

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20100 N

Thema

Entwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung bei der Blasfolienextrusion

Berichtszeitraum

01.06.2018 – 31.05.2020

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungsstelle(n)

Nr.1: Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V.

Aachen, den 15.07.2020

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

KURZZUSAMMENFASSUNG

Zur Steigerung der Kühlleistung in der Blasfolienextrusion haben sich Luftführungseinheiten (LFE) etabliert, welche in starrer oder flexibler Bauweise ausgeführt sind. Starre Systeme sind jedoch nur für eine prozesspunktabhängige Foliengeometrie optimiert, sodass bei einer Produktänderung die Produktion aufgrund des Austausches einer entsprechenden Luftführungseinheit unterbrochen werden muss, was zu teuren Anlagenstillständen führt. Daher sollte in diesem Forschungsvorhaben eine adaptive als auch flexible Luftführungseinheit entwickelt werden, welche gleichzeitig eine signifikante Steigerung des Massedurchsatzes in der Blasfolienextrusion ermöglicht. Mit einer mehrfach weiterentwickelten flexiblen Luftführungseinheit war es letztlich möglich, den Venturi-Effekt prozesspunktunabhängig durch eine im laufenden Betrieb an die Foliengeometrie anpassbare luftführende Membran hervorzurufen. Die Verstellung der Membran erfolgte dabei mit Hilfe von Irisblenden. Durch die Ausbildung des Venturi-Effektes waren Massedurchsatzsteigerungen im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess für verschiedene Polyolefine (PE-LD, PE-LLD, PE-HD und PP) im Mittel um ca. 30 % möglich. Je nach Prozesspunkt konnte eine Steigerung von bis zu 60 % erzielt werden. Durch den Einsatz der LFE kommt es allerdings zu einer Zunahme der Foliendickenschwankung von ca. 3-4 %. Verursacht werden diese Schwankungen durch einen Faltenwurf der Membran, welcher zu einer inhomogenen Abkühlung führt. Während die Luftführungseinheit die Foliendickenschwankung negativ beeinflusst, wirkt sich deren Einsatz jedoch positiv auf die mechanischen Folieneigenschaften aus. So kommt es zu einer Erhöhung der Bruchspannungen von ca. 5 % und zu einer Erhöhung der Schrumpfeigenschaften um ca. 10 %. Dieser Anstieg lässt sich durch einen höheren Orientierungsgrad der Molekülketten erklären, der durch eine frühzeitige Öffnung der Folienblase innerhalb der LFE eingeleitet wird. Die stärkeren Molekülorientierungen reduzieren zudem die Reißdehnung der erzeugten Blasfolie um ca. 5 %. Die optischen Folieneigenschaften, wie die Transparenz, bleiben unabhängig des Einsatzes der Luftführungseinheit konstant. Lediglich die Folientrübung erhöht sich in einem geringen Maß von ca. 3 %, da es zu einer Nachkristallisation innerhalb der Kühlstrecke kommt. Für einen möglichen Einsatz des entwickelten Systems in der Industrie war es zudem wichtig, mögliche Regelstrategien für eine automatisierte Einstellung der LFE in Abhängigkeit der Prozessparameter zu entwickeln. Eine mit den erhobenen Versuchsdaten entwickelte analytische Prozessmodellierung zeigte dabei keinen ausreichenden Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und der Einstellung der Luftführungseinheit, weshalb auf eine Modellierung mittels Fuzzy-Logik zurückgegriffen wurde, auf deren Grundlage eine sehr genaue Regelung ermöglicht wurde.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

VORWORT UND DANK

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 20100 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung 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.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Lars Kraus, M. Sc., erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von studentischen Arbeiten niedergelegt. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden. Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWi und der AiF-Mitgliedsvereinigung „Kunststoffverarbeitung“ gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Materialien, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Industrievertretern der Fachbeiratsgruppen „2018 und „2019“, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	SUMMARY	4
3	EINLEITUNG	5
4	STAND DER TECHNIK	6
4.1	Anlagentechnik in der Blasfolienextrusion	6
4.2	Grundlagen des Wärmetransports in der Folienherstellung	7
4.3	Konzepte zur Luftkühlung in der Blasfolienproduktion.....	10
4.4	Patentrecherche zur Erhöhung der Kühlleistung durch Luftführungseinheiten.....	13
5	ZIEL, HERAUSFORDERUNG UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN	16
6	VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN	17
6.1	Anlagentechnik	17
6.1.1	Extruder	17
6.1.2	Werkzeug.....	17
6.1.3	Außenluftkühlung	17
6.2	Materialien	17
6.3	Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften.....	18
6.3.1	Bestimmung des Massedurchsatz	18
6.3.2	Bestimmung der Foliendickenschwankung.....	19
6.3.3	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften.....	19
6.3.4	Bestimmung der optischen Eigenschaften.....	20
7	ERMITTLUNG GEEIGNETER GEOMETRIEN DER LUFTFÜHRENDEN MEMBRAN.....	21
7.1	Optische Vermessung	21
7.1.1	Aufbau eines Messstands zur Ermittlung der Blasengeometrien	21
7.1.2	Analyse der Blasengeometrien	22
8	KONSTRUKTION UND INBETRIEBNAHME DES ADAPTIVEN KAMINS.....	23
8.1	Druckschläuche.....	24
8.2	Druckschrauben.....	24
8.2.1	Erster Prototyp	24
8.2.2	Zweiter Prototyp	26
8.3	Irishlenden	27
9	ENTWICKLUNG EINER STRATEGIE ZUR EINSTELLUNG DER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT	29
10	VERSUCHSPLAN UND -DURCHFÜHRUNG	30
10.1	Versuchsplan.....	30
10.2	Einstellung der Doppellippe	30

11	UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT AUF DEN MAXIMALEN MASSEDURCHSATZ	31
12	UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT AUF DIE FOLIENEIGENSCHAFTEN	33
12.1	Einfluss auf die Foliendickenschwankung	33
12.2	Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.....	34
12.3	Einfluss auf die optischen Eigenschaften	36
13	ERSTELLUNG EINES KONZEPTE FÜR DIE PROZESSREGELUNG	37
13.1	Analytische Modellbildung.....	37
13.2	Modellbildung mittels Fuzzy-Control	37
13.2.1	Fuzzifizierung	38
13.2.2	Inferenz.....	39
13.2.3	Defuzzifizierung	39
13.3	Vergleich der Modellierungsmethoden.....	39
14	FAZIT UND AUSBLICK	41
15	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	43
15.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	43
15.2	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes	47
16	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU	48
16.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	48
16.2	Wirtschaftlicher Nutzen	48
17	ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN.....	49
17.1	Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal.....	49
17.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	50
18	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	52
18.1	Abkürzungen	52
18.2	Formelzeichen und Indizes	52
19	LITERATUR.....	54
20	ANHANG.....	58
20.1	Liste der Veröffentlichungen.....	58
20.2	Liste der studentischen Arbeiten.....	58
20.2.1	Zusammenfassung der studentischen Arbeiten.....	58

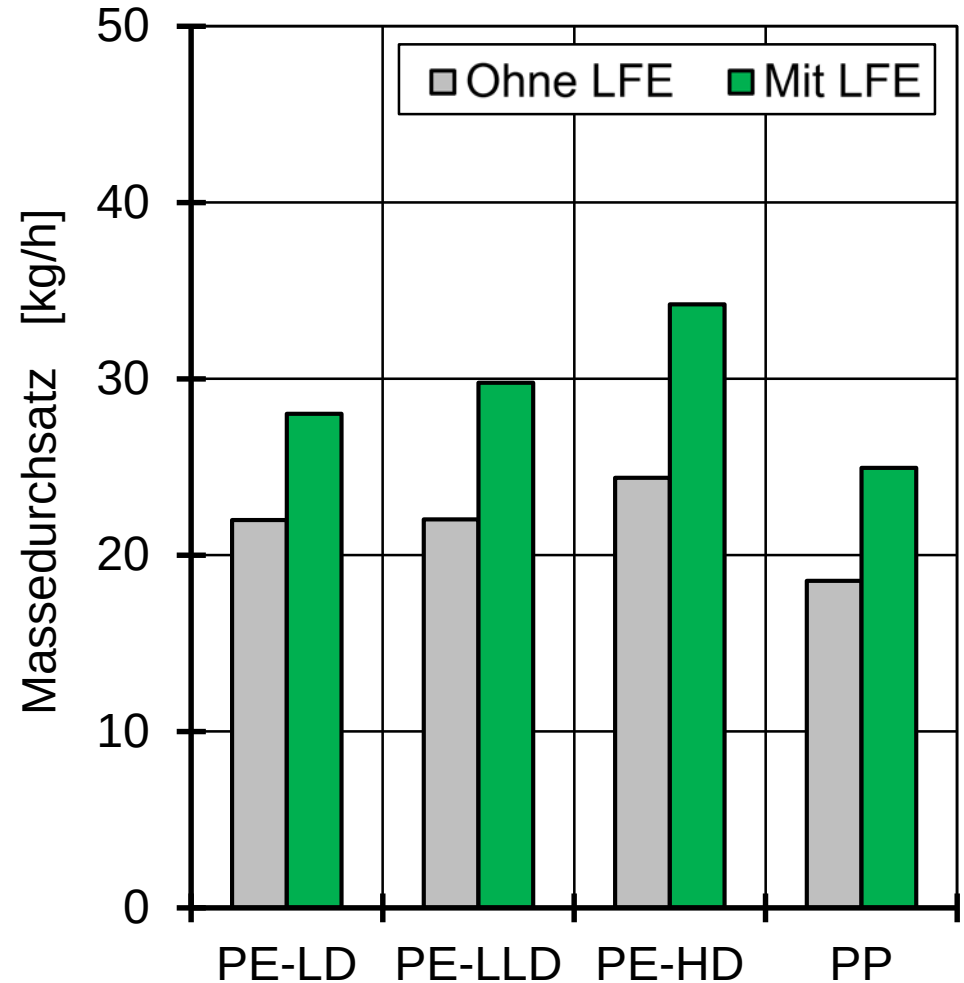
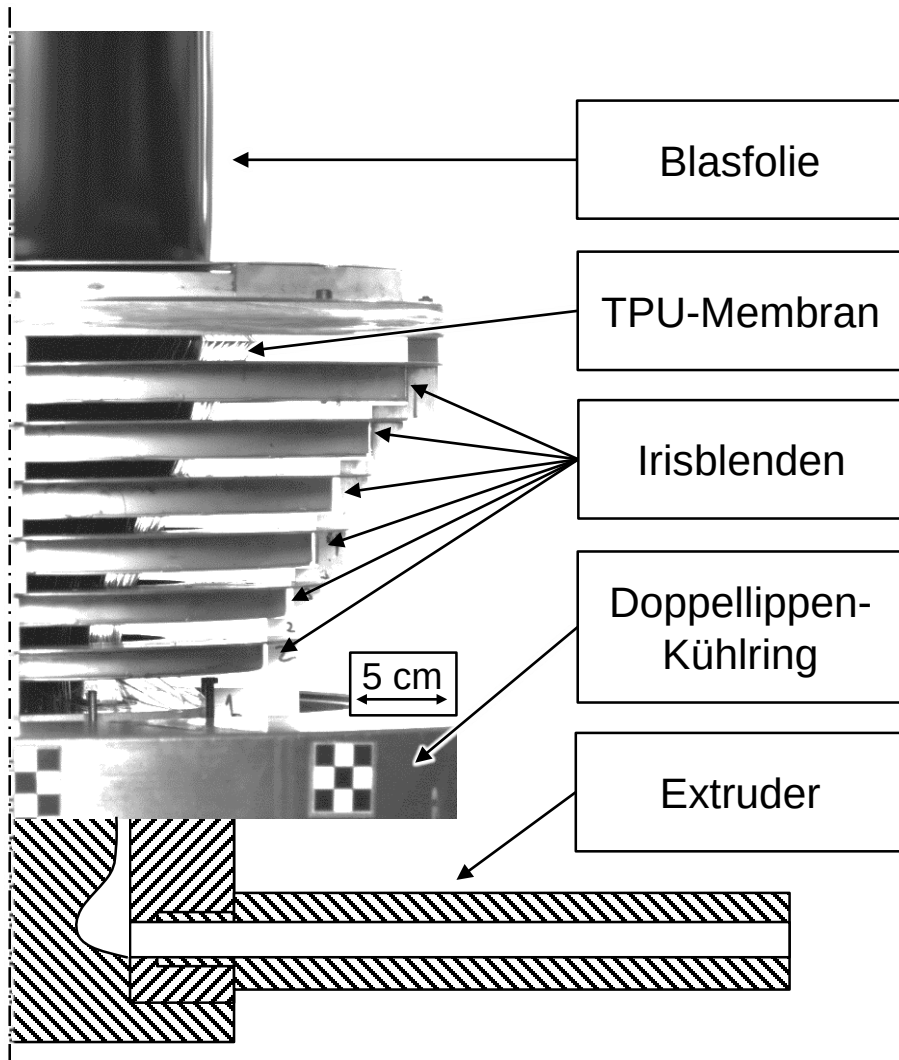
1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Blasfolien, Kühlung, Massedurchsatz, Prozessoptimierung

Schlagworte: Flexible Luftführungseinheit, Fuzzy-Logik, Schlauchbildungszone

Zur Steigerung der Kühlleistung in der Blasfolienextrusion haben sich Luftführungseinheiten (LFE) etabliert, welche in starrer oder flexibler Bauweise ausgeführt sind. Starre Systeme sind jedoch nur für eine prozesspunktabhängige Foliengeometrie optimiert, sodass bei einer Produktänderung die Produktion aufgrund des Austausches einer entsprechenden Luftführungseinheit unterbrochen werden muss, was zu teuren Anlagenstillständen führt. Daher sollte in diesem Forschungsvorhaben eine adaptive als auch flexible Luftführungseinheit entwickelt werden, welche gleichzeitig eine signifikante Steigerung des Massedurchsatzes in der Blasfolienextrusion ermöglicht. Mit einer mehrfach weiterentwickelten flexiblen Luftführungseinheit (Bild 1.1) war es letztlich möglich, den Venturi-Effekt prozesspunktunabhängig durch eine im laufenden Betrieb an die Foliengeometrie anpassbare luftführende Membran hervorzurufen. Die Verstellung der Membran erfolgte dabei mit Hilfe von Irisblenden. Durch die Ausbildung des Venturi-Effektes waren Massedurchsatzsteigerungen im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess für verschiedene Polyolefine (PE-LD, PE-LLD, PE-HD und PP) im Mittel um ca. 30 % möglich. Je nach Prozesspunkt konnte eine Steigerung von bis zu 60 % erzielt werden. Durch den Einsatz der LFE kommt es allerdings zu einer Zunahme der Foliendickenschwankung von ca. 3-4 %. Verursacht werden diese Schwankungen durch einen Faltenwurf der Membran, welcher zu einer inhomogenen Abkühlung führt. Während die Luftführungseinheit die Foliendickenschwankung negativ beeinflusst, wirkt sich deren Einsatz jedoch positiv auf die mechanischen Folieneigenschaften aus. So kommt es zu einer Erhöhung der Bruchspannungen von ca. 5 % und zu einer Erhöhung der Schrumpfeigenschaften um ca. 10 %. Dieser Anstieg lässt sich durch einen höheren Orientierungsgrad der Molekülketten erklären, der durch eine frühzeitige Öffnung der Folienblase innerhalb der LFE eingeleitet wird. Die stärkeren Molekülorientierungen reduzieren zudem die Reißdehnung der erzeugten Blasfolie um ca. 5 %. Die optischen Folieneigenschaften, wie die Transparenz, bleiben unabhängig des Einsatzes der Luftführungseinheit konstant. Lediglich die Folientrübung erhöht sich in einem geringen Maß von ca. 3 %, da es zu einer Nachkristallisation innerhalb der Kühlstrecke kommt. Für einen möglichen Einsatz des entwickelten Systems in der Industrie war es zudem wichtig, mögliche Regelstrategien für eine automatisierte Einstellung der LFE in Abhängigkeit der Prozessparameter zu entwickeln. Eine mit den erhobenen Versuchsdaten entwickelte analytische Prozessmodellierung zeigte dabei keinen ausreichenden Zusammenhang, weshalb auf eine Modellierung mittels Fuzzy-Logik zurückgegriffen wurde, auf deren Grundlage eine sehr genaue Regelung ermöglicht wurde.

