich des Wärmeübergangs im Mittelpunkt der Untersuchungen. 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 [19]. Aufgrund der Gefahr eines Blasenabrisses bei zu hohen Kühlluftgeschwindigkeiten sind Maschinenbediener von Blasfolien-extrusionsanlagen häufig gezwungen, die Kühlluftgeschwindigkeiten und damit die Anlageneffizienz zu reduzieren. Zur Vermeidung solcher Blaseninstabilitäten können beispielsweise spezielle Kühlringdesigns verwendet werden, bei welchen z. B. ein zweiter Kühlring im Bereich einer höheren Schmelzefestigkeit platziert wird. Der Einsatz solch gestapelter Kühlsysteme ermöglicht einen deutlich gesteigerten Wärmetransport im Vergleich zu Ein- oder Doppellippenkühlringen [11]. Die Kaskadenkühlung ist eine Weiterentwicklung, die das beschriebene Stapelkühlsystem optimiert, indem starre Führungselemente zwischen den Kühlringen platziert werden, um die Kühlluft direkt an die Blasenoberfläche zu führen [11, 20].

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Kühlleistung in der Schlauchbildungszone sind sogenannte Luftführungseinheiten (LFE). LFE können auf vorhandene Kühlringe einer Blasfolienanlage aufgesetzt werden und führen die Kühlluft entlang eines speziell ausgelegten Strömungsspalt, Bild 1.

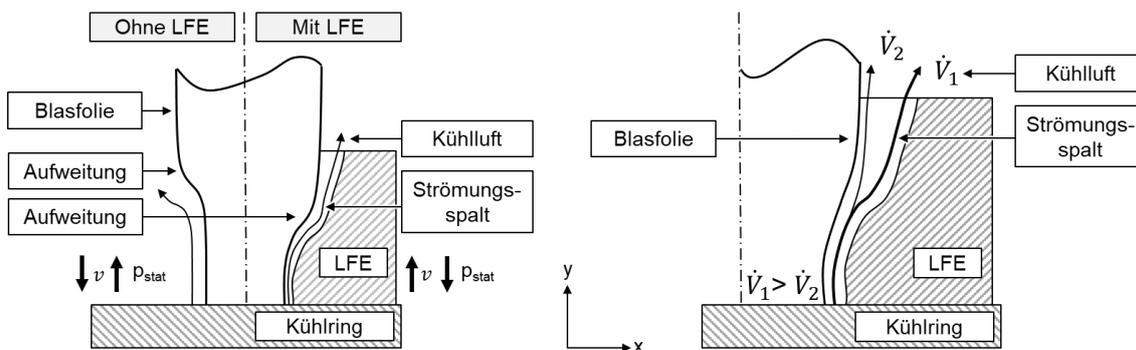


Bild 1: Schematische Darstellung des Venturi-Effektes (links) und des Coanda-Effektes (rechts) innerhalb einer LFE [21]

Es gibt einige Patente, die verschiedene Ausführungen einer LFE beschreiben [22-25]. Das Grundprinzip dieser Systeme ist nahezu immer dasselbe und basiert auf einer gezielten Beeinflussung des Strömungsspalt zwischen LFE und der Folienblase, um den Venturi-Effekt zu induzieren [26]. Der Venturi-Effekt ist eine Folge des Bernoulli-Gesetzes, welches besagt, dass die spezifische Energie eines Fluidteilchens entlang einer Stromlinie konstant ist [27]. Beim Durchströmen eines Fluids durch eine Rohrverengung steigt die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend der Kontinuitätsgleichung an, während der in der Verengung herrschende statische Druck abnimmt [5, 26, 27]:

$$E = \frac{1}{2}u^2 + \frac{p}{\rho} = \text{const.} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit: E : Spezifische Energie
 u : Geschwindigkeit des strömenden Fluids
 p : Statischer Druck
 ρ : Dichte des strömenden Fluids

Die Reduzierung des statischen Luftdruckes im Strömungsspalt führt zu einem Druckausgleich, sodass sich die Folienblase im Strömungsspalt früher aufweitet, Bild 1, links. Durch die frühzeitige Aufweitung der Blasfolie steht eine größere Wärmeaustauschfläche A zur Verfügung, was nach Gleichung 4 in einem höheren Wärmeentzug resultiert [28]. Eine weitere Kühlleistungssteigerung ergibt sich nach Gleichung 5 durch die gesteigerte Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft. Um den Venturi-Effekt optimal zu nutzen, muss der Strömungsspalt zwischen Folienblase und LFE möglichst schmal sein.

Neben dem Venturi-Effekt ist auch der Coanda-Effekt zu berücksichtigen. Der Coanda-Effekt tritt auf, wenn sich eine Strömung in unmittelbarer Nähe einer Oberfläche befindet. Die Strömung haftet an der Oberfläche und fließt teilweise entlang der Oberfläche, auch wenn diese nicht flach ist [16, 17]. Die rechte Darstellung in Bild 1 veranschaulicht den Coanda-Effekt. Der dargestellte Strömungsspalt zwischen Blasfolie und LFE nimmt in Extrusions(y)-Richtung zu, sodass sich als Folge dieser Zunahme eine ebenfalls steigende Oberfläche der LFE im Vergleich zur Oberfläche der Folienblase ergibt. Aufgrund des Coanda-Effekts haftet die Kühlluft primär an der größeren Oberfläche der Luftführungseinheit. Dadurch ergibt sich ein erhöhter Volumenstrom der Kühlluft entlang der LFE (V_1) im Vergleich zur Folienblase (V_2). Für eine effiziente Kühlung muss daher der Strömungsspalt, analog des Venturi-Effekts, ebenfalls möglichst schmal eingestellt werden.

3 ENTWICKLUNG EINER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT

Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung einer Blasfolienextrusionsanlage inklusive der am IKV entwickelten flexiblen Luftführungseinheit. Die Kunststoffschmelze verlässt das Blasfolienwerkzeug in Form einer Folienblase, welche in die auf dem Kühlring montierte Luftführungseinheit gelangt. In dieser bildet die Blasfolie mit einer dehnbaren und transparenten thermoplastischen Polyurethan(TPU)-Membran (vom Typ Desmopan 3690 AU der Covestro AG, Leverkusen, Deutschland) einen Strömungsspalt. Durch die Dehnbarkeit der Membran ist diese dazu geeignet, ihre Form an die prozessbedingt sich verändernde Foliengeometrie anzupassen. Die Einstellung der Membran erfolgt mittels sechs in Extrusionsrichtung gestaffelter Irisblenden, welche in der Lüftungs- und Klimabranche eingesetzt werden. Statt ihrem eigentlichen Einsatzzweck, der Führung und Regulierung von Luftströmungen, werden diese zur mechanischen Verstellung der luftführenden Membran eingesetzt. Jede Irisblende ist im Durchmesser individuell verstellbar. Die Aufgabe der Irisblenden ist es, die Kontur der Membran entsprechend der aktuellen Blasengeometrie anzupassen, sodass sich ein Strömungsspalt ergibt, welcher eine ausgeprägte Venturi-Strömung ermöglicht sowie den Coanda-Effekt optimal ausnutzt.

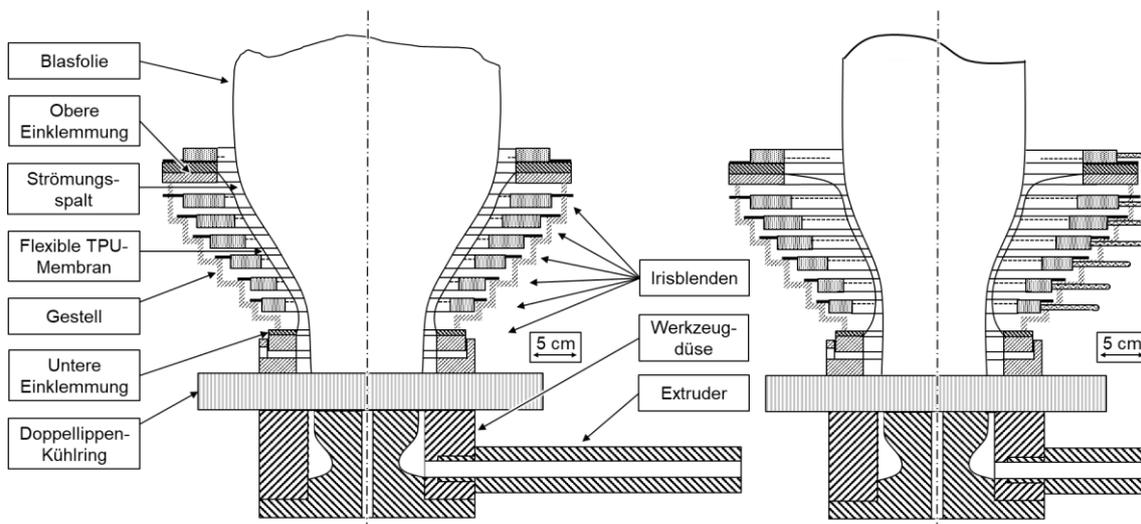


Bild 2: Schematische Ansicht einer LFE: Großes Aufblasverhältnis (links), kleines Aufblasverhältnis (rechts)

Neben den Irisblenden, welche für die Verstellung der luftführenden Membran eingesetzt werden, kommt eine weitere Irisblende (Coanda-Blende) oberhalb der oberen Membraneinklemmung zum Einsatz, welche mit ihren Lamellen den Strömungsspalt überragt. Die Lamellen drosseln die an der Membran haftende Kühlluft, sodass diese verwirbelt und Richtung der Folie geführt wird, wodurch sich der Wärmeentzug an der Blasfolienoberfläche verbessert, Bild 3.

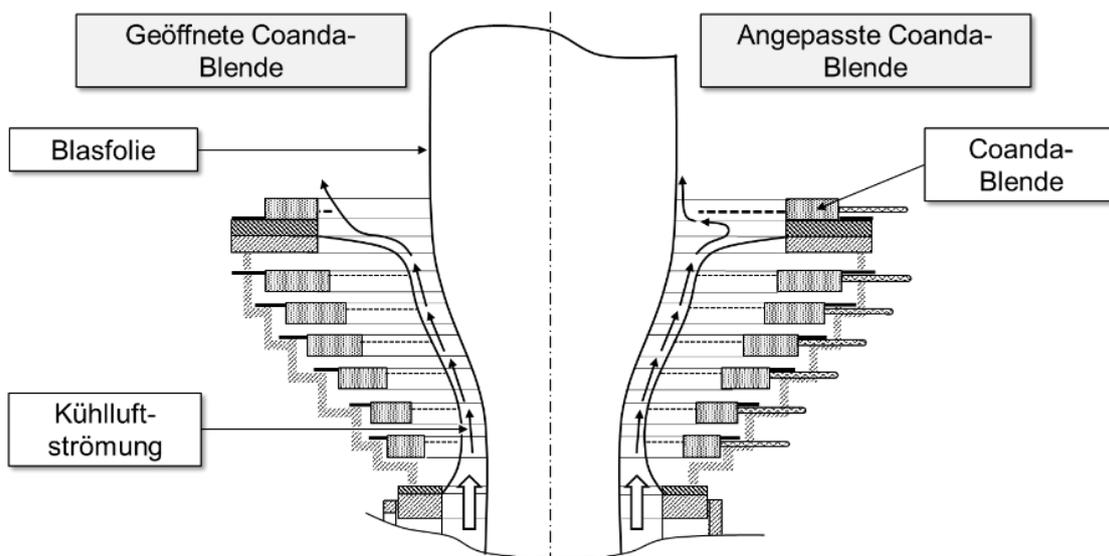


Bild 3: Optimierung der Kühlleistung durch gezieltes Umlenken der Kühlluft auf die Folienblase

4 ANLAGENTECHNIK

Die Extrusionsversuche wurden auf einer Blasfolienextrusionsanlage der Firma Kuhne Anlagenbau, St Augustin, Deutschland, mit der Typenbezeichnung KFB 45/600 durchgeführt. Die Extrusionsanlage besteht aus zwei 45 mm-Einschneckenextrudern mit 3-Zonen-Schnecken, einschließlich Scher- und Mischelementen zur Homogenisierung der Schmelze. Die Dosierung aller Extruder erfolgt über eine gravimetrische Dosiereinheit der Plast-Control GmbH, Remscheid, Deutschland. Die Schmelze wird von den Extrudern in einen Radialwendelverteiler mit einem Düsendurchmesser von 80 mm gefördert. Für die Untersuchungen wurde ein Düsenpalt von 1,5 mm mit einer Bügelzonenlänge von 8 mm verwendet. Als Material kam ein PE-LD (2102 NOW) der Sabic Europe B. V., Geleen, Niederlande, zum Einsatz, Tabelle 1 [29]. Die Ausstoßleistung der Anlage variiert je nach Prozesspunkt zwischen ca. 15 kg/h und 40 kg/h.

| Eigenschaften | Einheit | Wert | Testmethode |
|---|-------------------|------|--------------|
| Schmelzflussrate (MFR) bei 190 °C und 2,16 kg | dg/min | 2,5 | ISO 1133 |
| Dichte | kg/m ³ | 921 | ISO 1183 (A) |
| Reißfestigkeit TD | kN/m | 25 | ISO 6383-2 |
| Reißfestigkeit MD | kN/m | 70 | ISO 6382-2 |
| Vicat-Erweichungstemperatur bei 10 N (VST/A) | °C | 91 | ISO 306 |

Tabelle 1: Eigenschaften des verwendeten PE-LD 2102 NOW

5 INBETRIEBNAHME UND VORVERSUCHE

5.1 Einstellung der Coanda-Blende

In einem ersten Schritt war es notwendig, die Kühlluftströmung innerhalb der LFE hinsichtlich der Ausprägung des Coanda-Effektes zu untersuchen, um herauszufinden, inwiefern ein Anhaften der Kühlluft an der Membranoberfläche durch die beschriebene Coanda-Blende zu vermeiden ist. Dafür wurde bei einer Schmelzetemperatur $T_{\text{Schmelze}} = 190 \text{ °C}$, einer Foliendicke $d_{\text{Folie}} = 120 \text{ }\mu\text{m}$, einer Gebläseleistung $P_{\text{Gebläse}} = 75 \text{ \%}$ und variierenden Ausblasverhältnissen (BUR) die Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft am Austritt der LFE bei offener und angepasster Coanda-Blende mithilfe eines Anemometers des Typs 435-4 der Firma Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Deutschland, charakterisiert. Bild 4 zeigt den Aufbau des Messstandes sowie die Strömungsgeschwindigkeiten bei „geöffneter“ und „angepasster“ Coanda-Blende bei

verschiedenen Aufblasverhältnissen. Für den dargestellten Fall bedeutet „Blende angepasst“, dass die Coanda-Blende soweit geschlossen wurde, bis sich ein definierter Strömungsspalt von ca. 20 mm zwischen den Lamellen der Blende und der Blasfolie einstellte. Ein weiteres Schließen war aufgrund von Blasendeformationen nicht möglich. Die Irisblenden zur Anpassung der Membrangeometrie waren im Rahmen dieser Versuchsreihe vollständig geöffnet, um ausschließlich den Einfluss der Coanda-Blende auf die Strömungsgeschwindigkeiten und deren Streuung über dem Umfang der LFE analysieren zu können. In der Untersuchung zeigte sich eine große Variation der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bei relativ großen Standardabweichungen, sodass in der nachfolgenden Analyse nur von einer Tendenz und nicht von einer Signifikanz gesprochen werden kann. Tendenziell zeigt sich, dass die Strömungsgeschwindigkeiten bei geöffneter Blende innen, d.h. in der unmittelbaren Nähe der Blasenoberfläche, mit größeren Ausblasverhältnissen ansteigen. Dies ist auf die Ausbildung des Coanda-Effektes zurückzuführen [27].