Entwicklung einer adaptiven sowie flexiblen Luftführungseinheit ermöglicht Massedurchsatzsteigerungen



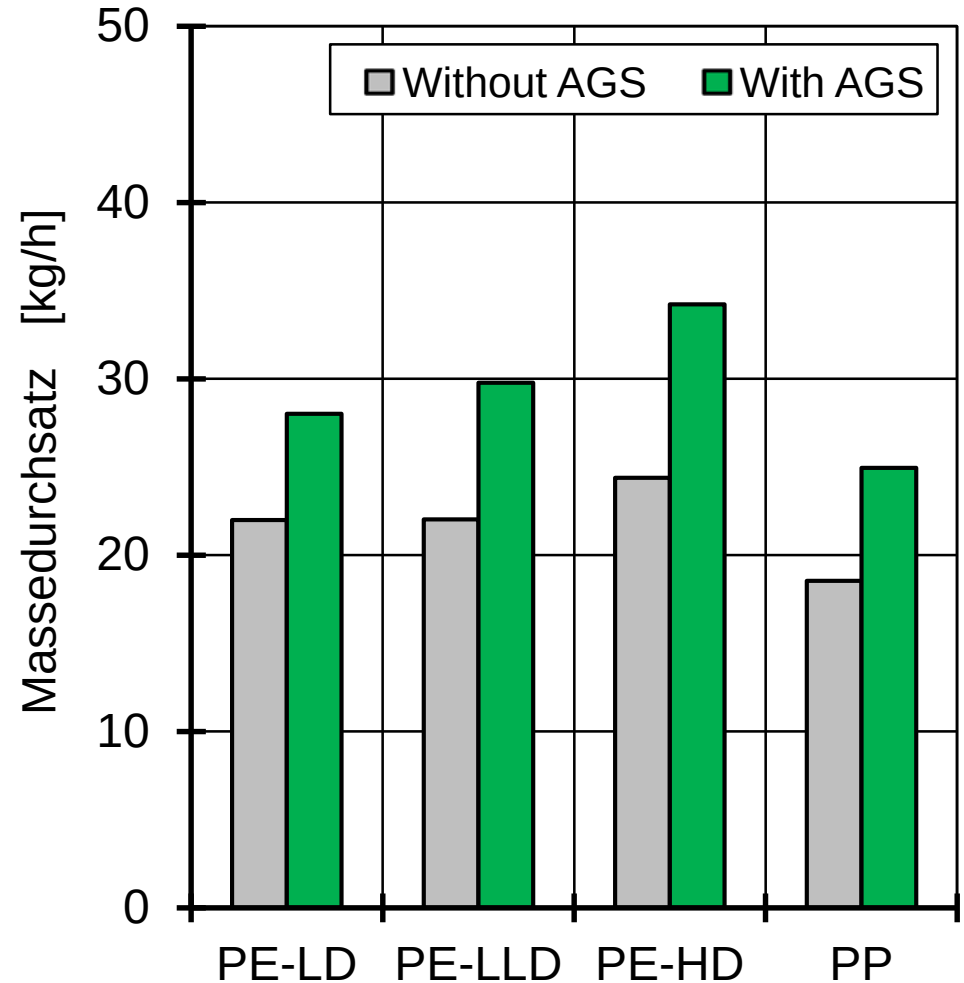
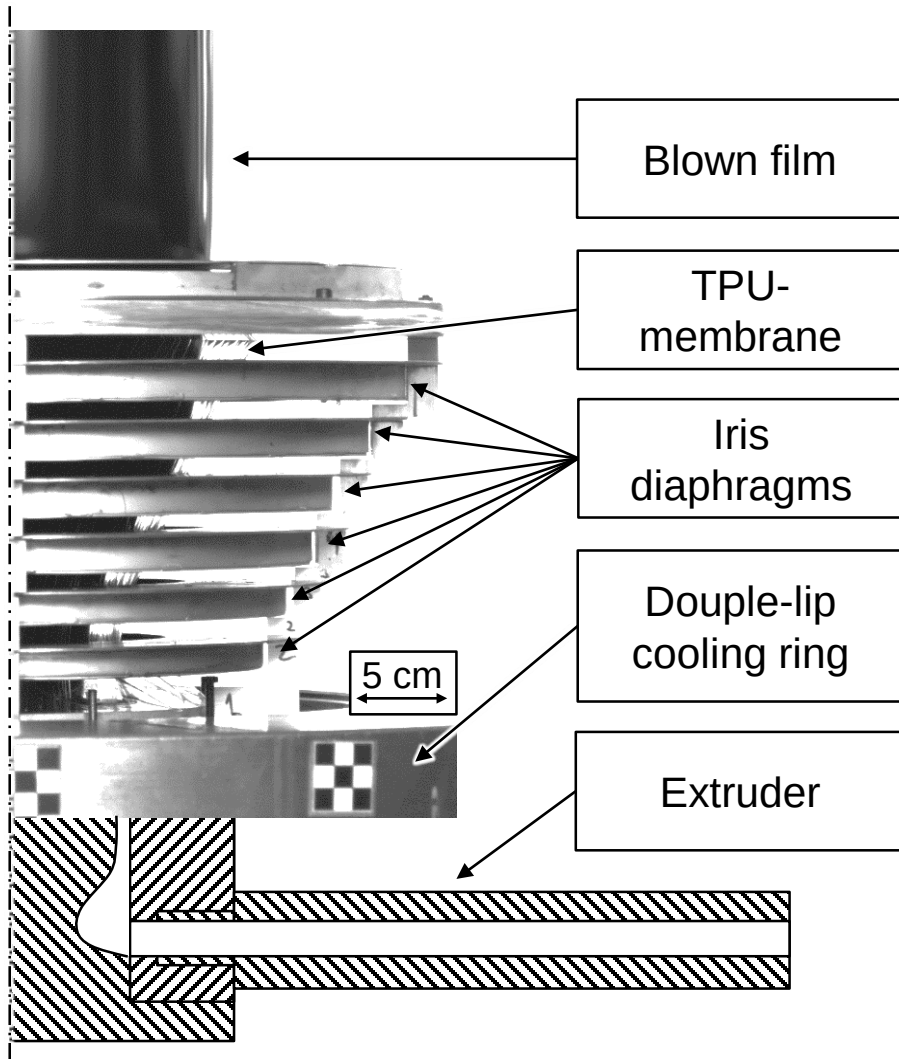
2 SUMMARY

Descriptors Blown film, cooling, mass throughput, process optimization

Keywords: Flexible air guiding system, fuzzy logic, bubble expansion zone

To increase the cooling capacity in blown film extrusion, air guiding systems (AGS) have become established, which are designed in rigid or flexible construction. Rigid systems are, however, only optimized for a process point-dependent film geometry, so that in the case of a product change, the production has to be interrupted due to the replacement of a corresponding air guide system, which leads to expensive line downtimes. Therefore, the aim of this research project was to develop an adaptive as well as flexible air guiding system, which allows a significant increase of the mass throughput in blown film extrusion. With a flexible air guiding system (Figure 1.1), which has been further developed several times, it was finally possible to generate the Venturi effect independent of the process point by means of an air guiding membrane which can be adapted to the film geometry during production. The membrane was adjusted with the aid of iris diaphragms. The Venturi effect enabled increases in mass throughput of approx. 30 % on average compared to the conventional blown film process for various polyolefins (PE-LD, PE-LLD, PE-HD and PP) (Figure 1.1). Depending on the process point, increases of up to over 60 % were possible. However, the use of AGS leads to an increase in film thickness variation of approx. 3-4 %. These variations are caused by a wrinkling of the membrane, which leads to an inhomogeneous cooling. Whereas the air guiding unit has a negative influence on the film thickness fluctuation, its use has a positive effect on the mechanical film properties. This results in an increase in breaking stress of approx. 5 % and an increase in shrinkage properties of approx. 10 %. This increase can be explained by a higher degree of orientation of the molecular chains, which is initiated by an early opening of the film bubble within the system. The stronger molecular orientations also reduce the elongation at break of the blown film produced by approx. 5 %. The optical film properties, such as transparency, remain constant regardless of the use of the air guide system. Only the film opacity increases to a small extent of approx. 3 %, as post-crystallization occurs within the cooling section. For a possible application of this development in industry it was also important to develop possible control strategies for an automated adjustment of the membrane depending on the process parameters. Analytical process modelling developed with the experimental data collected does not show a sufficient correlation between the process parameters and the adjustment of the air guiding system. For this reason, fuzzy logic modelling was used as a basis for very precise membrane control.

Development of an adaptive and flexible air guiding system enables mass throughput increases



3 EINLEITUNG

Eine effiziente Produktion von Blasfolienerzeugnissen ist insbesondere im Hochlohnland Deutschland unabdingbar, um im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben. Um die wirtschaftliche Folienherzeugung sicherzustellen, ist die stetige Erhöhung des Massedurchsatzes bei gleichbleibend hoher Folienqualität eine Schlüsselkompetenz der Forschung und Entwicklung [Nen06, OS10, Rah10, WB07]. Der durchsatzbestimmende Faktor liegt in der Kühlleistung einer Blasfolienanlage begründet, da die Folie vor Erreichen der Flachlegung soweit abgekühlt sein muss, dass ihre Geometrie fixiert und ein Schwinden der Folie auf dem Folienwickel vermieden wird.

Konventionelle Blasfolienanlagen verwenden zur Kühlung der Folienaußenseite in der Regel Doppellippenkühlringe, welche der Blase durch radial anströmende Kühlluft Wärme entziehen. Da die Schmelze in der Schlauchbildungszone unmittelbar nach dem Austritt aus dem Ringspaltwerkzeug nur eine begrenzte Schmelzefestigkeit aufweist, kann die Austrittsgeschwindigkeit der umliegenden Kühlluft nicht beliebig gesteigert werden, da es sonst zu Blaseninstabilitäten und Folienabrissen kommen kann [ZL08]. Eine Möglichkeit die Folienblase auch bei höheren Gebläseleistungen, ohne die Platzierung weiterer Kühlringe, in der Kühlstrecke zu stabilisieren, stellen Luftführungseinheiten (LFE) dar, welche oberhalb des Kühlrings montiert werden [HKF20]. Das Ziel dieser Systeme ist es, dem Folienschlauch durch eine konturnahe Führung der bereitgestellten Kühlluft entlang der Blasfolienaußenseite mittels starrer oder flexibler Leitwände in der Schlauchbildungszone mehr Wärme zu entziehen. Realisiert wird der gesteigerte Wärmeentzug durch den Venturi-Effekt, welcher durch eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft innerhalb der LFE für einen erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten sorgt. Weiterhin wird durch die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit der statische Druck innerhalb der LFE gesenkt, was zu einem frühzeitigen Aufweiten der Folienblase führt, sodass eine größere Oberfläche für den angestrebten Wärmeentzug zur Verfügung steht.

Kostengünstige Systeme mit starren Leitwänden sind geeignet, die Ausstoßleistung eines einzelnen Folienherzeugnisses zu steigern. Eine Variation der Prozessparameter oder Materialwechsel sind aufgrund abweichender Geometrien der Folien innerhalb der Schlauchbildungszone jedoch nicht möglich. Daher war es das Ziel des Forschungsvorhabens 20100 N, ein flexibles System zur konturnahen Einstellung des Strömungsspalt zwischen Folienblase und Luftführungseinheit zu entwickeln, um teure Rüstzeiten zu vermeiden. Zudem sollte der Einfluss des entwickelten Systems hinsichtlich einer möglichen Massedurchsatzsteigerung als auch einer Beeinflussung der Folieneigenschaften, wie Dickenschwankung, mechanischer sowie optischer Eigenschaften, untersucht werden, um das Potenzial dieser Entwicklung für eine Markteinführung abschätzen zu können.

4 STAND DER TECHNIK

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik einer Blasfolienextrusionsanlage beschrieben und auf die zur Kühlung von Blasfolien wirkenden Wärmetransportmechanismen eingegangen. Zunächst werden physikalische Grundlagen und Strömungsphänomene diskutiert. In der Industrie etablierte Luftführungseinheiten werden nachfolgend zudem auf Basis einer Patentrecherche erläutert.

4.1 Anlagentechnik in der Blasfolienextrusion

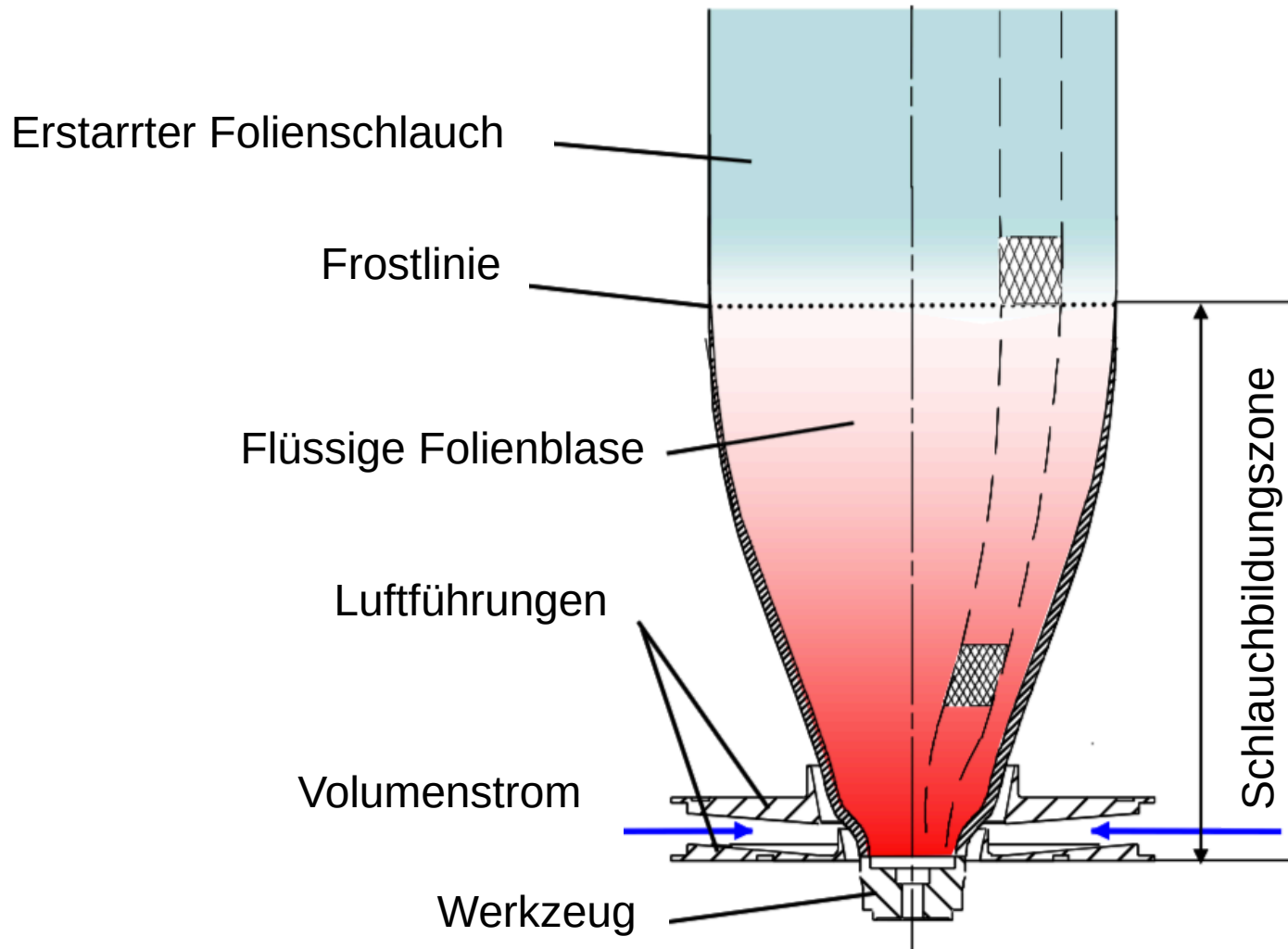
Aufschmelzen

Ein Extruder wird in der Blasfolienextrusion zumeist über ein gravimetrisch oder volumetrisches Dosiersystem mit dem granulierten Kunststoff beschickt. In der Blasfolienextrusion werden aufgrund der über einen großen Durchsatzbereich nahezu gegendruckunabhängigen Förderereigenschaften weitestgehend Einschneckenextruder mit genuteter Einzugsbuchse eingesetzt [BR12, Nen06]. Der im Extruder aufgeschmolzene und thermisch homogenisierte Kunststoff wird anschließend dem Blasfolienwerkzeug zugeführt. Wegen der für die Folienqualität notwendigen bindenahtfreien Ausformung haben sich Axial- und Radialwendelverteiler als Werkzeuge etabliert. Diese überführen den Schmelzestrom in ein Ringprofil mit einer üblichen Wanddicke von 0,5 - 2 mm [Sch15].

Schlauchbildung

Nach Verlassen des Werkzeuges wird der Schmelzeschlauch durch einen aufgesetzten Kühlring radial mit gekühlter Luft angeströmt und konvektiv gekühlt. Dabei wird der Schmelzeschlauch zeitgleich radial und axial verstreckt. Die Verstreckung findet ausschließlich in der Schlauchbildungszone statt. Diese ist definiert als der Bereich zwischen dem Düsenaustritt und der Frostlinie, welche den Folienabschnitt bezeichnet, an dem die Kristallisationstemperatur des Materials erreicht ist (Bild 4.1) [Bus10]. Die radiale Verstreckung wird dabei durch einen von innen zugeführten Luftstrom und die axiale Verstreckung durch eine Abzugseinheit oberhalb des Werkzeuges realisiert. Die radiale Verstreckung wird dabei als BUR (Blown-Up-Ratio) bezeichnet und beschreibt das Verhältnis des endgültigen Foliendurchmessers gegenüber dem Durchmesser des Schmelzeschlauches am Düsenaustritt. Das Verhältnis zwischen der Abzugsgeschwindigkeit und der Schmelzeaustrittsgeschwindigkeit beschreibt die axiale Verstreckung und ist als TUR (Take-Up-Ratio) definiert [Jan15, LT85, Pre79, Wag75]. Durch die Überlagerung der axialen als auch der radialen Verstreckung der Folie, kommt es zu einem biaxialen Spannungszustand, welcher eine Einstellung der Foliendicke während der Extrusion ermöglicht und die Folieneigenschaften, wie Mechanik und Schrumpf, durch eingebrachte Orientierungen beeinflusst [CC90]. Diese biaxiale Verstreckung stellt besondere Anforderungen an den in der

Skizze der Schlauchbildungszone in der Blasfolienextrusion



[Bus10]



Blasfolienextrusion verwendeten Kunststoff. Die wichtigste Eigenschaft ist dabei eine hohe Schmelzefestigkeit des Materials, da die bei der Verstreckung auftretenden Kräfte nicht zum Aufreißen des Schmelzeschlauches führen dürfen [Jan15, Pre79, MH+11].

Kalibrierkorb, Flachlegung und Aufwicklung

Oberhalb der Schlauchbildungszone wird der erstarrte Folienschlauch von den Abzugswalzen durch einen Kalibrierkorb und eine Flachlegung geführt. Der Kalibrierkorb zentriert den Folienschlauch und vermindert ein mögliches Flattern der Folienblase, welches durch zu hohe Kühlluftgeschwindigkeitsimpulse ausgelöst werden kann. In der nachfolgenden Flachlegung wird der Folienschlauch doppelt zusammengelegt und durch eine Abzugseinheit geführt. Um die bei der Herstellung nicht zu vermeidenden Dickstellen über den Umfang zu verteilen und ein gleichmäßiges Aufwickeln der Folie gewährleisten zu können, ist der Abzug meist reversierend ausgeführt. Anschließend läuft die Folie über Wendewalzen zu einer Aufwicklung und wird dort konfektioniert und aufgewickelt [Sch15, Lor16, Gla18].

4.2 Grundlagen des Wärmetransports in der Folienherstellung

Um das Abkühlverhalten von Folien in der Schlauchbildungszone unmittelbar nach dem Werkzeugaustritt beschreiben zu können, müssen die Wärmetransportmechanismen Wärmestrahlung, Wärmeleitung sowie Konvektion betrachtet werden. Je nach verwendetem Kühlkonzept unterscheiden sich die Mechanismen in ihrer jeweiligen Wirksamkeit.

Wärmeleitung:

Die Wärmeleitung stellt den Wärmetransportmechanismus dar, welcher den Wärmefluss innerhalb eines Körpers beschreibt. Sie ist nach Gl. 4.1 linear abhängig von der Wärmeleitfähigkeit λ [Kne15]:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit:

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

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 [HKF20a, SV05].

Wärmestrahlung:

Anders als der Wärmetransport durch Wärmeleitung ist die Wärmestrahlung kein molekularer Vorgang, sondern beruht auf elektromagnetischer Emission. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt die durch Strahlung an die Umgebung abgegebene Wärme [Kne15]:

$$\dot{Q} = \varepsilon * \sigma * A * T^4 \quad (\text{Gl. 4.2})$$

mit:

- $\dot{Q}$: *Emittierte Wärme*
- ε : *Emissionsgrad des emittierenden Körpers*
- σ : *Stefan-Boltzmann-Konstante*
- A : *Repräsentative Oberfläche des emittierenden Körpers*
- T : *Absolute Temperatur des emittierenden Körpers*

Nach dem Austritt der Kunststoffschmelze aus dem Werkzeug emittiert der noch heiße Folien-schlauch Wärme durch Wärmestrahlung an die Umgebung. Nach *Predöhl* ist der Emissionsgrad, neben dem verwendeten Material, ebenfalls positiv abhängig von der Dicke der extrudierten Blasfolie [Jan15, Kne15, Pre79]. Aufgrund der meist geringen Foliendicken kleiner 200 µm und aufgrund der Tatsache, dass Wärmestrahlung im Vergleich zu den anderen Wärmetransportmechanismen deutlich kleiner ausfällt, kann diese in der Regel bei der Blasfolienextrusion vernachlässigt werden [HKF20].

Konvektion:

Beim Wärmetransport durch die Oberfläche eines Körpers ist zudem die Biot-Zahl entscheidend. Die Biot-Zahl Bi ist definiert als [Jan15, HKF20]:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Hierbei entspricht α dem Wärmeübergangskoeffizienten des strömenden Fluids (Kühlluft), d der Foliendicke und λ der Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes [Jan15]. 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 Foli-enkühlung (Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten) durch Kühlringe ist die Biot-Zahl in der Blasfolienextrusion meist kleiner als 0,1 [Jan15], sodass der dominierte Wärmeübergangsmechanismus für die Kühlung der Folie die Konvektion ist. Gleichung 4.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der konvektiv abzuführenden Wärme und den davon abhängigen Größen [BS16, MP75, HKF20]:

$$\dot{Q} = A * \alpha * \Delta T \quad (\text{Gl. 4.4})$$

mit:

- $\dot{Q}$: Übertragener Wärmestrom
- A : Wärmeübertragende Fläche
- α : Wärmeübergangskoeffizient
- ΔT : Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche eines Körpers und des vorbeiströmenden Fluids

Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Kühlleistung sind demnach die Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche (Folienblasenoberfläche), die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten α sowie die Vergrößerung der treibenden Temperaturdifferenz. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist wiederum proportional zur Nußelt-Zahl Nu :

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu(Re, Pr) \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Durch deren Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re ergibt sich eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten durch eine Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft v bei konstanter Dichte ρ , charakteristischer Länge d und dynamischer Viskosität η [NN13].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Weiterhin kann, entsprechend der Prandtl-Zahl Pr , durch die Vergrößerung der spezifischen Wärmekapazität c_p bei konstanter Wärmeleitfähigkeit λ und dynamischer Viskosität η ebenfalls ein höherer Wärmeübergangskoeffizient erreicht werden:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich grundsätzlich mehrere Möglichkeiten, die Kühlleistung einer Blasfolienanlage zu verbessern: Eine Verringerung der Kühllufttemperatur zur Vergrößerung der treibenden Temperaturdifferenz ΔT ist technisch möglich, führt aber sowohl zu hohen Kosten durch die nötige Kühlung als auch zu Kondensatbildung unterhalb des Taupunkts an den kalten Anlagenteilen (Kühlringe, IBC). Diese Kondensate (Wasser, flüchtige Kunststoffbestandteile) können durch den Kühlluftstrom auf die Folie gelangen und dort Fehlstellen verursachen [NN15, NN16]. Die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten kann z. B. durch eine höhere Strömungsgeschwindigkeit v sowie eine höhere spezifische Wärmekapazität der Kühlluft c_p erreicht werden. Zur Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität der Kühlluft kann die Kühlluft beispielsweise befeuchtet werden. Am IKV durchgeführte Untersuchungen zum Einsatz von feuchter Luft zur Kühlung im Blasfolienextrusionsprozess zeigen, dass ein Wasserdüsensystem eine verbesserte Kühlleistung bei gleichzeitig guten Folieneigenschaften erreichen kann [Wen11]. Dennoch hat das System bisher keinen Einzug in die industrielle Produktion gefunden. Gründe hierfür sind die Komplexität des Systems und die hohen Anforderungen an die Randbedingungen (z. B. Luftentfeuchtung in der Produktionshalle [Wen11]).

Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit v der Kühlluft als weitere Maßnahme der Intensivierung der Folienkühlung ist allerdings nicht in beliebigem Maße möglich, da zu große hydrodynamische Drücke, verursacht durch die Kühlluftströmung, zu Blaseninstabilitäten führen, die die Prozessstabilität herabsetzen [ZL08].