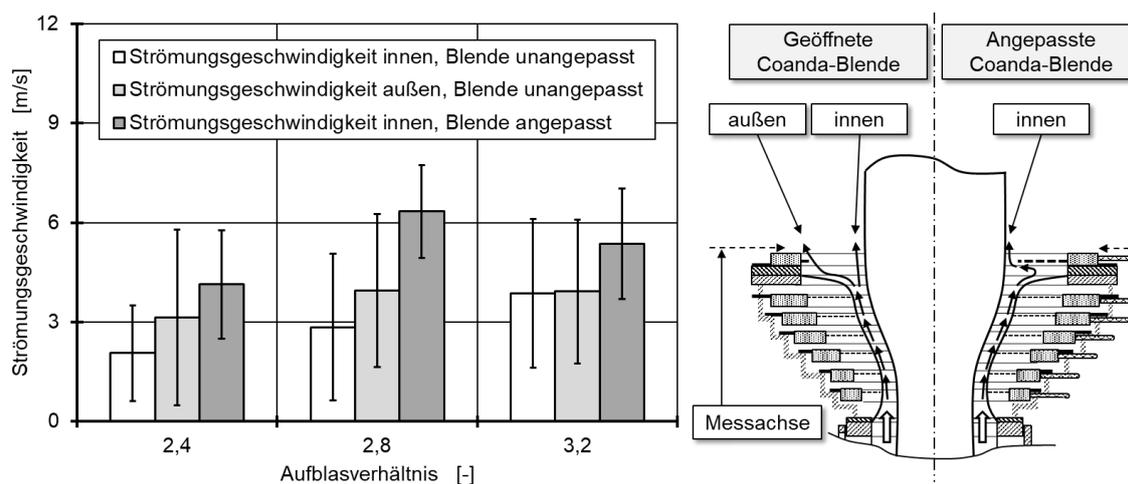


Bild 4: Strömungsgeschwindigkeit am LFE-Austritt bei unangepasster und angepasster Coanda-Blende

Da bei einem steigendem Ausblasverhältnis eine größere Blasenoberfläche für die Haftung der Kühlluft zur Verfügung steht und sich die Fläche der umliegenden Membran nicht ändert, erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit, während die Strömungsgeschwindigkeit außen in Membrannähe weitestgehend unverändert bleibt. Unabhängig vom Aufblasverhältnis stellt sich bei geöffneter Coanda-Blende im äußeren Bereich der luftführenden Membran tendenziell stets eine höhere Strömungsgeschwindigkeit als im Bereich der Blasfolienoberfläche ein, was ebenfalls auf den Coanda-Effekt zurückzuführen ist. Werden dazu vergleichend die Strömungsgeschwindigkeiten bei angepasster Blende betrachtet, befinden sich diese tendenziell auf einem stets höheren Niveau, weshalb von einer höheren Konvektion und damit einer höheren Kühlleistung ausgegangen werden kann. Weiterhin sind die etwas geringeren Standardabweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten bei

angepasster Blende im Vergleich zu jenen bei unangepasster Blende zu beachten, sodass die Coanda-Blende für die spätere Versuchsdurchführung für alle Versuchspunkte auf einen Strömungsspalt von 20 mm angepasst wurde.

5.2 Digitales Bildverarbeitungssystem zur Detektion der Blasenkontur in der Schlauchbildungszone

Das Ziel dieser Veröffentlichung besteht in der Untersuchung einer möglichen Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion. Wie im Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, kommt es durch die Ausbildung des Venturi-Effekts zu einer Reduzierung des statischen Druckes im Strömungsspalt, was zu einer frühzeitigen Aufweitung der Blasfolie innerhalb der LFE führt. Um diese Oberflächenvergrößerung in eine quantitative Messgröße zu überführen, ist die optische Vermessung der Blasfolie notwendig. Für die optische Erfassung der Blasenoberfläche wurde die Blasengeometrie mit einer hochauflösenden Digitalkamera des Modells GO-5000M-PGE der Firma JAI A/S, Kopenhagen, Dänemark, detektiert. Die Kamera wurde in einem Abstand von ca. 1,5 m zur Blasfolie platziert, um die gesamte Schlauchbildungszone innerhalb der LFE erfassen zu können, Bild 5.

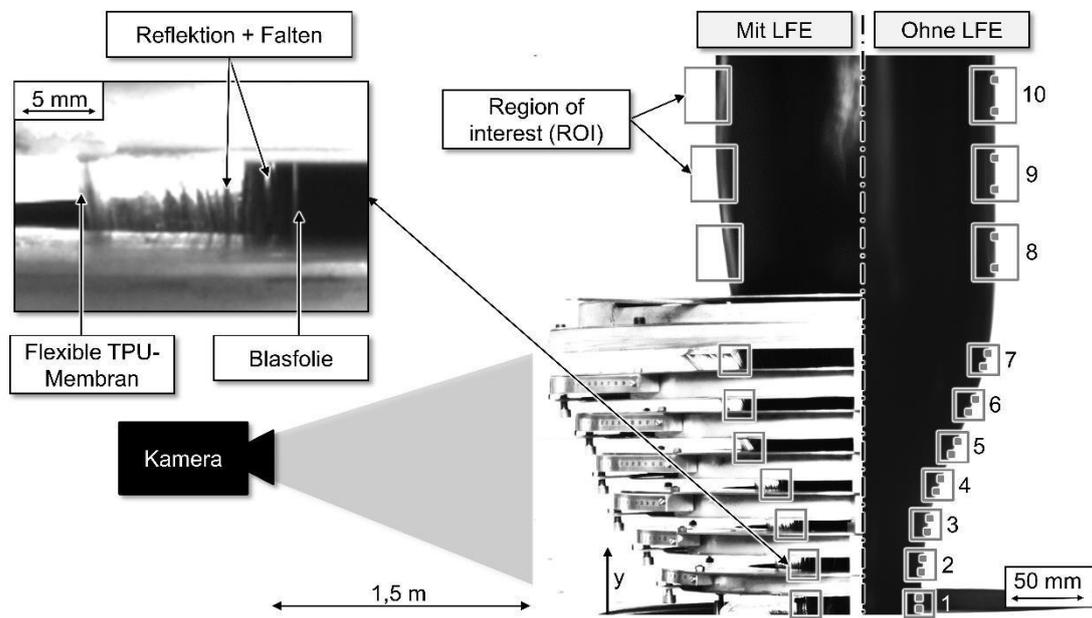


Bild 5: Messsystem zur Erfassung der Blasengeometrie [21]

Zur Erhöhung des Kontrasts zwischen der Foliengeometrie wurde der Kunststoff (PE-LD 2102 NOW) mit einem rußhaltigen Masterbatch vom Typ Polyblak 1850 der Firma LyondellBasell (ehemals A. Schulman, Kerpen, Deutschland) eingefärbt [30]. Darüber hinaus wurde das Prinzip der

Gegenlichtaufnahme verwendet, um den Kontrast zwischen der Folienblase und dem Hintergrund zu verstärken. Die Blasengeometrie wurde mit einer Bildfrequenz von einem Bild pro Sekunde über einen Zeitraum von 60 Sekunden aufgenommen und aus einer Reihe von Stützpunkten rekonstruiert, die manuell mit MATLAB (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA) identifiziert wurden. Für jedes Bild wurden Datensätze von Koordinatenpaaren erzeugt, die eine Seite der Blasenkontur darstellen. Dies ist aufgrund der Rotationssymmetrie der Blase zulässig. Bei insgesamt zehn vordefinierten Bildbereichen auf einer Seite ergaben sich somit 20 Bildpunkte, welche die Grundlage für ein Polynomfitting bildeten, Bild 5. Um eine Konturdetektion mit Subpixelgenauigkeit zu ermöglichen, wurden die vordefinierten Bildbereiche (Region of Interest, ROI) vergrößert dargestellt, während die Stützpunkte manuell detektiert wurden. Der Vorteil der Vergrößerung besteht in der Möglichkeit, beim Hochskalieren des Bildes die Grauwerte zu interpolieren. Dies ermöglicht die Erzeugung „neuer“ Pixel, deren Grauwerte durch eine bicubic-Interpolation berechnet werden, was die Beurteilung des Übergangs von Schwarz auf Weiß verbessert, wodurch eine Subpixelgenauigkeit erzielt werden kann. Um die Blasengeometrie als eine Funktion der Höhe (y) zu modellieren, schlägt *Spirgatis* ein Polynom fünften Grades vor [20], welches sich auch in diesem Anwendungsfall als die optimale Anpassung der Messwerte herausstellte. Mithilfe einer Kalibrierungsskala, die neben der Folienblase platziert wurde, konnten die Pixelkoordinaten zudem in metrische Einheiten transformiert werden. Bild 5 zeigt die Blasengeometrie mit und ohne LFE. Es ist ersichtlich, dass die Foliengeometrie bei der konventionellen Blasfolienextrusion ohne LFE aufgrund des hohen Kontrasts zwischen der Folienblase und dem beleuchteten Hintergrund sehr genau erfasst werden konnte. Eine Herausforderung lag in der Erfassung der Foliengeometrie mit LFE. Die Stauchung der luftführenden Membran durch die Irisblenden führte zu einer Faltenbildung der Membran und damit zu einer Brechung des von der Blasenkontur reflektierten Lichtes.