4.3 Konzepte zur Luftkühlung in der Blasfolienproduktion

Um die Kühlleistung, durch den zuvor beschriebenen in der Blasfolienextrusion dominierenden konvektiven Wärmeübergang, zu steigern, haben sich heutzutage verschiedene Kühlsysteme etabliert, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Ein- und Doppellippenkühlringe:

Um der Blasfolie an ihrer Folienußenseite Wärme zu entziehen, werden meist Kühlringe eingesetzt, welche die Folienblase mit Kühlluft aus einem oder mehreren Austrittsspalt(en) über dem gesamten Umfang der Blase anströmen. Die Kühlluft wird zuvor in einer Ringkammer durch Strömungskanäle homogenisiert und dem/den Austrittsspalt(en) bereitgestellt. So gelingt es, im optimierten Betrieb eine gleichmäßige Verteilung der Kühlluft über die Blasengeometrie sicherzustellen [Bus10, Hen18, Lim13, Mic09]. Die einfachste Variante der Kühlung durch außenliegende Kühlringe stellen Einlippen-Kühlringe dar, bei welchen die Kühlluft die Folienblase nur durch einen Austrittsspalt unmittelbar oberhalb des Werkzeugaustrittes tangential anströmt [Hen18, Lim13]. Die Ober- und Unterlippe bilden dabei die Geometrie des Luftspaltes. Eine Geometrieveränderung der Lippen verursacht eine entsprechende Veränderung der Anströmcharakteristik. Der Vorteil dieser Technologie ist in ihrem großen Einsatzbereich begründet, da sich der werkzeugnah zugeführte Luftstrom frei über die Schlauchbildungszone entwickeln kann. Bei erhöhten Kühlluftströmen kann es jedoch zu einer Deformation der noch niedrigviskosen Schmelze am Werkzeugaustritt kommen [Bus10, Spi04]. Eine Weiterentwicklung stellt daher der Doppellippenkühlring dar, wie er nach dem heutigen Stand der Technik in weiten Teilen industriell zum Einsatz kommt. Durch die Verwendung eines zweiten Austrittsspalt(es) kommt es zu einem Ansaugen der Folie an den Kühlring, da sich ein Unterdruck an der Außenseite der Blasfolie ausbildet. Die so entstehende Druckdifferenz zwischen der Blasenaußenseite und der Blaseninnenseite (Stützluft) erleichtert eine schnelle Aufweitung der Folie in Werkzeugnähe, wodurch die Fläche zum Wärmeaustausch, siehe Gleichung 4.4, mit der Umgebung im Vergleich zum Prozess mit nur einem Austrittsspalt vergrößert werden kann [Hen18].

Blaseninnenkühlung (IBC):

Um die Kühlleistung weiter zu erhöhen werden heutzutage ebenfalls Systeme eingesetzt, die durch einen ständigen Luftaustausch im Folienblaseninneren die Kühlung der Folieninnenblase

ermöglichen. Es kommen Rohr-in-Rohr-Systeme zum Einsatz, die durch das Werkzeug in die Blase geführt werden. Durch das außenliegende Rohr wird dem System Kühlluft zugeführt und durch das innenliegende Rohr im selben Maß wieder abgeführt. Dabei ist der statische Druck konstant zu halten, um das Ausblasverhältnis während der Extrusion nicht zu verändern. Die zusätzlich abgeführte Wärme durch eine IBC macht einen Anteil von ca. 25 % an der gesamten Kühlleistung der Anlage aus [BR13, Bus10].

Gegenstromkühlluftsystem:

Gegenstromkühlluftsysteme werden bei Kunststoffen eingesetzt, welche mit einem langen Blasenhalbs, wie bspw. PE-HD, im Blasfolienprozess produziert werden, um die Polymerketten bereits nach dem Werkzeugaustritt durch eine axiale Verstreckung zueinander auszurichten. Dies bewirkt zum einen eine Stabilisierung des Schmelzeschlauches, zum anderen können die mechanischen Eigenschaften der Folie gezielt beeinflusst werden. Um die Kühlung in der Schlauchbildungszone trotz oberflächenarmer Langhalsfahrweise zu erhöhen, wird ein höhenverstellbarer Kühlring mit drei Austrittsspalten vorgesehen, von denen einer nach unten auf den Folienhals gerichtet ist. Dieser sorgt für eine Vorkühlung des schmalen Folienbereiches, wodurch der Anteil der an der Abkühlung teilnehmenden Oberfläche erhöht werden kann. Neben einer erhöhten Ausstoßleistung können die Blasenstabilität sowie die Folieneigenschaften positiv beeinflusst werden [Bus10, NN08].

Etagenkühlringsysteme:

Die Gebläseleistung von Kühlringen, welche direkt auf dem Werkzeug montiert werden, ist durch die Schmelzefestigkeit des zu verarbeitenden Materials unmittelbar nach dem Austritt aus dem Ringspalt begrenzt. Die zur Verfügung stehende Kühlleistung kann deshalb nicht vollständig ausgenutzt werden. Eine Lösung bietet die Platzierung eines weiteren Kühlrings oberhalb der kritischen Folientemperatur, bei der bereits eine höhere Schmelzefestigkeit vorliegt. Dieser zweite Kühlring ist in seiner Höhe in gewissen Grenzen verstellbar, um eine Anpassung des Systems an die jeweilige Kontur zu ermöglichen [Bus10]. Die austretende Schmelze wird zunächst von dem auf dem Werkzeug aufliegenden Kühlring gekühlt, woraufhin sich die Folie axial verstreckt. Erreicht die Folie den höher gelegenen Kühlring, weist diese bereits eine im Vergleich zur ersten Kühlzone erhöhte mechanische Festigkeit auf, wodurch gesteigerte Kühlluftgeschwindigkeiten realisiert werden können [Bus10].

Kaskadenkühlung:

Eine Weiterentwicklung des Etagenkühlringsystems stellt die Kaskadenkühlung dar, die ebenfalls zwei Kühlringe verwendet, um der Folie Wärme zu entziehen. Die Kühlung wird dahingehend optimiert, dass zwischen den Kühlringen, von denen der obere höhenverstellbar ist,

Führungselemente angeordnet sind, welche die Kühlluft konturnah an der Folienoberfläche heranzuführen und den zugeführten Luftström in den einzelnen Folienabschnitten regulieren können. Dadurch ist es möglich, die Druckgebiete entlang der Folienblase strömungsmechanisch voneinander zu entkoppeln. Durch (Pneumatik-) Zylinder verstellbare Einlässe an den Führungselementen ermöglichen ein definiertes Ansaugen der Umgebungsluft, um das Druckniveau bei Bedarf definiert entspannen zu können [Bus10, Spi04].

Luftführungseinheiten:

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Kühlleistung in der Schlauchbildungszone, sind Luftführungseinheiten (LFE). LFE können auf vorhandene Kühlringe einer Blasfolienanlage aufgesetzt werden und führen die Kühlluft entlang eines speziell ausgelegten Strömungsspalt (Bild 4.2) [HKF20, NN20].

Das Grundprinzip eines solchen Systems basiert auf einer gezielten Beeinflussung des Strömungsspalt zwischen LFE und der Folienblase, um den Venturi-Effekt zu induzieren [ZL07, HKF20]. Der Venturi-Effekt beruht auf der Bernoulligleichung der Strömungsmechanik. Er besagt, dass die spezifische Energie entlang einer Stromlinie konstant ist:

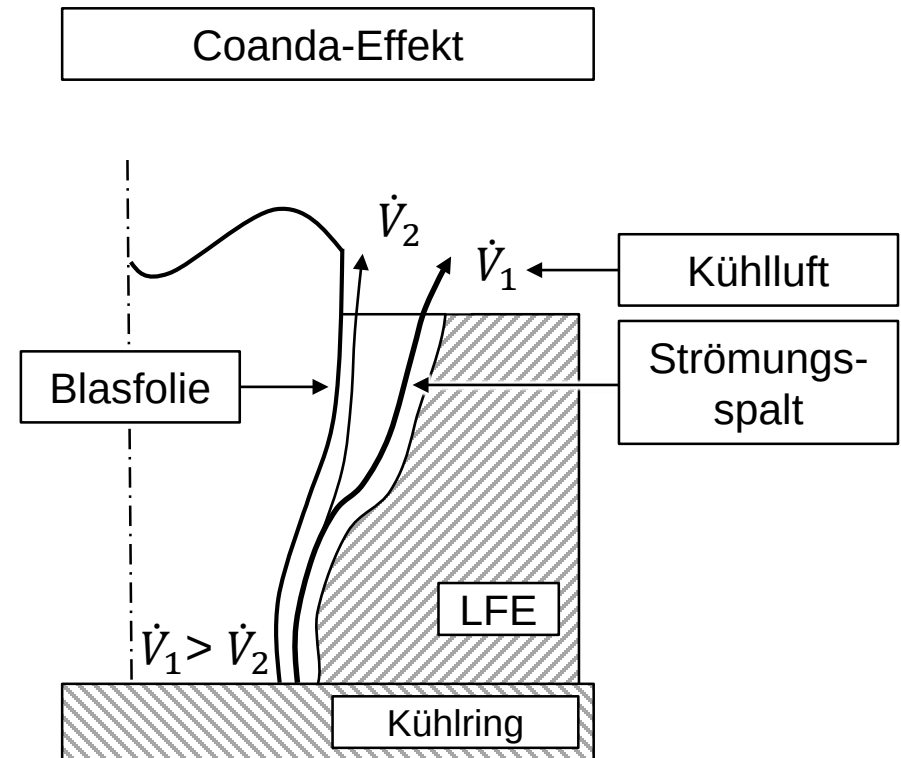
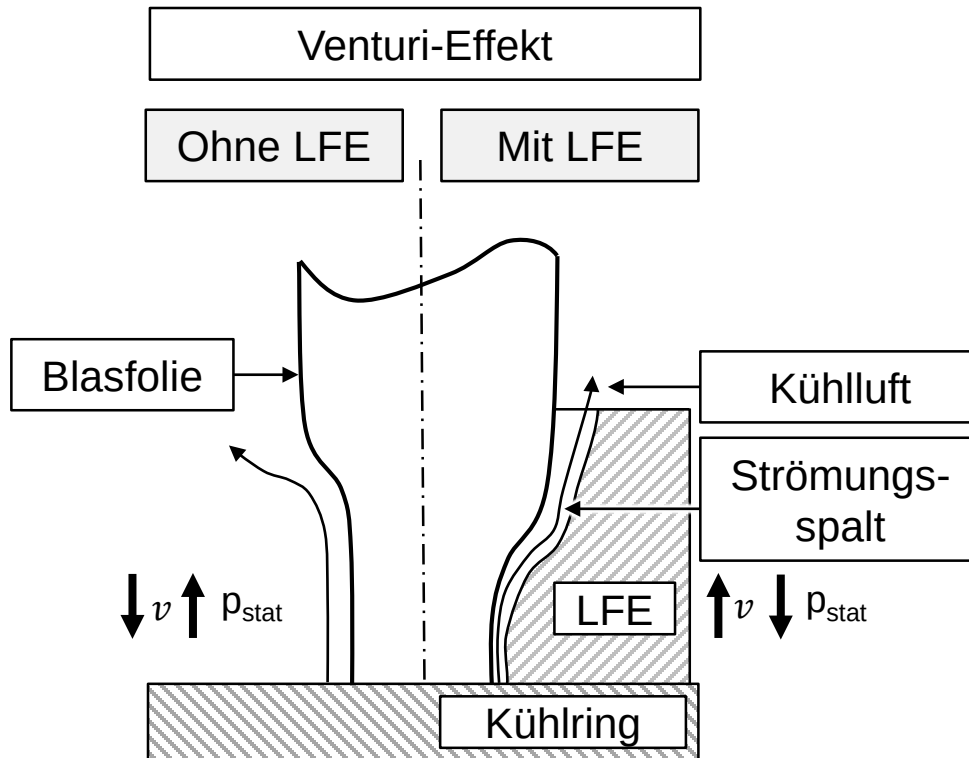
$$E = \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} = \text{const.} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

mit:

E:	Spezifische Energie
v:	Geschwindigkeit des strömenden Mediums
p:	Statischer Druck
ρ :	Dichte des strömenden Mediums

Beim Durchströmen eines Fluids durch eine Rohrverengung, bzw. Strömungsspalt, steigt die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend der Kontinuitätsgleichung an, während der im Strömungsspalt herrschende statische Druck abnimmt (Gl. 4.8). Der hydrodynamische Druck ergibt sich aus der kinetischen Energie der strömenden Fluidelemente in einer Strömung, welcher quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt [Sch10, SV05, ZL07]. Die Reduzierung des statischen Luftdruckes im Strömungsspalt führt zu einem Druckausgleich, sodass sich die Folienblase im Strömungsspalt früher aufweitet (Bild 4.2, links). Durch die frühzeitige Aufweitung der Blasfolie steht eine größere Wärmeaustauschfläche A zur Verfügung, was nach Gleichung 4.4 in einem höheren Wärmeentzug resultiert [NN89]. Eine weitere Kühlleistungssteigerung ergibt sich nach Gleichung 4.5 und 4.6 durch die gesteigerte Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft. Um den Venturi-Effekt optimal zu nutzen, muss der Strömungsspalt zwischen Folienblase und LFE möglichst schmal ausgeführt sein [HKF20].

Strömungsphänomene für mehr Kühlleistung: Venturi- und Coanda-Effekt



Neben dem Venturi-Effekt ist ebenfalls der Coanda-Effekt zu berücksichtigen. Strömt ein Fluid in unmittelbarer Nähe einer Oberfläche, bildet sich ein Strömungsfeld gemäß des Coanda-Effektes aus. Die Strömung haftet dabei an der Oberfläche, auch wenn sich diese in ihrem Verlauf von der Strömungsrichtung wegkrümmt und somit nicht ideal flach ist [SV00a, SV00b]. Bild 4.2 (rechts) veranschaulicht den Coanda-Effekt für den Fall einer Luftführungseinheit in der Blasfolienextrusion. Der dargestellte Strömungsspalt zwischen Blasfolie und LFE nimmt in Extrusionsrichtung zu, sodass sich als Folge dieser Zunahme eine ebenfalls größere 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-Effektes, ebenfalls möglichst schmal eingestellt werden [HKF20].

4.4 Patentrecherche zur Erhöhung der Kühlleistung durch Luftführungseinheiten

Es gibt einige Patente, die verschiedene Ausführungen (starr sowie flexibel), einer in Bild 4.2 dargestellten Luftführungseinheit beschreiben. Die wichtigsten Patente werden im Folgenden beschrieben.