5.3 Beurteilung der Kühlleistungssteigerung durch eine flexible Luftführungseinheit

Mit der Möglichkeit der quantitativen Detektion der Foliengeometrie war es in einem weiteren Schritt notwendig, eine Methodik zur Beurteilung der Kühlleistung der flexiblen Luftführungseinheit zu entwickeln. Dafür eignet sich die Frostlinienhöhe, welche durch die Kristallisationstemperatur T_K des Kunststoffes charakterisiert ist. Für eine maximale Kühlleistung war es wichtig, dass sich die gesamte Schlauchbildungszone innerhalb der LFE befand. Demnach sollte die Höhe der Frostlinie in etwa der Höhe des LFE-Austrittes ($H_F = 290$ mm) liegen. Die Frostlinie wurde daher für alle Versuchspunkte, d. h. mit und ohne LFE, auf entsprechender Höhe H_F gehalten, Bild 6. Bei einem direkten Vergleich eines Prozesspunktes mit und ohne LFE unterscheidet sich die Versuchsdurchführung lediglich im Durchsatzverhalten der Extruder. Führt

die LFE zu einer verbesserten Kühlleistung, sinkt die Frostlinienhöhe bei sonst gleichen Prozessparametern. Für einen direkten Vergleich der Durchsätze muss der Durchsatz entsprechend solange gesteigert werden, bis die vordefinierte Frostlinienhöhe H_F wieder erreicht ist. Aufgrund der Einfärbung des Materials mit Ruß war eine visuelle Detektion der Frostlinie nicht möglich, sodass eine neue Referenzgröße eingeführt werden musste. Bei PE-LD entspricht die Frostlinientemperatur in der Regel ca. $100\text{ }^\circ\text{C}$. Da eine Temperaturmessung innerhalb der LFE aus Gründen der Zugänglichkeit nicht möglich war, wurde eine niedrigere Temperatur oberhalb der LFE gemessen.

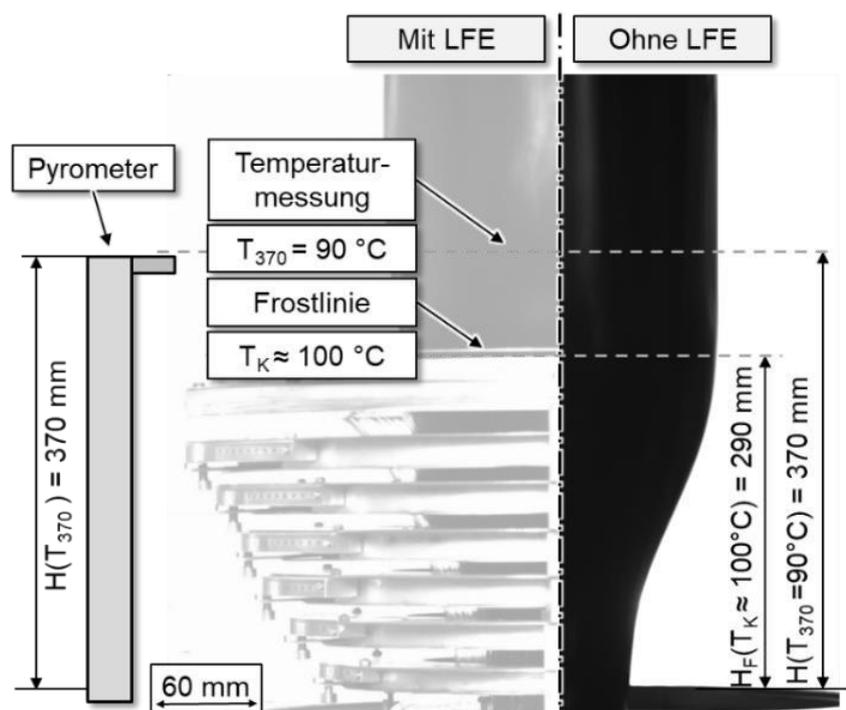


Bild 6: Beurteilung der Effizienz der flexiblen Luftführungseinheit

Die Temperaturmessung erfolgte mit einem Infrarot-Pyrometer des Typs Semi/Temp 6080 der Firma SIKA Dr. Siebert & Kühn GmbH & Co. KG, Kaufungen, Deutschland. Die Versuchsreihen zeigten, dass die Frostlinie bei einer Temperatur von $90\text{ }^\circ\text{C}$ und einer Messhöhe von 370 mm oberhalb des Düsenaustrittes noch gerade in der LFE lag, Bild 6, sodass als Referenzgröße für die Vergleichbarkeit der Prozesspunkte eine Messtemperatur von $T_{370} = 90\text{ }^\circ\text{C}$ herangezogen wurde.

6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Nach der strömungstechnischen Untersuchung hinsichtlich der Vermeidung des Coanda-Effektes, dem Aufbau eines digitalen Bildverarbeitungssystems zur

Detektion der Blasenkontur und der Ermittlung einer Beurteilung des Kühlpotentials der flexiblen Luftführungseinheit folgt im Weiteren die Untersuchung des entwickelten Systems hinsichtlich einer Oberflächenvergrößerung der Folienblase innerhalb der LFE durch die Ausbildung des Venturi-Effektes und der dadurch möglichen Massedurchsatzsteigerung im Vergleich zum konventionellen Extrusionsprozess. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Central Composite Design CCD verwendet, welcher die Bestimmung von quadratischen Effekten ermöglicht, Tabelle 2.

| Prozessparameter | Einheit | Variationsstufe | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------|-----|-----|
| | | -1 | 0 | 1 |
| Aufblasverhältnis BUR | [-] | 2,4 | 2,8 | 3,2 |
| Foliendicke d_{Folie} | [μm] | 60 | 120 | 180 |
| Gebläseleistung $P_{\text{Gebläse}}$ | [%] | 50 | 75 | 100 |

Tabelle 2: Versuchsplan: Central Composite Design CCD

6.1 Oberflächenvergrößerung durch die Ausbildung des Venturi-Effekts

Bild 7 zeigt die mittlere Blasfoliengeometrie mit und ohne LFE über alle Versuchspunkte. Die y-Achse zeigt den Abstand der extrudierten Folie vom Düsenaustritt, während die x-Achse den Radius der Blasfolie darstellt. Die Folie weitet sich im konventionellen Blasfolienprozess mit zunehmendem Abstand vom Düsenaustritt auf und erhält bei einer Höhe von ca. 400 mm die endgültige Breite. Vergleichend ist ebenfalls der Verlauf der Foliengeometrie bei Verwendung der LFE zu sehen. Ersichtlich ist, dass sich die Folie wesentlich früher aufweitet und bis zu ihrer endgültigen Breitenfixierung eine stets höhere Breite in der Schlauchbildungszone aufweist. Zurückzuführen ist dies auf den in der LFE wirkenden Venturi-Effekt, welcher die Folie im Bereich der Schlauchbildungszone bereits frühzeitig durch das Erzeugen eines lokalen Unterdrucks ansaugt. Die in Bild 7 dargestellte frühzeitige Aufweitung der Folienblase zeigt lediglich die mittlere Foliengeometrie über alle Prozesspunkte und erlaubt somit keine Aussagen über die Ausprägung des Venturi-Effektes und der damit einhergehenden Oberflächenvergrößerung in Abhängigkeit von den untersuchten Prozessparametern. Daher wurde zusätzlich eine Effektanalyse durchgeführt, um die Auswirkung der Prozessparameter Aufblasverhältnis, Foliendicke und Gebläseleistung auf die Oberflächenvergrößerung zu untersuchen.

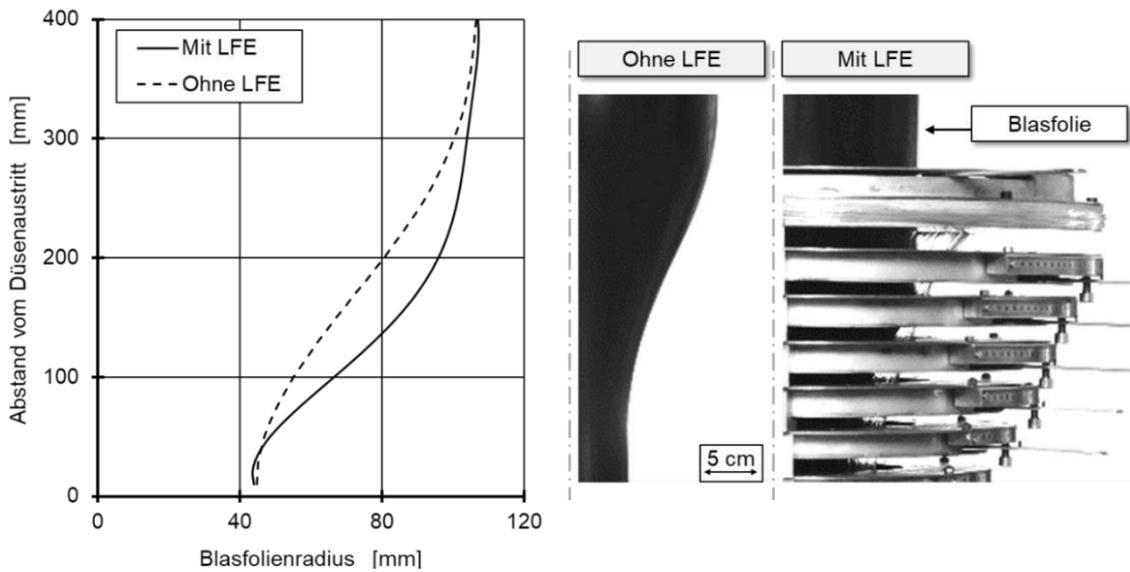


Bild 7: Der Venturi-Effekt verringert den statischen Druck und führt zu einer Oberflächenvergrößerung der Folienblase [21]

Bild 8 zeigt den Einfluss der genannten Prozessparameter auf die Oberflächenvergrößerung der Folie durch den Einsatz der LFE im Vergleich zum konventionellen Extrusionsprozess. Statistisch signifikante Einflüsse sind zum besseren Verständnis schraffiert dargestellt. Die Signifikanz ist über den p-Wert definiert, welcher im Untersuchungsrahmen kleiner 0,05 (Vertrauensniveau größer 95 %) definiert wurde [31].

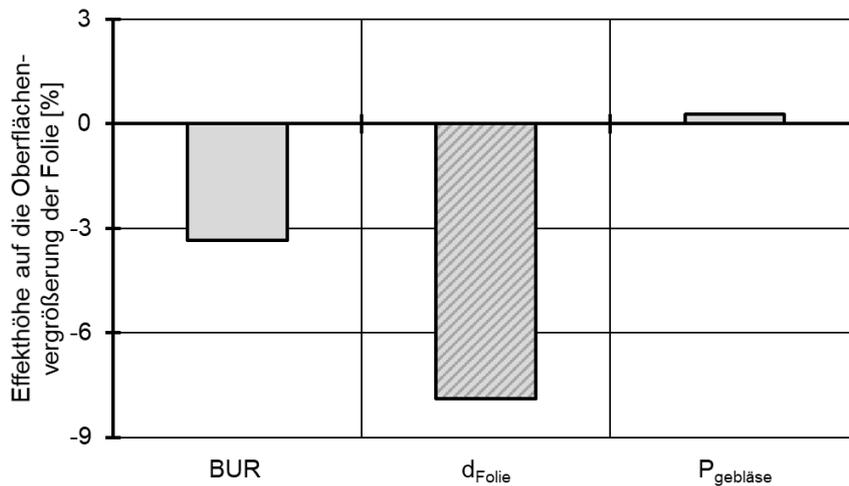


Bild 8: Einfluss der Prozessparameter auf die Oberflächenvergrößerung der Folie

Die dargestellte Steigerung bzw. Abnahme der Blasenoberfläche bezieht sich dabei auf die Erhöhung des dargestellten Prozessparameters um eine Variationsstufe, vgl. Tabelle 2. Im konkreten Fall bedeutet dies beispielsweise für die Foliendicke, dass die Oberflächenzunahme bei einer Foliendicke von

120 μm (Variationsstufe 0) um ca. 7,8 % geringer ausfallen wird als bei einer Foliendicke von 60 μm (Variationsstufe -1). Die Zunahme der Blasenoberfläche würde demnach bei einer Änderung der Foliendicke um 2 Variationsstufen bei einer Foliendicke von 180 μm (Variationsstufe +1) um ca. 15,6 % geringer ausfallen als bei einer Foliendicke von 60 μm (Variationsstufe -1).

Einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Oberflächenvergrößerung der Folie zeigt nur die Foliendicke, sodass eine dickere Folie zu einer Abnahme und eine dünnere Folie zu einer Zunahme der Blasenoberfläche führt. Der Venturi-Effekt reduziert innerhalb des Strömungsspaltens den statischen Druck, sodass sich die Blase aufgrund des Druckgefälles zwischen Blaseninnerem und Strömungsspalt früher aufweitet. Eine dünnere Folie erzeugt einen kleineren Widerstand gegenüber einer Deformation, sodass sich diese aufgrund des Druckgefälles stärker aufweiten kann als eine dickere Folie. Die frühzeitige Aufweitung einer dünneren Folie zeigt Bild 9.

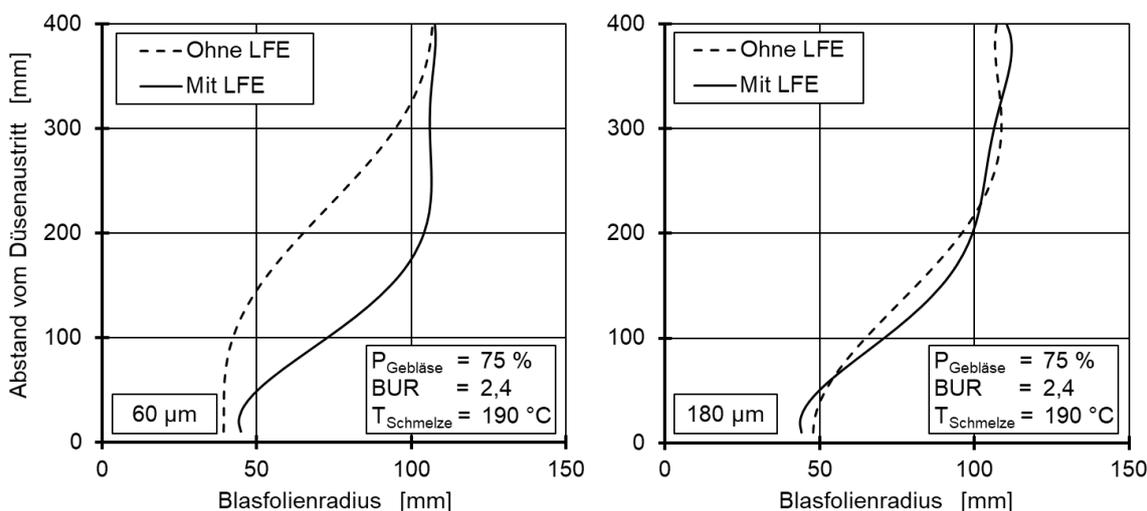


Bild 9: Einfluss der Foliendicke und der LFE auf die Foliengeometrie innerhalb der Schlauchbildungszone

In diesem Bild wird zudem deutlich, dass sich eine dünnere Folie im konventionellen Extrusionsprozess wesentlich später aufweitet als eine dickere Folie. Ähnlich wie zuvor beschrieben, stellt die dünnere Folie einen geringen Widerstand gegenüber einer Deformation dar. Die vom Kühlring bereitgestellte Luft trifft auf die Blase und übt dabei eine Kraft auf diese aus, welche die Blase deformiert und daher in ihrer Aufweitung hindert. Bei gleicher Gebläseleistung und damit bei einem gleichen Kraffteintrag kann die Blase bei einer dünneren Folie stärker verformt werden, sodass die Blase zu einem späteren Zeitpunkt ihre Endfolienbreite erreicht hat.