Starre Systeme

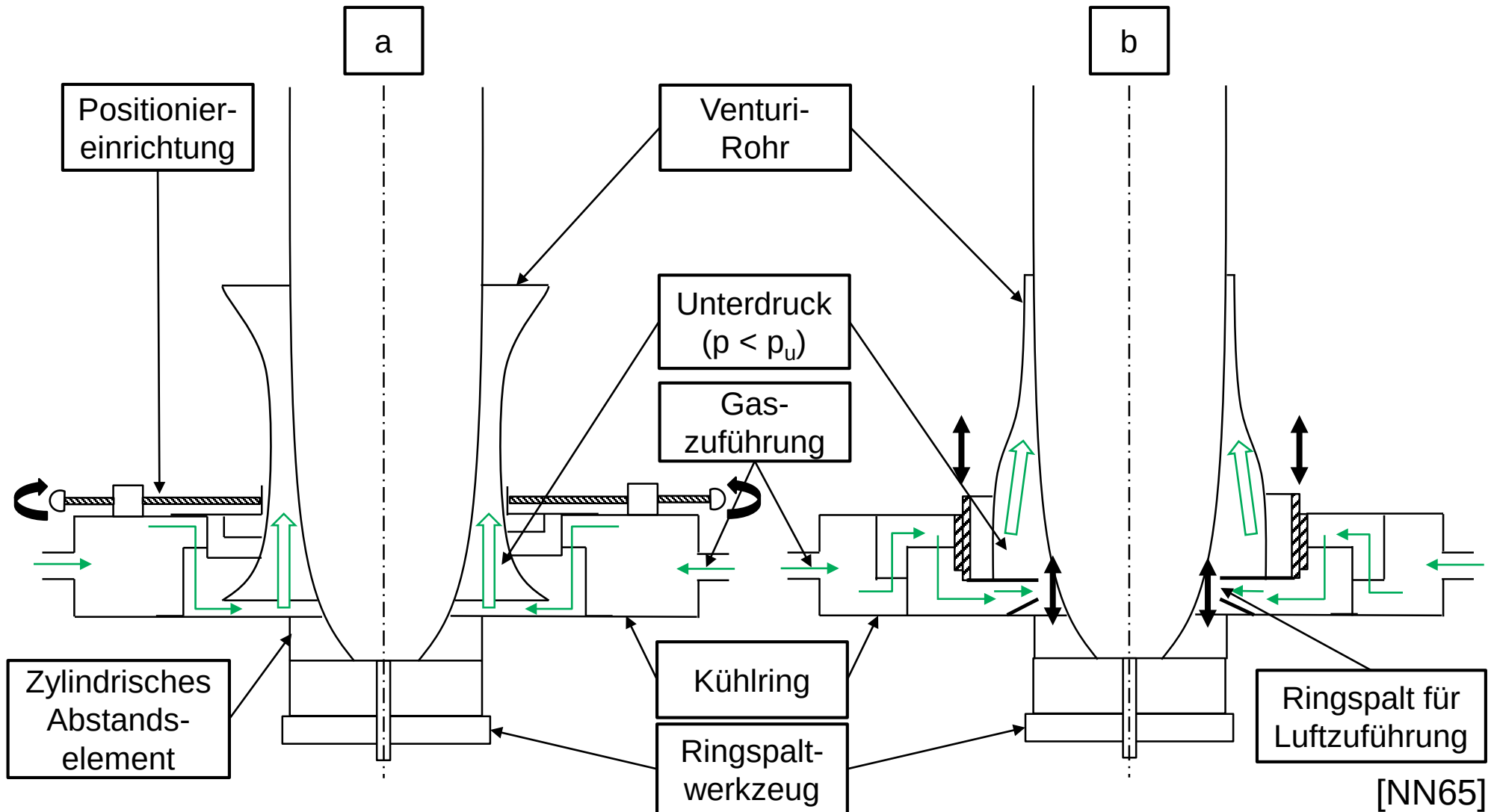
US 3167814: Vorrichtung zur Herstellung rohrförmiger Blasfolie [NN65]:

Die im Jahr 1965 zum US-Patent angemeldete Vorrichtung betrifft eine Apparatur zur Erhöhung der Kühlleistung und einer verbesserten Stabilisierung der Schlauchbildungszone in der Blasfolienextrusion (Bild 4.3). Dazu sieht die Erfindung ein Venturi-Rohr vor, welches die Folie werkzeugnah umgibt und so einen Ringspalt zwischen Rohr und Folienblase erzeugt. Ein Venturi-Rohr überführt die Kühlluft in die benötigte, axiale Strömungsrichtung entlang des Extrudates. Um das Venturi-Rohr zur Folie ausrichten zu können, sind Zentrierschrauben vorgesehen, mit welchen eine Justage im laufenden Betrieb vorgenommen werden kann. Durch die Regulierung des anliegenden Kühlvolumenstroms ist es weiterhin möglich das Aufblasverhältnis anzupassen, um trotz Verwendung eines Venturi-Rohrs mit einheitlichem Durchmesser, verschiedene Foliendurchmesser realisieren zu können. Eine Verstellbarkeit des Venturi-Rohrs hinsichtlich seines Durchmessers ist in dieser Erfindung nicht vorgesehen (starres System), so dass dieses, je nach Anwendung, offline getauscht werden muss.

EP 0 121 158 B1: Kühlvorrichtung für aus einem Folienblaskopf extrudierte Kunststoffschlauchfolien [NN86]:

Die von der Firma Windmüller & Hölscher KG, Lengerich, entwickelte Erfindung aus dem Jahr 1983 befasst sich mit einem Konzept zur Erhöhung der Kühlleistung in der Blasfolienextrusion

Patent US 3167814: Vorrichtung zur Herstellung rohrförmiger Blasfolie



durch Nutzung strömungsmechanischer Erkenntnisse aus der Luftfahrttechnik. Ziel der Entwicklung ist es, die Stabilität der Folie auch bei größeren Kühlleistungen der Kühlringe zu erhalten. Dazu sind die Luftleitflächen, welche die Folie sowohl außen als auch im Inneren der Blase umgeben, konvex von der Blase gekrümmt und sind nach dem Vorbild von Flugzeugtragflächen gestaltet. Die Strömung aus den Düsenspalten von einem oder mehreren Kühlringen ist dabei so ausgerichtet, dass sie parallel oder spitzwinklig zur Oberfläche der Folie verläuft. In der Detailansicht „X“ einer möglichen Ausführungsform nach Bild 4.4 ist ein Ausschnitt einer die Folie umgebenden Luftleitfläche mit dem Verlauf der Luftströmung dargestellt. Im foliennahen Bereich kommt es zu einer Ausbildung des Venturi-Effekts, welcher ein Ansaugen der Folie an die Leitflächen ermöglicht und die Folie stabilisiert.

EP 0 285 368 B1: Blasenbildungs- und Stabilisierungsvorrichtung zur Verwendung in einem kontinuierlichen Extrusionsverfahren zur Herstellung einer Blasfolie [NN94]:

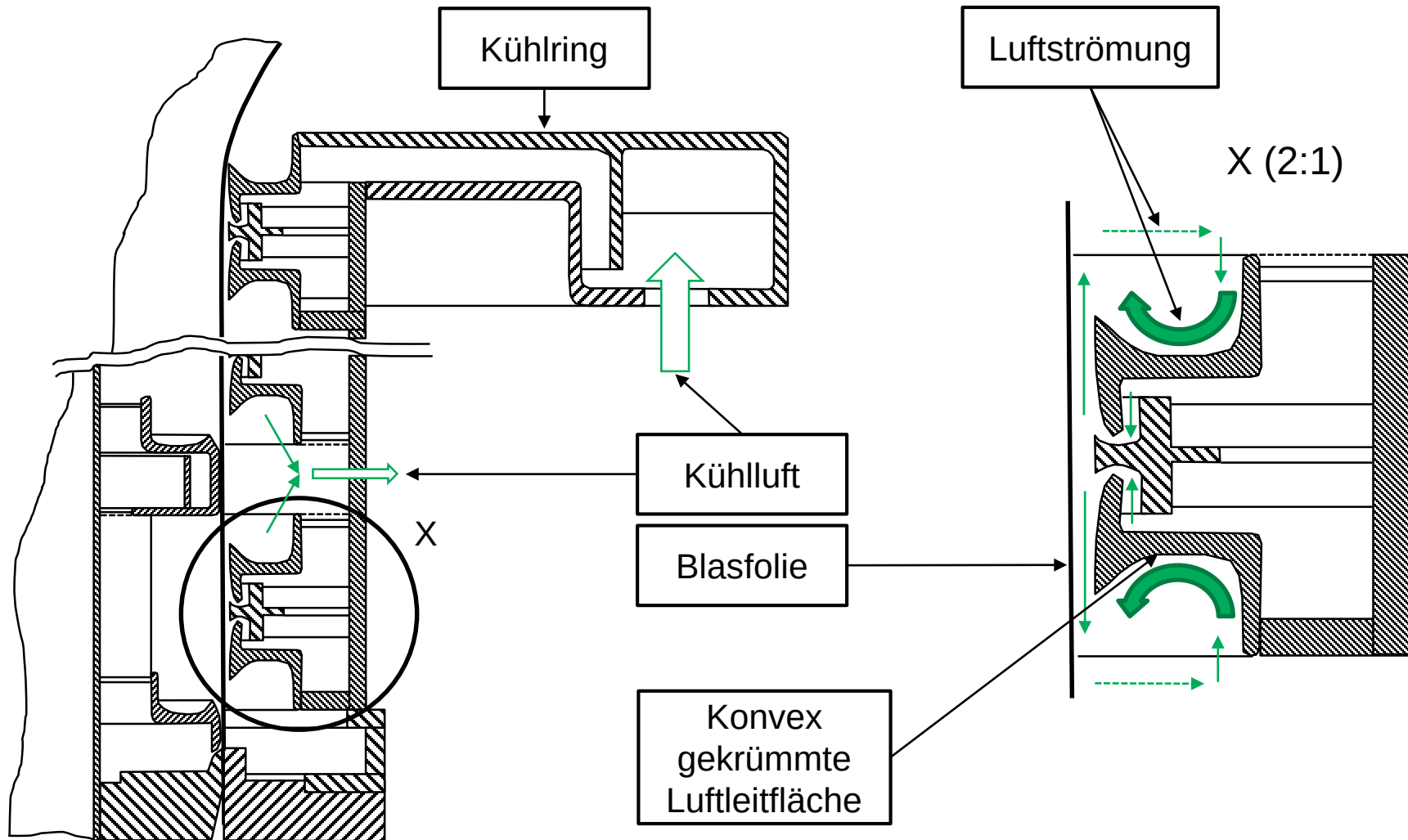
Die patentierte Erfindung aus dem Jahr 1988 befasst sich mit einer möglichst schnellen Kühlung der austretenden Schmelze, um die Schmelzestabilität des Materials zu erhöhen und effektiv, auch in Kombination mit bekannten Kühleinrichtungen und damit synergetisch optimal, kühlen zu können. Das Verfahren verspricht eine im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess höhere Produktivität (ca. 15 %) sowie eine verbesserte Folienqualität. Die Erfindung (Bild 4.5) sieht eine werkzeugnahe Kühlung der noch instabilen Schlauchfolie im Inneren der Blase vor. Dazu wird stromaufwärts ein schalenförmiger Dorn vorgesehen, welcher mit dessen kontinuierlicher Unterfläche und dem außenliegenden Doppellippenkühlring einen radialen Kühlspace bildet. Basierend der aerodynamischen Theorie ist anzunehmen, dass die Hochgeschwindigkeitskühlluft, welche zwischen Folie und Dorn mittels einer Zuleitung durch das Werkzeug zugeführt wird, entsprechend dem Grenzschichtmodell nicht von der Oberfläche des Dorns wegwandert und sich beim Verlassen desselben an die Folie heftet. Im unmittelbaren Bereich des Werkzeugaustrittes, kommt es durch die Hochgeschwindigkeitskühlluft zu einer Niederdruckzone, sodass die Folie in Richtung des Dorns angesaugt wird.

Flexible Systeme

EP 0 078 738 B1: Vorrichtung und Verfahren zum Kühlen einer rohrförmigen Kunststofffolie [NN82]:

Das europäische Patent EP 0 078 738 B1 aus dem Jahr 1982 beschreibt eine Vorrichtung zur Kühlung der Schlauchbildungszone, welche sowohl innerhalb als auch außerhalb der Blasfolie einen einstellbaren Strömungsspalt vorsieht. Bild 4.6 zeigt den schematischen Aufbau der Erfindung. Im Innenraum der Folienblase wird eine dehnbare Hülle aufgespannt, welche am Ringspaltwerkzeug derartig befestigt ist, dass ein gasförmiges Fluid durch eine Zuführung einströmen kann. Die Dehnung und damit der Durchmesser der innenliegenden Hülle können somit in

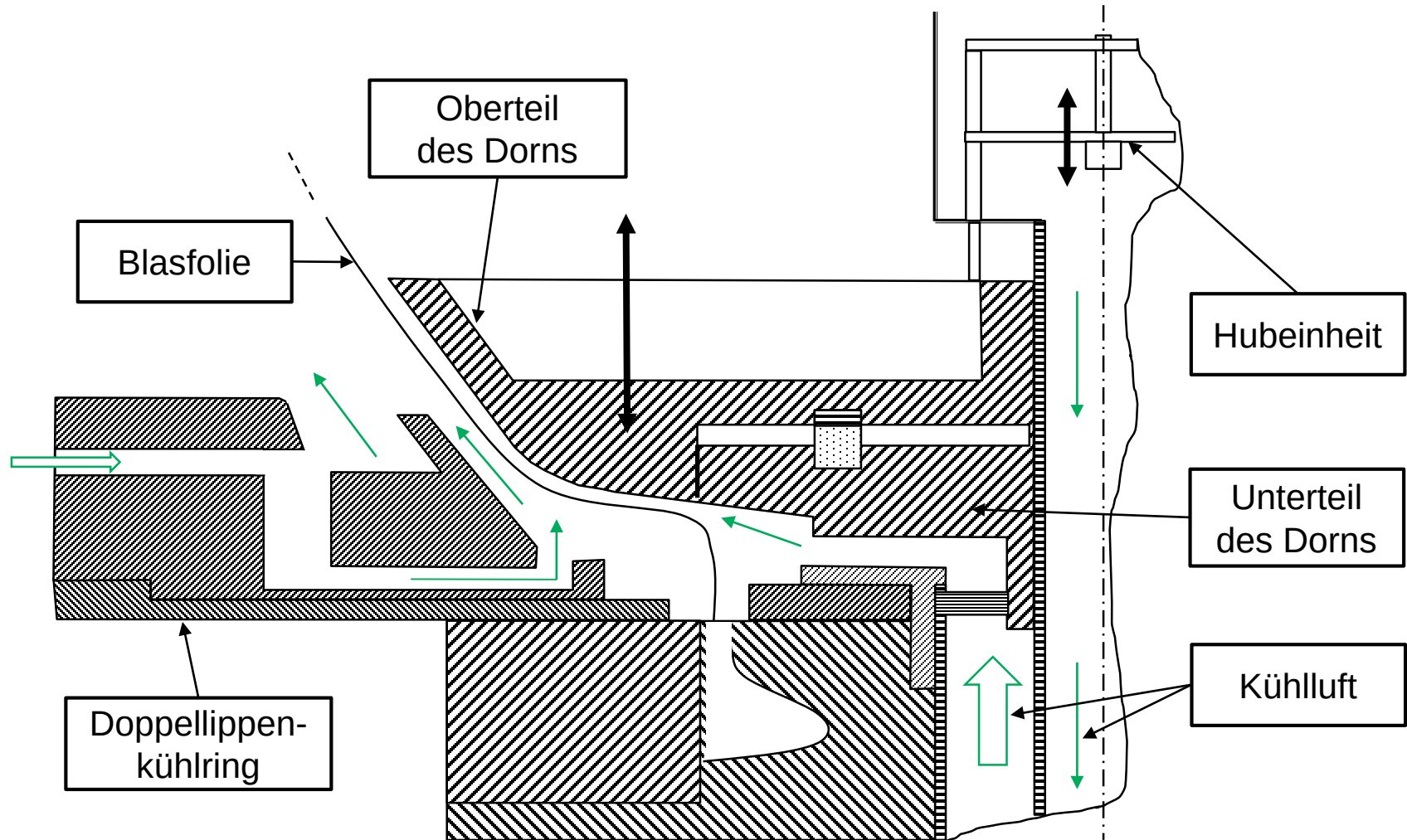
Patent EP 0 121 158 B1: Kühlvorrichtung für extrudierte Kunststoffschlauchfolien