Sowohl das Aufblasverhältnis als auch die Gebläseleistung zeigen keine statistisch signifikanten Effekte. Tendenziell führt ein geringes Aufblasverhältnis zu einer vergrößerten Blasenoberfläche. Dies kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Die Oberfläche einer Blasfolie ist bei einem großen BUR

größer als die Oberfläche einer Folie mit geringerem BUR, sodass eine frühzeitige Öffnung der Folienblase bei geringen BUR eine relativ gesehen höhere Oberflächenvergrößerung zur Folge hat. Weiterhin ergibt sich konstruktiv bedingt bei gleicher Strömungsspalteneinstellung bei einem kleineren BUR eine geringere Strömungsspaltquerschnittsfläche, was bei einem konstanten Kühlluftvolumenstrom eine höhere Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft verursacht. Aufgrund dessen reduziert sich nach der Bernoulli-Gleichung (vgl. Gleichung 6) der statische Druck, sodass sich die Folie stärker aufweiten kann. Dieser tendenzielle Effekt ist ebenfalls bei einer gesteigerten Gebläseleistung ersichtlich, bei welcher eine Zunahme der Gebläseleistung zu einer Oberflächenvergrößerung der Folie führt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass der Einsatz einer LFE die Blasengeometrie innerhalb der Schlauchbildungszone quantitativ messbar beeinflusst, sodass der Venturi-Effekt durch die Senkung des statischen Drucks prozessparameterabhängig zu einer unterschiedlich ausgeprägten Vergrößerung der Blasenoberfläche führt.

6.2 Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit

Mit der dargestellten Oberflächenvergrößerung der Folie durch den Einsatz der LFE galt es im Weiteren zu klären, wie sich die LFE auf eine mögliche Durchsatzsteigerung auswirkt. Auf Basis der Ergebnisse des Versuchsplans aus Tabelle 2 wurde mit Hilfe des Statistik Programms Visual-XSel der Firma CRGRAPH (GbR), Starnberg, Deutschland, Korrelationen hergeleitet, welche den Einfluss des jeweiligen Prozessparameters in Abhängigkeit vom Massedurchsatz mit und ohne LFE beschreiben. Bild 10 zeigt die Auswirkungen der oben genannten Parameter auf die Steigerung des Massedurchsatzes durch den Einsatz einer LFE. Nicht betrachtete Größen befinden sich jeweils im Zentralpunkt. Die ermittelten Durchsätze variierten je nach Prozesspunkt mit und ohne LFE zwischen ca. 15 kg/h und 40 kg/h.

Es ist zu erkennen, dass sich ein steigendes Aufblasverhältnis negativ auf die Durchsatzsteigerung auswirkt. Im Vergleich zum konventionellen Prozess ergibt sich die höchste Durchsatzsteigerung von ca. 46 % bei einem niedrigen Aufblasverhältnis. Das Potenzial der LFE sinkt mit steigendem Aufblasverhältnis annähernd linear auf eine Durchsatzsteigerung von ca. 21 %. Nach Gleichung 4 lässt sich der Wärmeentzug aus der Folie durch eine Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche A steigern. Bild 8 zeigte, dass die LFE bei einem kleinen BUR zu der größten Oberflächenvergrößerung der Folienblase und somit zu der größten Zunahme der Wärmeaustauschfläche A führt, was die erhöhten Durchsatzsteigerungen bei einem kleinen BUR erklärt.

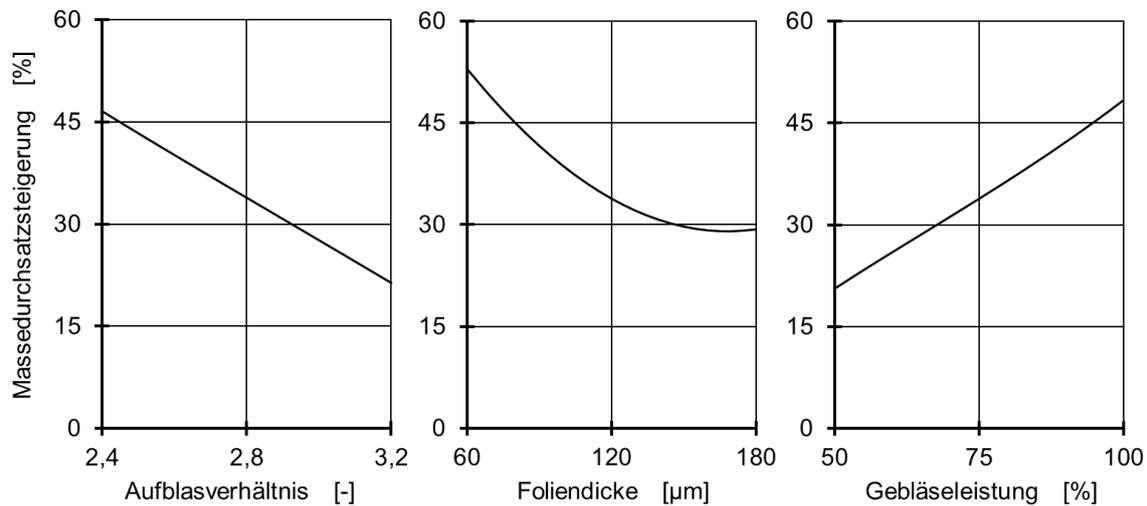


Bild 10: Einfluss der Prozessparameter auf die Massedurchsatzsteigerung

Die Foliendicke verhält sich ähnlich wie das Aufblasverhältnis, sodass ein Anstieg des Parameters zu einer Abnahme der Durchsatzsteigerung führt. Die größte Durchsatzsteigerung von mehr als 50 % ist bei dünnen Folien möglich. Minimale Durchsatzsteigerungen von ca. 30 % ergeben sich bei einer maximalen Foliendicke. Der Venturi-Effekt ist bei dünnen Folien aufgrund der geringeren Widerstandskraft gegenüber einer Deformation im Vergleich zu dickeren Folien ausgeprägter, sodass sich bei dünneren Folien die größte Oberflächenvergrößerung im Vergleich zum konventionellen Prozess einstellt, Bild 8. Wie in Kapitel 2.1 zudem bereits erwähnt, ist die Wärmeleitung wegen der geringen Foliendicke in Foliendickenrichtung (radial) nicht zu vernachlässigen [5]. Je dünner die Folie, desto größer ist der Anteil an Wärmeleitung. Aufgrund der Geschwindigkeitserhöhung der Kühlluft durch den Einsatz einer LFE kann nach Gleichung 5 der Wärmeübergangskoeffizient α gesteigert werden, sodass bei dünneren Folien demnach mehr Wärme entzogen werden kann, was erhöhte Durchsatzsteigerungen zur Folge hat.