[NN86]

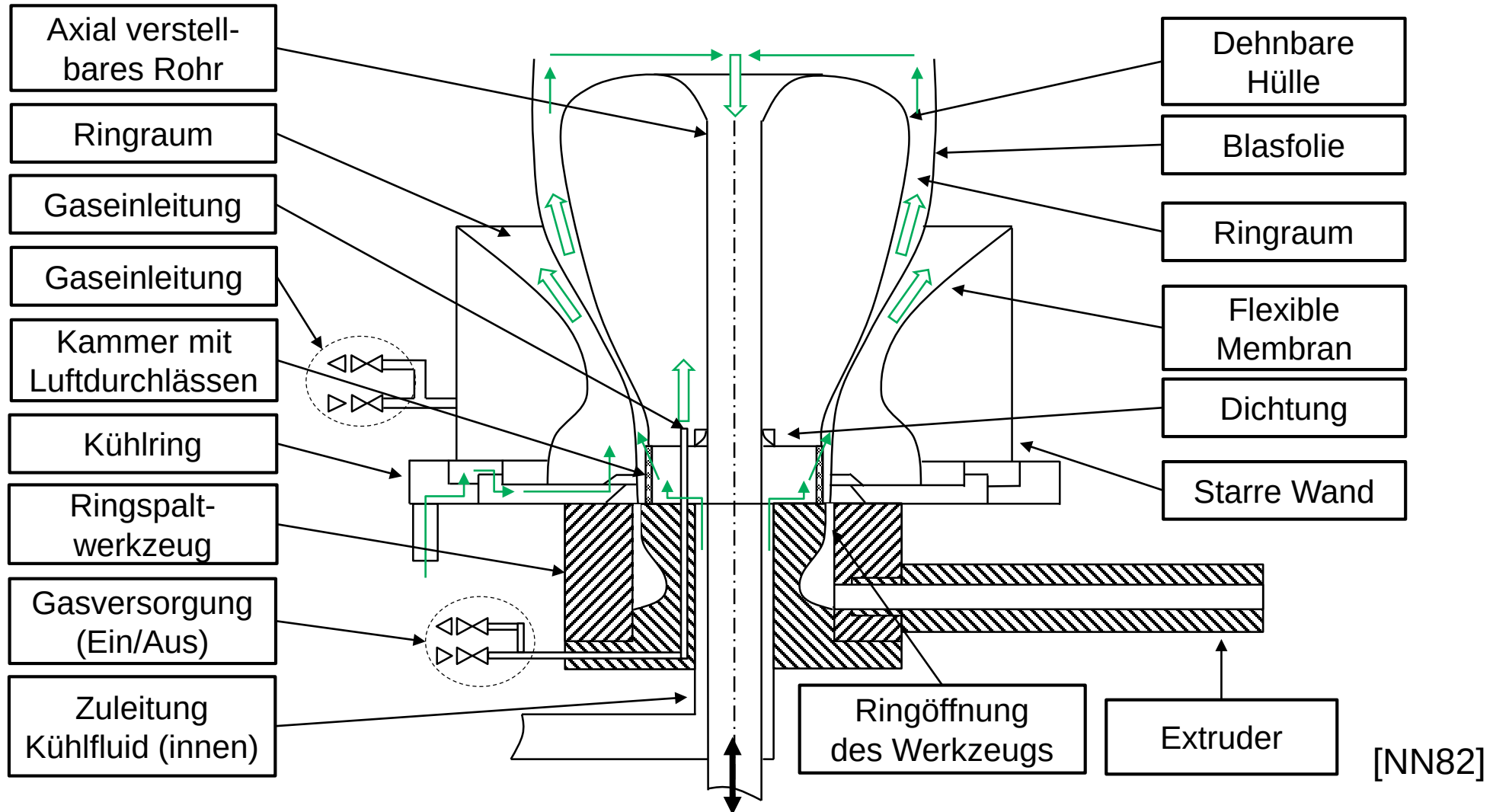


Patent EP 0 285 368 B1: Blasenbildungs- und Stabilisierungsvorrichtung



[NN94]

Patent EP 0 078 738 B1: Vorrichtung und Verfahren zum Kühlen einer Kunststoffolie



Abhängigkeit des anliegenden Gasdrucks flexibel eingestellt werden. Dies ermöglicht die Ausbildung eines Strömungsspalt zwischen jener Hülle und dazu außenliegender Blasfolie. Die Geometrie der Hülle ist dabei insbesondere im Bereich der Schlauchbildungszone so vorgeformt, dass im aufgeweiteten Zustand das Profil der Hülle dem der zu produzierenden Blasfolie folgen kann.

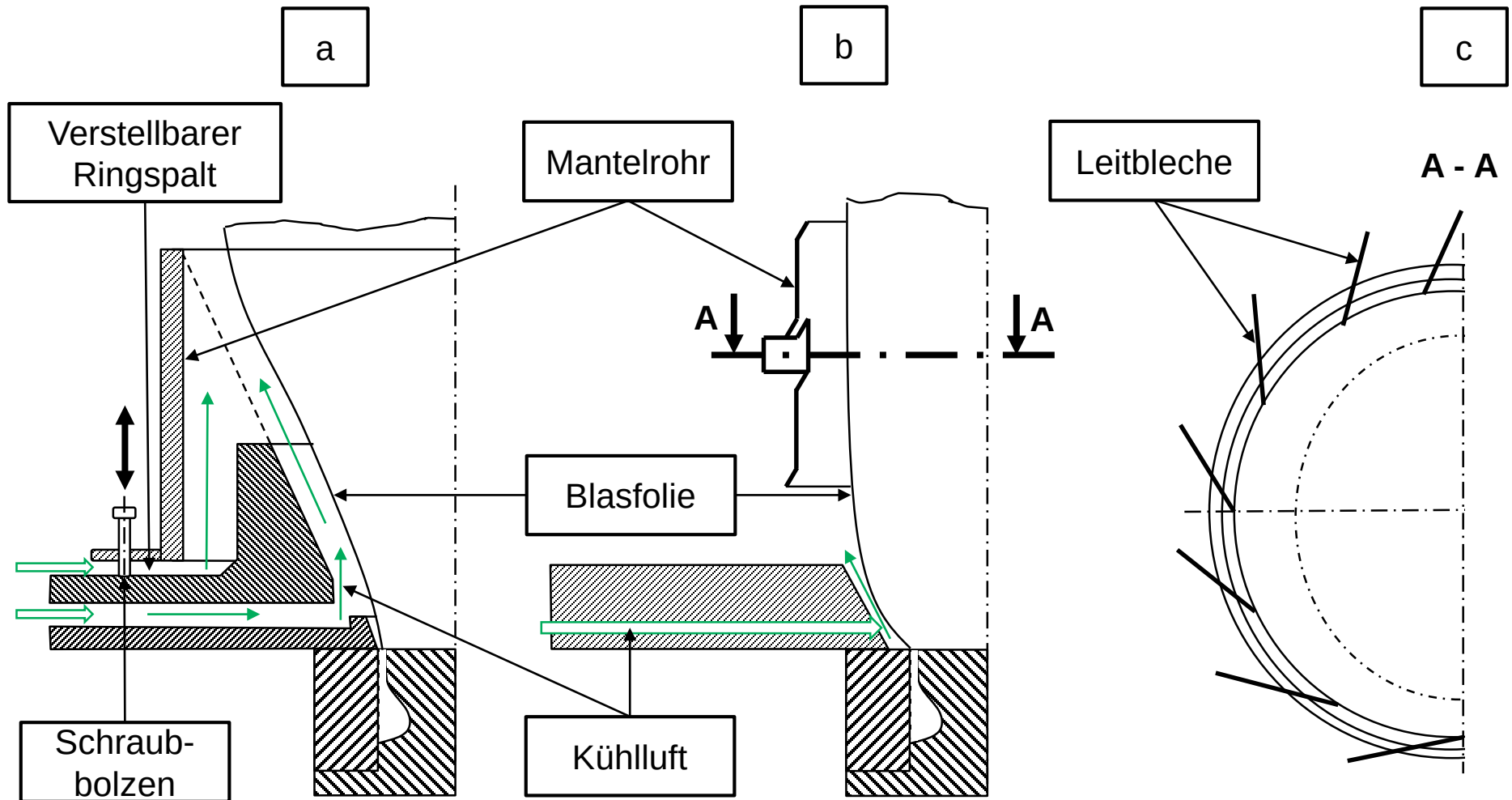
DE 2 256 942: Vorrichtung zur Herstellung von Blasfolien [NN74]:

Im Jahr 1972 meldet die Firma Reifenhäuser GmbH & Co. KG, Troisdorf, eine Erfindung zum Patent an, welche vorsieht, ein Mantelrohr an unterschiedliche Betriebspunkte anpassbar zu gestalten. Das Mantelrohr sieht dabei eine verstellbare, radiale Öffnung im Bereich des Kühlrings vor, durch welche zusätzliche Luft in den Luftspalt einströmen und die Druckverhältnisse beeinflussen kann. Im einfachsten Fall wird diese Verstellung durch Schraubbolzen realisiert, welche den Abstand zwischen Mantelrohr und Leitringträger bestimmen. Bild 4.7 a zeigt die Funktionsweise des zusätzlichen Luftspaltes in der beschriebenen Ausführungsform. Ein Vorteil der Erfindung liegt darin, dass Parameter, wie die Höhe des Spaltes oder auch die Menge und Temperatur der zusätzlich zugeführten Luft reproduzierbar an die herrschenden Betriebsverhältnisse anpassbar sind, wodurch Aufblasverhältnis und Verstreckung der Blasfolie flexibel gesteuert werden können. In einer weiteren Variante (Bild 4.7 b) ist das Mantelrohr mit größerem Abstand über dem Kühlring angeordnet und ist an seinem unteren Ende mit einer Einströmausformung für die Kühlluft ausgestattet. Um die Turbulenz und damit den Wärmeübergang im System weiter zu erhöhen, ist es bei letztgenannter Ausführung möglich, die zusätzlichen Luftführungsspalte mit drallerzeugenden Leitblechen (Bild 4.7 c) auszustatten, die ebenfalls einstellbar und damit an verschiedene Prozessbedingungen anpassbar sind.

US 3507006: Vorrichtung zur Herstellung thermoplastischer Folien [NN70]:

Das US-Patent US3507006 aus dem Jahr 1970 beschreibt eine Vorrichtung und Verfahren zum konturnahen Kühlen von thermoplastischen Schlauchfolien in der kontinuierlichen Blasfolienextrusion. Die Leitwand (Bild 4.8 a), welche die Schlauchfolie unmittelbar nach dem Werkzeugaustritt umgibt, ist aus einer Vielzahl von trapezförmigen Lamellen aufgebaut, die in einer kreisförmigen und sich überlappenden Anordnung so montiert sind, sodass dessen kurze und lange Kanten die Unter- und Oberkante einer geschlossen ringförmigen Leitwand bilden. Als Material wird ein dünnes Blech aus weichem Stahl oder Berylliumkupfer verwendet, welches in für den Anwendungsfall zulässigen Grenzen elastisch verformbar ist. Je nach Blasengeometrie können die Elemente mit einer oder mehrerer Einstellvorrichtung(en) nach Bild 4.8 b ineinander oder auseinander gefahren werden, um den Innendurchmesser der Leitwand zu verringern oder entsprechend zu vergrößern.