Ein Anstieg der Gebläseleistung führt zu einem linearen Anstieg der Durchsatzsteigerung. Bei niedrigen Gebläseleistungen kann die Durchsatzsteigerung der Entwicklung mit ca. 20 % angegeben werden. Wird die Gebläseleistung erhöht, kann das Potenzial auf 50 % gesteigert werden. Die Durchsatzsteigerung ist ebenfalls nach Bild 8 auf die tendenziell stärkere Ausbildung des Venturi-Effektes zurückzuführen, welcher eine Reduktion des statischen Druckes verursacht und damit zu einer größeren Aufweitung der Folie bei größeren Gebläseleistungen führt.

Das Potential der entwickelten LFE ist nach Bild 10 demnach von den gewählten Prozessparametern abhängig, sodass eine maximale Steigerung des Massedurchsatzes bei geringen Aufblasverhältnissen, geringen Foliendicken sowie hohen Gebläseleistungen möglich ist. An dieser Stelle ist zudem zu ergänzen, dass der Einsatz der entwickelten LFE über alle Versuchspunkte hinweg zu einer erhöhten Durchsatzsteigerung führte. Im Mittel lag die

Durchsatzsteigerung über dem gesamten Versuchsumfang bei ca. 32 %. Maximale Durchsatzsteigerungen von bis zu 62 % im Vergleich zum konventionellen Blasfolienextrusionsprozess ergaben sich bei geringen Aufblasverhältnissen, geringen Foliendicken sowie hohen Gebläseleistungen. Die geringste Durchsatzsteigerung lag bei ca. 5 %.

Die dargestellte Zunahme des Massedurchsatzes ist wie bereits beschrieben auf zwei Effekte zurückzuführen. Einerseits führt der Strömungsspalt innerhalb der LFE aufgrund einer Querschnittsverengung zu einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit, was zu einem verbesserten Wärmeübergang infolge der Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten führt. Andererseits ergibt sich aufgrund dieser Strömungsgeschwindigkeitserhöhung ein lokaler Unterdruck außerhalb der Folienblase in der Schlauchbildungszone, was eine Oberflächenvergrößerung der Folie zur Folge hat. Bild 11 zeigt daher die Zunahme des Massedurchsatzes als Funktion der Blasenoberflächenvergrößerung durch den Venturi-Effekt bei Einsatz einer LFE über alle Prozesspunkte.

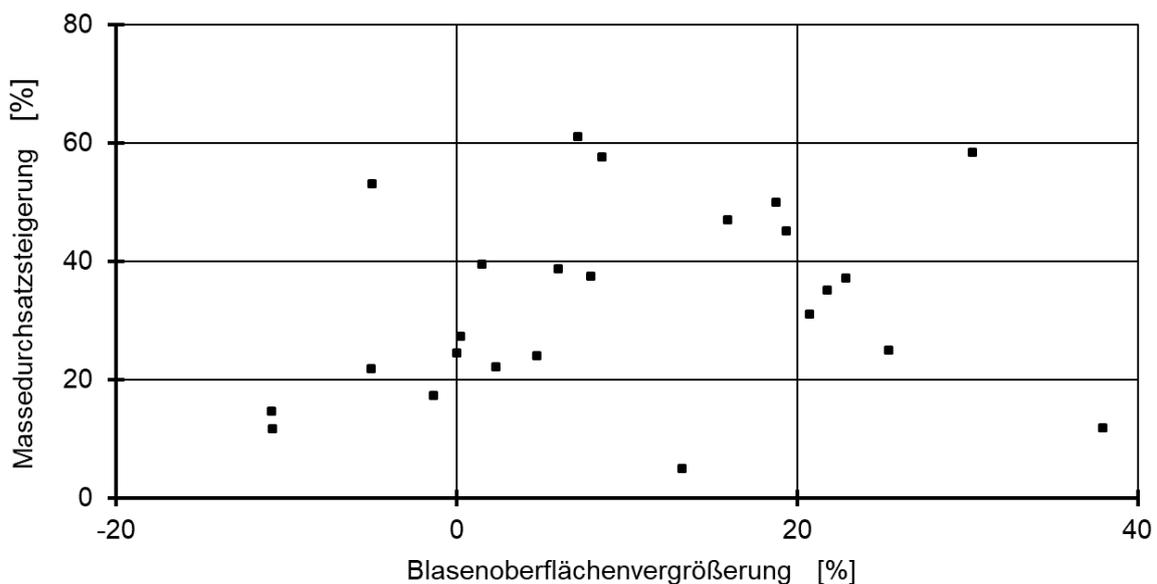


Bild 11: Korrelation zwischen der Oberflächenvergrößerung der Folie und der Massedurchsatzsteigerung

Es zeigt sich eine positive Korrelation zwischen den Datensätzen mit einem Korrelationskoeffizienten nach der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation von $r = +0,61$, was einen statistisch gesichert positiven Zusammenhang, da $r > +0,60$, darstellt [31]. Eine Vergrößerung der Blasenoberfläche führt somit statistisch gesichert zu einem gesteigerten Massedurchsatz.

7 FAZIT UND AUSBLICK

Die Entwicklung einer flexiblen Luftführungseinheit mit einer TPU-Membran ermöglicht eine deutliche Steigerung der Kühlleistung im Betrieb bestehender Blasfolienextrusionsanlagen. Mittels Irisblenden kann der Strömungsspalt flexibel an die jeweilige Blasengeometrie angepasst werden. Die flexible Strömungsspaltanpassung ermöglicht die Ausbildung des Venturi-Effektes, was zu einer durchschnittlichen Durchsatzsteigerung von ca. 32 % gegenüber dem konventionellen Verfahren führt. Besonders positiv auf die Massedurchsatzsteigerung wirken sich geringe Aufblasverhältnisse, geringe Foliendicken sowie hohe Gebläseleistungen aus, sodass der Durchsatz in den Versuchen bis 62 % gesteigert werden konnte. Eine transparente Luftführungsmembran erlaubt zudem die optische Detektion der Blasengeometrie, was die quantitative Bestimmung der Blasenoberflächenvergrößerung ermöglicht. Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz der entwickelten Luftführungseinheit durch die Ausbildung des Venturi-Effektes bei allen untersuchten Prozesspunkten zu einer Zunahme der Blasenoberfläche führt, welche unmittelbar mit der Durchsatzsteigerung korreliert. Da sich die aktuellen Untersuchungen auf die Verwendung von PE-LD beschränken, wird in Zukunft die Untersuchung weiterer Materialien erfolgen, um zum einen die gefundenen Korrelationen zu bestätigen und zum anderen eine mögliche Abhängigkeit des Durchsatzverhaltens von der spezifischen Wärmekapazität bzw. der Wärmeleitfähigkeit des Material zu finden. Weiterhin ist der Einfluss der Luftführungseinheit hinsichtlich einer Beeinflussung der Folienqualität (Foliendickenschwankungen) und der Folieneigenschaften (optische und mechanische Folieneigenschaften) zu untersuchen. Um den Einsatz der LFE zudem innerhalb der Produktion zu erleichtern, wird zusätzlich ein Konzept für einen automatischen Betrieb der Luftführungseinheit entwickelt. Dafür werden mögliche Strategien zur Regelung und reproduzierbaren Einstellung der Geometrie der Luftführung ermittelt. Hierunter fallen beispielsweise Konzepte, die eine automatische Einstellung des Strömungsspaltens vorsehen, um ein höchstes Maß an Prozessstabilität zu gewährleisten und ein einfaches Starten des Prozesses ermöglichen. Ziel eines solchen Systems muss es sein, die gewünschte Geometrie automatisch einstellen zu können. Dies würde insbesondere die Verfahren bei Produktwechseln vereinfachen, da teure Stillstandzeiten entfallen. Zudem können unnötige Anfahrprozesse vermieden und somit teurer Ausschuss minimiert werden.

7 DANKSAGUNGEN

Das Forschungsprojekt 20100 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde im Rahmen der "Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)" durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über die AiF

gefördert. Allen genannten Organisationen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Neben diesen Institutionen danken die Autoren auch der Sabic Europe B.V., Geleen, Niederlande, und der Covestro AG, Leverkusen, Deutschland, für die Bereitstellung der in den Versuchen verwendeten Testmaterialien.