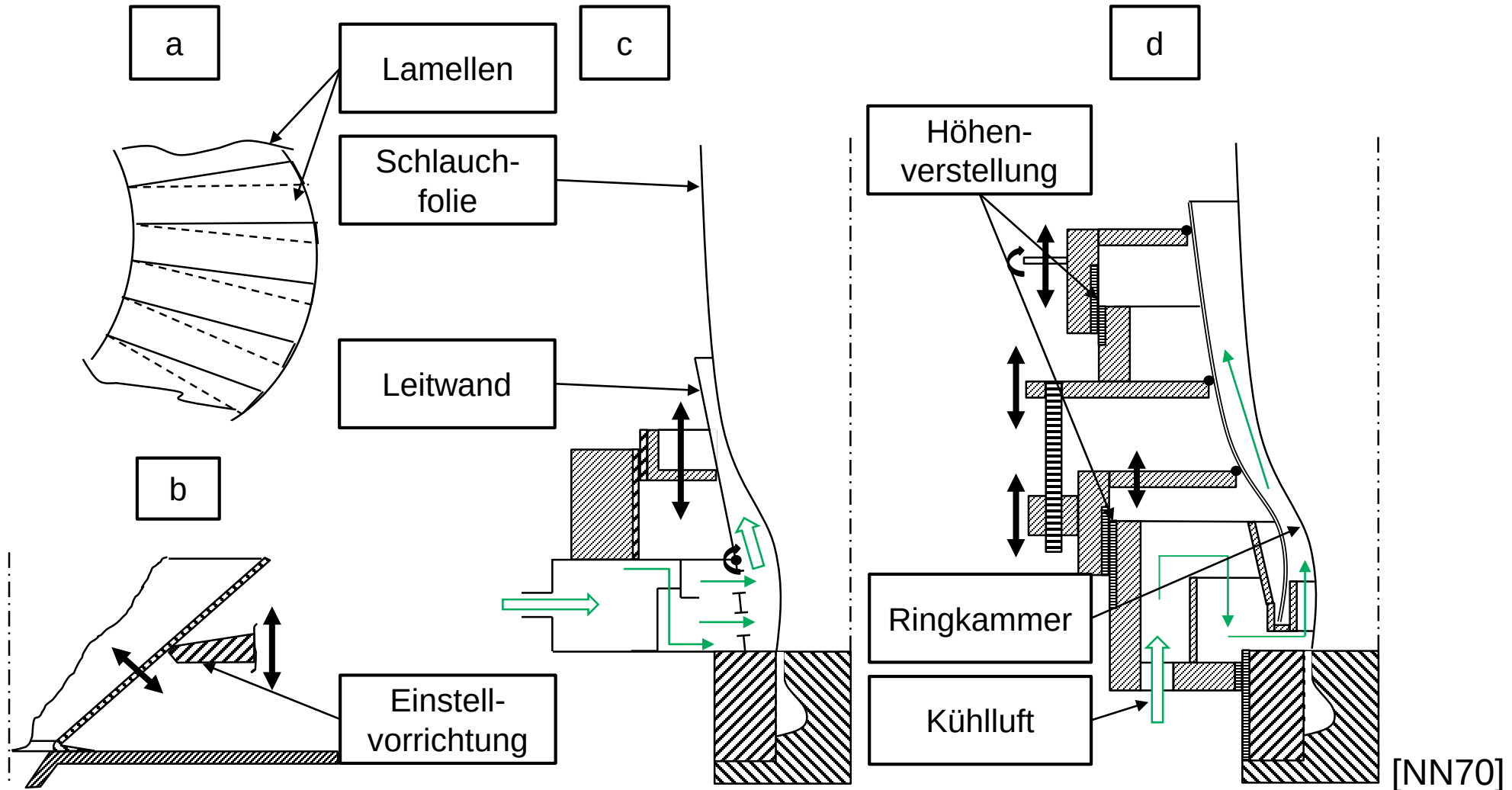
Patent DE 2 256 942: Vorrichtung zur Herstellung von Blasfolien



[NN74]



Patent US 3507006: Vorrichtung zur Herstellung thermoplastischer Folien



5 ZIEL, HERAUSFORDERUNG UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN

Wie der Stand der Technik und die Patentrecherche zeigen, haben sich in der Blasfolienproduktion starre und flexible Luftführungseinheiten etabliert, welche es ermöglichen, die vom Kühlring bereitgestellte Kühlluft konturnah an die Oberfläche der Blasfolie heranzuführen, wodurch die Kühlleistung und damit der Massedurchsatz effizient gesteigert werden kann. Starre Systeme sind dabei ausschließlich für eine prozess- sowie materialabhängige Foliengeometrie optimiert, sodass bei einem Materialwechsel oder bei Änderung der Prozessparameter ein Austausch der Einrichtung notwendig ist, was zu teuren Stillstands- und Umrüstzeiten der Anlage führt. Flexible Systeme sind in der Lage, sich auch im laufenden Betrieb an wechselnde Produktionsbedingungen anzupassen. Die vorgestellten Systeme weisen jedoch nur eine begrenzte Verstellbarkeit auf, sodass der gewünschte Venturi-Effekt nicht für alle Foliengeometrien ausgebildet werden kann und somit die vorgestellten Technologien ihr eigentliches Potenzial zur Massedurchsatzsteigerung nicht vollständig ausschöpfen können. Daneben sind die bisher vorgestellten Systeme zudem nicht adaptiv und automatisch verstellbar, was einen Einsatz in einer Produktionsumgebung nahezu unmöglich macht.

Das Ziel des Forschungsprojektes 20100 N war daher, die Entwicklung und Bewertung einer adaptiven, nachrüstbaren Luftführungseinheit (LFE), die durch eine flexible Anpassung der Geometrie des Strömungsspalt, im Bereich der Folienblase, eine signifikante Steigerung des Massedurchsatzes in der Blasfolienextrusion bei gleichzeitig stabiler Folienblase ermöglicht.

Für die Entwicklung und Erprobung eines solchen Systems wurde zunächst eine Abschätzung der benötigten Geometrie der zu entwickelnden Luftführungseinheit durchgeführt, diese anschließend konstruiert und gefertigt. Die Einflüsse des daraus abgeleiteten neuartigen Kühlsystems auf den erzielbaren Massedurchsatz sowie die Folieneigenschaften, wurden anschließend in Versuchen ermittelt. Um die Einsetzbarkeit der LFE zudem in Produktionsanlagen zu erleichtern, wurde außerdem ein Konzept für deren Betrieb und Regelung entwickelt.

6 VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN

Im Nachfolgenden werden die Anlagentechnik, die eingesetzten Materialien, als auch alle erforderlichen Analysemethoden beschrieben, welche für die Untersuchung der zu entwickelnden Luftführungseinheit in der Blasfolienextrusion wichtig waren.

6.1 Anlagentechnik

6.1.1 Extruder

Bei der zur Versuchsdurchführung verwendeten Anlage handelt es sich um eine Dreischicht-Coextrusions-Blasfolienanlage der Fa. Kuhne Anlagenbau GmbH, St. Augustin, vom Typ KFB 45/600 besitzt. Die Einschneckenextruder A und C haben einen Schneckendurchmesser von 45 mm bei einem L/D-Verhältnis von 24, Extruderschnecke B besitzt einen Durchmesser von 35 mm bei einem L/D-Verhältnis von 20. Für die Versuchsdurchführung wurden die beiden durchsatzstärkeren Extruder A und C verwendet. Alle Extruder verwenden eine 3-Zonen-Schnecke mit Scher- und Mischelementen. Eine Dosierung des Kunststoffgranulats erfolgt über gravimetrische Dosiereinheiten der Fa. PlastControl GmbH, Remscheid [Lor16, Sch15, Vos19].

6.1.2 Werkzeug

Die von den Extrudern erzeugte Schmelze wird durch einen Radialwendelverteiler in die anschließende Austrittsdüse mit einem Außendurchmesser von 80 mm gefördert. Der Innendurchmesser kann durch verschiedene Einsätze von 0,7 mm bis 1,5 mm variiert werden. Für die Versuche kam ein Düseneinsatz mit einem Austrittsspalt von 1,5 mm und einer Bügelzonenlänge von 8 mm zum Einsatz.

6.1.3 Außenluftkühlung

Sobald die Schmelze aus der Düse austritt, wird diese in der Schlauchbildungszone mithilfe eines Doppellippenkühlrings abgekühlt. Zur Kühlung der Luft wurde ein Kühlaggregat der Fa. LAUDA Dr. R. Wobser GmbH Co KG, Lauda-Königshofen, verwendet. Dabei wurde die Temperatur an dem Gerät so eingestellt, dass die Kühllufttemperatur am Doppellippenkühlring für alle Versuchspunkte konstant 20 °C betrug.

6.2 Materialien

Laut Antrag sollten in dem Forschungsvorhaben ein PE-LD als auch ein PE-LLD mit jeweils zwei unterschiedlichen MFR (Melt-Flox-Rate) untersucht werden.

Eine Diskussion im projektbegleitenden Ausschuss (PbA) kam zu dem Ergebnis, dass das geplante Vorgehen, welches im Antrag formuliert war, nicht zielführend ist. So führt der MFR bei sonst gleicher Prozesseinstellung zu keiner Änderung der Foliengeometrie innerhalb der Schlauchbildungszone, sodass zudem aufgrund nahezu gleicher thermischer Eigenschaften unabhängig von dem MFR von gleichen Durchsatzsteigerung auszugehen ist. Der PbA beschloss einstimmig, dass anstatt der Untersuchung des Einflusses des MFR die Untersuchung eines PE-HD als auch eines PP erfolgen sollte (siehe 2. PbA-Protokoll).

Die Eigenschaften der verwendeten Materialien sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Material	Typ	Hersteller	MFR [g/10 min]
PE-LD	2102 NOW	Sabic	2,5 bei 190 °C und 2.16 kg
PE-LLD	6118	Sabic	0.9 bei 190 °C und 2.16 kg
PE-HD	FO 4660	Sabic	0,7 bei 190 °C und 2.16 kg
PP	Moplen 310 D	Lyondellbasell	0,8 bei 230 °C und 2.16 kg

Tabelle 6.1: Untersuchte Materialien nach Absprache mit dem PbA

6.3 Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften

6.3.1 Bestimmung des Massedurchsatz

Die Messung des Massedurchsatzes ist für die Bestimmung der Kühlleistung von großer Bedeutung. Über den Massedurchsatz kann ein direkter Rückschluss auf die Kühlleistung gezogen werden, sodass eine erhöhte Kühlleistung mit einem erhöhten Durchsatz korreliert. Für eine Beurteilung der Effizienz des entwickelten Systems wurde daher in einem ersten Schritt eine Methodik für die Effizienzbewertung entwickelt: Dafür eignet sich die Frostlinienhöhe, welche durch die Kristallisationstemperatur des Kunststoffes charakterisiert ist. Für eine maximale Kühlleistung ist es wichtig, dass sich die gesamte Schlauchbildungszone innerhalb der zu entwickelten Luftführungseinheit befindet. Demnach sollte die Höhe der Frostlinie in etwa in der Höhe des LFE-Austrittes liegen. Die Frostlinie wurde daher für alle Versuchspunkte, d. h. mit und ohne LFE, auf entsprechender Höhe gehalten, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. 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 wieder erreicht ist [HKF20].

Die Messung des Massedurchsatzes wurde aufgrund einer zu ungenauen gravimetrischen Durchsatzbestimmung der Produktionsanlage von Hand bestimmt. Dazu wurde bei jedem Versuchspunkt über einen Zeitraum von 120 Sekunden die extrudierte Folie von Hand aufgewickelt und anschließend auf einer Waage der Fa. PCE Deutschland GmbH, Meschede, gewogen und der Massedurchsatz ermittelt. Die Durchsatzschwankung wurde einmalig über fünf Proben bei einem Versuchspunkt bestimmt. Versuche zeigten, dass die Durchsatzschwankung so gering war, dass diese vernachlässigbar ist.

6.3.2 Bestimmung der Foliendickenschwankung

Die Messung der Foliendicke erfolgte mit einer analogen Dickenmessuhr der Fa. Käfer Messuhrenfabrik GmbH, Villing-Schwenningen. Die Messuhr hat eine Ablesegenauigkeit von 5 μm . Die Messmittelfähigkeit ist für den Anwendungsfall bewiesen. Die Dickenmessung erfolgte an 20 Punkten über den Umfang der Blasfolie und wurde an drei Stellen in Extrusionsrichtung wiederholt (3-fach Bestimmung).

6.3.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte (Reißspannung und –dehnung) der hergestellten Folienproben erfolgte mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick Z10 der Firma Zwick GmbH & Co KG, Ulm. Die zu prüfenden Probekörper wurden nach DIN EN ISO 527-3 Typ 2 auf einer Schneidemaschine hergestellt. Die Proben hatten eine Breite von 15 mm und eine Länge von 100 mm. Es wurden Proben sowohl in Extrusionsrichtung als auch quer zur Extrusionsrichtung entnommen. Der Versuchsablauf erfolgte nach DIN EN ISO 527-1. Die Einspannlänge der Proben betrug 50 mm. Die Proben wurden mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von 200 mm/min belastet. Das aufgezeichnete Kraft-Weg-Diagramm wurde mit der Querschnittsfläche der Kunststoffprobe ins Verhältnis gesetzt, um die technische Bruchspannung und die Bruchdehnung zu ermitteln. Für jeden Versuchspunkt wurden 5 Proben geprüft.

Zusätzlich wurden die Schrumpfeigenschaften der Folien ermittelt. Die Schrumpfmessung diente zur Bestimmung von Molekülorientierungen in der Kunststoffprobe. Die Ermittlung der Schrumpfversuche erfolgte in Anlehnung an DIN 55543-4. Die Probekörper wurden aus der Folienbahn, gleichmäßig über die Breite verteilt, längs und quer zur Laufrichtung der Folie entnommen. Als Probekörper wurden Streifen mit einer Breite von 15 mm verwendet. Die Messlänge betrug 100 mm. Der Probekörper wurde faltenfrei in ein Silikonöl eingetaucht. Die Messflächen waren dabei vollständig von der Prüfflüssigkeit umgeben. Die Prüftempe-

ratur für die Schrumpfmessung befand sich oberhalb der Kristallitschmelztemperatur des jeweiligen Materials. Folgende Tabelle zeigt die für die unterschiedlichen Materialien verwendeten Temperaturen des Silikonöls.

Material	PE-LD	PE-LLD	PE-HD	PP
Temperatur des Silikonöls [°C]	130	140	150	175

Tabelle 6.2: Prüftemperatur des Silikonöls für die Bestimmung der Schrumpfeigenschaften

Der Folienschrumpf S wurde 3-fach bestimmt und ist wie folgt definiert:

$$S = \left(\frac{L_0 - L}{L_0} \right) \times 100 \% \quad (\text{Gl. 5.1})$$

mit: L_0 : Anfangsmesslänge
 L : Messlänge nach dem Erwärmen

6.3.4 Bestimmung der optischen Eigenschaften

Für die Bestimmung der optischen Eigenschaften wurden Messungen mit einem Messgerät vom Typ Haze-gard plus C der Fa. BYK-Gardner GmbH, Geretsried, durchgeführt, die unter anderem die Messung der Folientransparenz und der Folientrübung (Haze) ermöglichte. Die Messung erfolgte in Anlehnung an dem Industriestandard ASTM D1003, indem je 3 Probenkörper pro Versuchspunkt mit den Abmessungen von 200 mm × 200 mm geprüft wurden.