9 ERKLÄRUNG DER WIDERSPRÜCHLICHEN INTERESSEN

Die Autoren erklären, dass keine potenziellen Interessenkonflikte in Bezug auf Forschung, Autorschaft und/oder die Veröffentlichung dieses Artikels vorliegen.

Literatur

- [1] N.N. Überblick Kunststoffverarbeitung
URL: <https://www.gkv.de/de/branchen/ueberblick.html>, 01.07.2019
- [2] Waller, P. Causes and Remedies to 7 Instability Patterns in Blown Film Extrusion
URL: https://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/4669-5933/waller_abstract.pdf, 01.07.2020
- [3] N.N. Endlos flexibel
URL: https://www.plastverarbeiter.de/wpcontent/uploads/migrated/docs/2474_32225.pdf, 01.07.2020
- [4] Baehr, H. D.;
Stephan, K. Wärme- und Stoffübertragung
Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016
DOI: 10.1007/978-3-662-49677-0
- [5] Sidiropoulos, V.;
Vlachopoulos, J. Temperature gradients in blown film bubbles
Advances in Polymer Technology 24 (2005) 2, S. 83-90
DOI: 10.1002/adv.20039
- [6] Janas, M. L. Eine neuartige numerische Methode zur Optimierung und Intensivierung der Blasfolienkühlung
Dissertation am Institut für Produkt Engineering – Konstruktion und Kunststoffmaschinen, Universität Duisburg-Essen, 2010
- [7] Menges, G.;
Predöhl, W.O. Certain aspects of film blowing of low-density polyethylene
Polymer Engineering & Science 15 (1975) 5, S. 394-399
DOI: 10.1002/pen.760150513
- [8] Bühl, D.;
Lettowsky, C.;
Schumacher, H. Innenkühlkörper für eine Blasfolienanlage, Blasfolienanlage mit einem solchen Innenkörper sowie Verfahren zum Betreiben einer solchen Blasfolienanlage
Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, 2015
DE102013016898 A1

- [9] Bayer, B Innenkühlturm für Folienblasanlagen
Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt,
2016
DE102014017556 A1
- [10] N.N.: VDI
(Publisher) VDI-Wärmeatlas
Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013
- [11] Bussmann, M. Ein kalibrierbares integratives Modell zur
Beschreibung des Schlauchbildungsprozesses in der
Blasfolienproduktion
Dissertation am Institut für Produkt Engineering –
Konstruktion und Kunststoffmaschinen,
Universität Duisburg-Essen, 2010
- [12] Limper, A. Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion
Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [13] Michaeli, W. Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk
Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [14] Nentwig, J. Kunststoff-Folien: Herstellung – Eigenschaften –
Anwendung
Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [15] Cambell, G. A.;
Obot, N. T;
Cao, B. Aerodynamics in the Blown Film Process
Polymer Engineering and Science 32 (1992) 11,
S. 751-759
DOI: 10.1002/pen.760321107
- [16] Sidiropoulos, V.;
Vlachopoulos, J. The effects of dual-orifice air-ring design on blown
film cooling
Polymer Engineering & Science 40 (2000) 7,
S. 1611-1618
DOI: 10.1002/pen.11292
- [17] Sidiropoulos, V.;
Vlachopoulos, J. An Investigation of Venturi and Coanda Effects in
Blown Film Cooling
International Polymer Processing 15 (2000) 1, S. 40-
45
DOI: 10.3139/217.1575

- [18] Sidiropoulos, V.; Wood, P. E.; Vlachopoulos, J. The Aerodynamics of Cooling of Blown Film Bubbles
Journal of Reinforced Plastics and Composites 18 (1999) 6, S. 529-538
DOI: 10.1177/073168449901800605
- [19] Zhang, Z.; Lafeur, P.G. Investigation of LDPE Film Instability Induced by Air Cooling
Polymer Engineering and Science 10 (2008) 2, S. 1504-1510
DOI: 10.1002/pen.21112
- [20] Spirgatis, J. Untersuchung des Einflusses des instationären konvektiven Wärmeübergangs bei der Folienherstellung auf die Folienqualität
Dissertation am Institut für Produkt Engineering – Konstruktion und Kunststoffmaschinen, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [21] Kraus, L.; Hopmann, Ch.; Facklam, M.; Grüber, D. Investigations of film thickness variations in blown film extrusion when using air guiding systems
Journal of Plastic Film and Sheeting 36 (2007)
DOI: 10.1177/8756087920932952
- [22] Sink, W. Resilient lock for clutch adjusting device
Patentschrift, United States Patent Office, 1965
US3176814
- [23] Blakeslee, T. R.; Wu, R. Process for manufacture of tabular films
Patentschrift, United States Patent Office, 1984
US4447387A
- [24] Upmeier, H. Kühlvorrichtung für aus einem Folienblaskopf extrudierte Kunststoffschlauchfolien
Patentschrift, Euopäisches Patentamt, 1986
EP0121158B1
- [25] Cole, R. J. Blasenformende und stabilisierende Vorrichtung zum Gebrauch im kontinuierlichen Extrusionsverfahren zur Herstellung von Blasfolien
Patentschrift, Euopäisches Patentamt, 1994
EP0285368B1

- [26] Zhang, Z.;
Lafeur, P.G. A study of heat transfer in the blown film process
Journal of Plastic Film and Sheeting 23 (2007) 4, S.
297-317
DOI: 10.1177/8756087907087466
- [27] Schröder, W. Fluidmechanik – Aachener Beiträge zur
Strömungsmechanik
Verlag Mainz, Aachen, 2010
- [28] Planeta, M. Air rings for production of blown plastic film
Patentschrift, United States Patent Office, 1989
US4826414
- [29] N.N. LDPE 2102N0W
Datenblatt, Sabic Europe B.V., 2018
- [30] N.N. Polyblak 1850
Datenblatt, LyondellBasell (ehemals A. Schulmann
GmbH), 2019
- [31] Kleppmann, W. Versuchsplanung – Produkte und Prozesse
optimieren
Carl Hanser Verlag, München, 2011

Bibliography

DOI 10.3139/O999.02042020
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 16 (2020) 4; page 133–158
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Flexible Luftführungseinheit, Erhöhung des Massedurchsatzes, Venturi-Effekt, Coanda-Effekt, Schlauchbildungszone, digitale Bildverarbeitung, Oberflächenvergrößerung

Keywords:

Flexible air guiding system, increase of mass throughput, Venturi effect, Coanda effect, bubble expansion zone, digital image processing, surface enlargement

Autor / author:

Lars Kraus, M. Sc. (1. Autor)
 Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann (2. Autor) ...
 Dr.-Ing. Martin Facklam (3. Autor)
 Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
 RWTH University
 Seffenter Weg 201
 52074 Aachen

E-Mail: lars.kraus@ikv.rwth-aachen.de
 Webseite: www.ikv-aachen.de
 Tel.: +49 241 80-28349
 Fax: +49 241 80-22316

Herausgeber / Editors:Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
 Lehrstuhl für Kunststofftechnik
 Universität Erlangen-Nürnberg
 Am Weichselgarten 9
 91058 Erlangen
 Deutschland
 Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
 Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
 E-Mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
 Lehrstuhl für Kunststofftechnik
 Universität Erlangen-Nürnberg
 Am Weichselgarten 9
 91058 Erlangen
 Deutschland
 Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
 Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
 E-Mail: drummer@lkt.uni-erlangen.de

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
 Polymer Engineering Center, Director
 University of Wisconsin-Madison
 1513 University Avenue
 Madison, WI 53706
 USA
 Tel.: +1 608/263 9538
 Fax: +1 608/265 2316
 E-Mail: osswald@engr.wisc.edu

Verlag / Publisher:

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
 Wolfgang Beisler
 Geschäftsführer
 Kolbergerstraße 22
 D-81679 München
 Tel.: +49 (0)89/99830-0
 Fax: +49 (0)89/98480-9
 E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office:

Dr.-Ing. Eva Bittmann
 Jannik Werner, M.Sc.
 E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board:

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com