7 ERMITTLUNG GEEIGNETER GEOMETRIEN DER LUFTFÜHRENDEN MEMBRAN

Vor der Konstruktion und Fertigung einer flexiblen Luftführungseinheit, war es notwendig, geeignete Geometrien für die luftführende Membran bei verschiedenen Prozesszuständen zu ermitteln.

7.1 Optische Vermessung

Zur Ermittlung entsprechender Blasengeometrien wurde mittels der am IKV vorhandenen Blasfolienextrusionsanlage für verschiedene Prozesszustände der Blasendurchmesser in Abhängigkeit der Höhe über dem Düsenaustritt erfasst. Zur Realisierung verschiedener Prozesszustände und Blasengeometrien wurden für alle Materialien Extrusionsversuche bei unterschiedlichen Prozessparametern durchgeführt. Tabelle 7.1 zeigt einen beispielhaften Versuchsplan für die Untersuchung des PE-LD inklusive variabler und konstanter Parameter:

Aufblasverhältnis BUR [-]	2,7 / 3,0 / 3,1 / 3,2 / 3,5 / 3,6 / 3,7
Foliendicke d [μm]	130 / 140 / 150 / 160
Massedurchsatz $\dot{m}$ [kg/h]	17 / 18 / 19 / 20 / 21 / 22 / 23 / 25 / 26
Gebläseleistung P [%]	40 / 50 / 60 / 70
Schmelzetemperatur T [$^{\circ}\text{C}$]	180 / 190 / 200

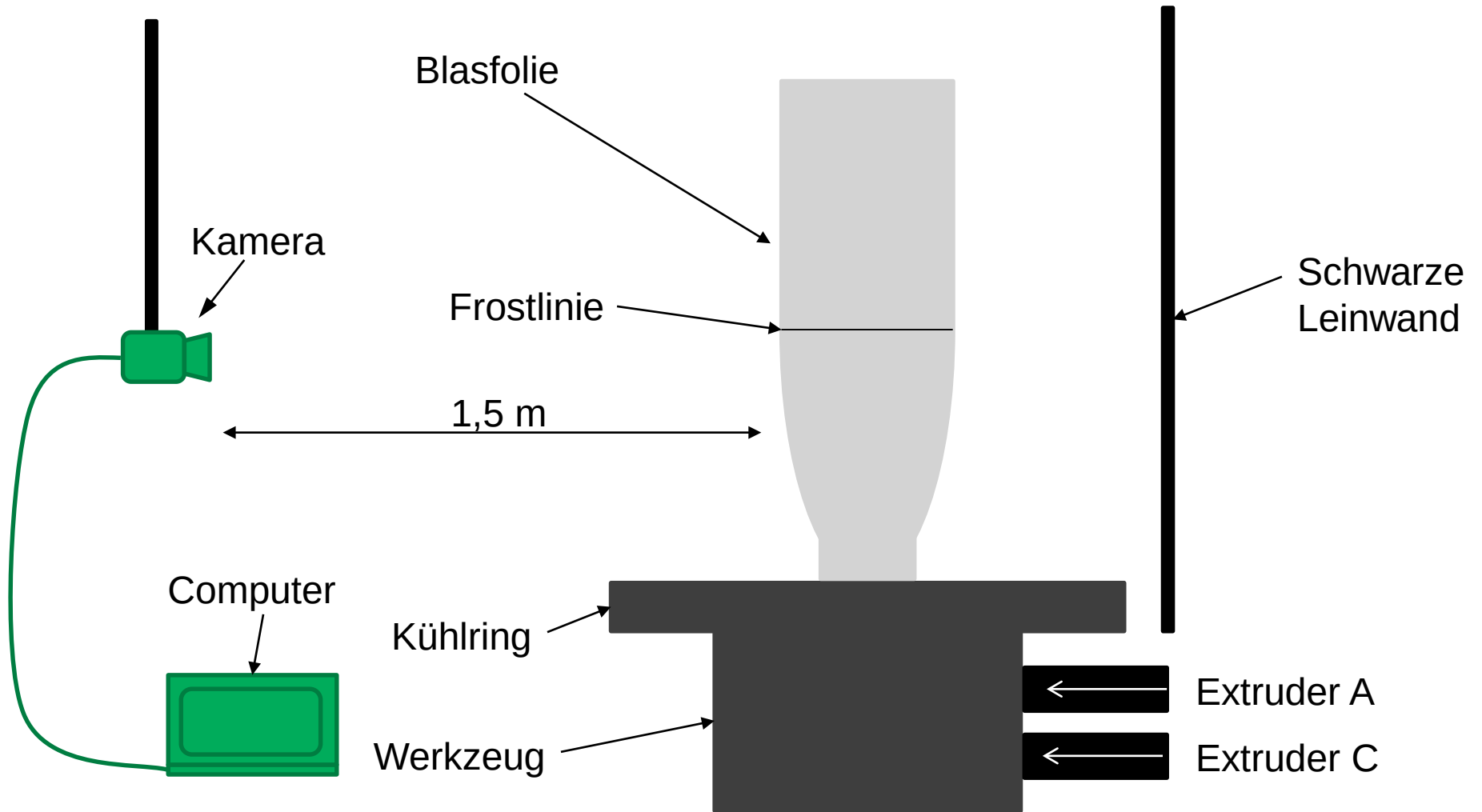
Tabelle 7.1: Untersuchte Parameter zur Ermittlung unterschiedlicher Blasengeometrien [Gla18]

Aus der Vielzahl der ermittelten Blasengeometrien wurden die minimalen und maximalen Werte des Blasendurchmessers in Abhängigkeit der Höhe oberhalb der Werkzeugdüse bestimmt. Die so ermittelten Blasengeometrien dienten als Minimal- bzw. Maximalwerte für den Bereich, den die Verstellbarkeit der luftführenden Membran der zu entwickelnden Luftführungseinheit aufweisen musste. Die Geometrien wurden mittels Bildaufnahmen festgehalten und ausgewertet.

7.1.1 Aufbau eines Messstands zur Ermittlung der Blasengeometrien

Für reproduzierbare Bildaufnahmen wurde eine starre Konstruktion einer Kameralhalterung entwickelt. Bild 7.1 zeigt eine Prinzipskizze des Messstandes. Auf der gegenüberliegenden Seite der Folienblase wurde ein schwarzes, lichtundurchlässiges Tuch befestigt, sodass der extrudierte Folienschlauch für die Bildauswertung gut erkennbar war. Die Bildaufnahmen wurden mit einer Digitalkamera des Typs D40 SLR der Fa. Nikon AG, Chiyoda, Japan, aufgenommen [Gla18].

Prinzipskizze des Messstandes zur Ermittlung der Blasen- geometrien



7.1.2 Analyse der Blasengeometrien

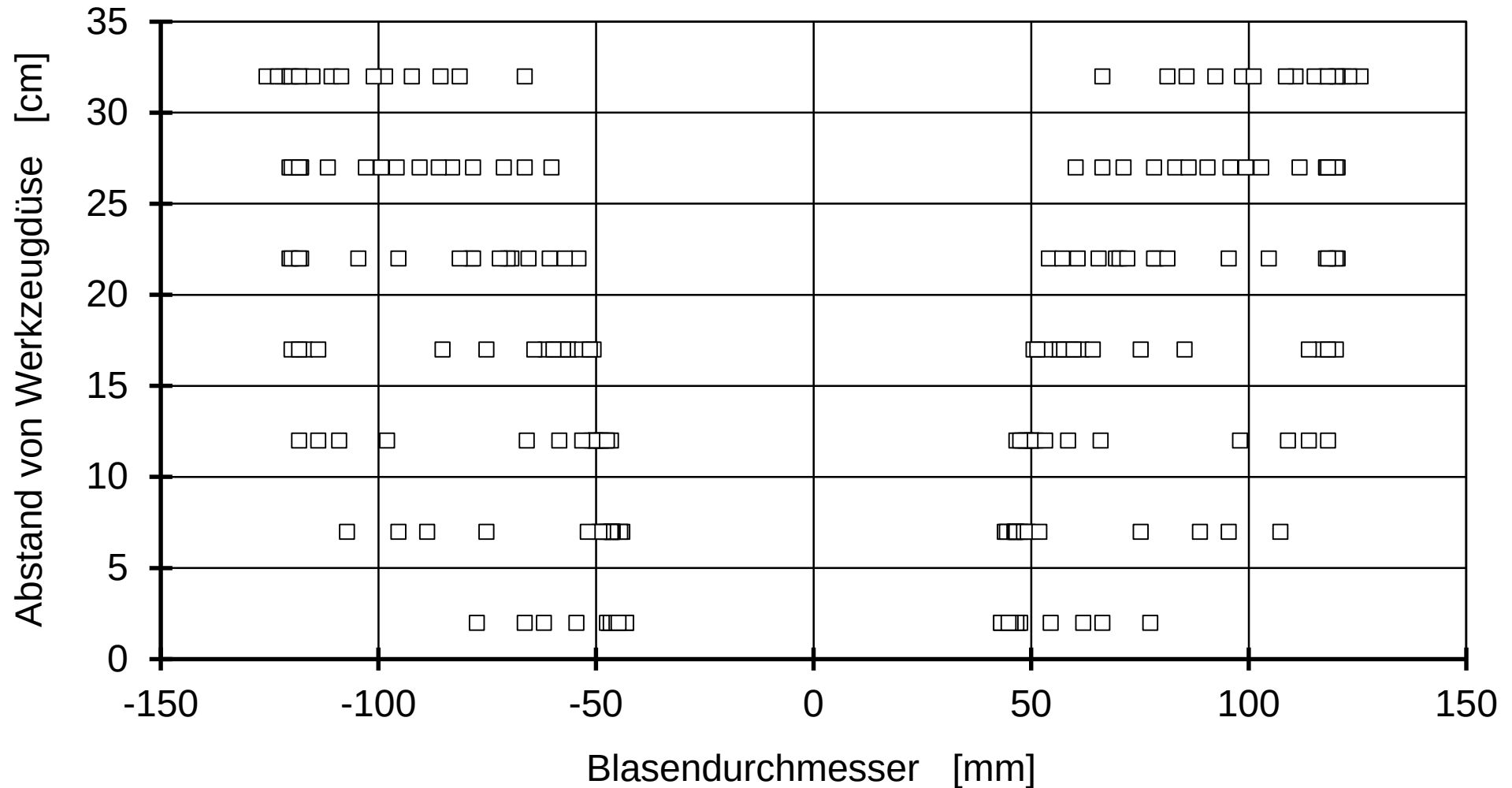
Für die Auswertung der aufgenommenen Bilder wurde die Software „ImageJ“ verwendet. Der Blasendurchmesser wurde für alle Versuchspunkte in regelmäßigen Abständen zum Werkzeugaustritt gemessen. Die Abstände betrugen dabei 2 cm, 7 cm, 12 cm, 17 cm, 22 cm, 27 cm und 32 cm. In der folgenden Tabelle sind die Maximal- und Minimalwerte des Blasendurchmessers der gemessenen Abstände vom Werkzeugaustritt eingetragen.

Abstand zum Werkzeugaustritt [cm]	Maximaldurchmesser [mm]	Minimaldurchmesser [mm]
2	155	86
7	215	88
12	236	93
17	240	101
22	241	108
27	241	120
32	251	133

Tabelle 8.2: Blasendurchmesser bei unterschiedlichen Abständen zum Werkzeugaustritt [Gla18]

In Bild 7.2 ist die Blasenbreite in Abhängigkeit zum Abstand zum Düsenaustritt bei unterschiedlichen Prozesseinstellungen dargestellt. Bei einer Höhe von 2 cm liegt der Blasendurchmesser zwischen 80 mm und 150 mm. Es ist zu erkennen, dass der Minimalwert mit steigendem Abstand zur Werkzeugdüse nur sehr langsam zunimmt. Der Maximalwert hingegen steigt deutlich schneller bis zu einem Abstand von 22 cm von der Werkzeugdüse. Während der Maximalwert des Blasendurchmessers bei einem Düsenabstand von 2 cm nur ungefähr 150 mm beträgt, liegt er bei einem Düsenabstand von 22 cm bereits bei 240 mm. Bei weiter steigendem Abstand zum Düsenaustritt steigt der Maximalwert nur noch geringfügig auf ungefähr 250 mm [Gla18]. Nahezu identische Werte ergaben sich in den Versuchsreihen mit den anderen Materialien, weshalb die dargestellten Durchmesser der Größenordnung für die Verstellbarkeit des zu entwickelnden Systems entsprachen.

Blasendurchmesser an verschiedenen Abständen zum Werkzeugaustritt bei unterschiedlichen Prozessparametern



8 KONSTRUKTION UND INBETRIEBNAHME DES ADAPTIVEN KAMINS

Nach der optischen Vermessung der minimalen und maximalen Foliengeometrien sollte nach Antrag eine genaue Ausgestaltung der flexiblen luftführenden Membran durch die Verwendung austauschbarer, starrer Luftführungselemente erfolgen. Anhand der bekannten Blasengeometrien für die verschiedene Prozesszustände, sollten ringförmige Luftführungselemente, beginnend vom Düsenaustritt, aufgesetzt werden, um einen möglichst geringen Strömungsspalt zwischen Luftführung und Folienblase zu erzeugen. Es sollten sukzessiv weitere Führungselemente aufgesetzt und die Reaktion der Folienblase dokumentiert werden. Dies sollte nach Antrag die Untersuchung der Beeinflussung der Folienblase durch die Luftführung und die Ermittlung der Prozessstabilität für die jeweilige Kombination aus Blasengeometrie und Luftführung ermöglichen. Nach Rücksprache mit dem PbA war dieses im Antrag geplante Vorgehen jedoch nicht zielführend, da die ermittelten Geometrien keinen direkten Transfer auf ein flexibles System zulassen. Der PbA war sich daher einig, dass anstelle der sukzessiven Vorgehensweise mit der Entwicklung einer direkt flexibel verstellbaren Luftführungseinheit auf Basis der zuvor ermittelten Blasengeometrien begonnen werden sollte (siehe 1. PbA-Protokoll).

Bei der Konzeptentwicklung musste anhand der zuvor ermittelten Geometrien eine geeignete Höhe als auch Breite der zu entwickelnden flexiblen LFE festgelegt werden. Bei den Voruntersuchungen (Kapitel 7) war zu erkennen, dass die Blasengeometrie sich hauptsächlich im Bereich zwischen 17 cm und 22 cm vom Düsenaustritt ausformt und ändert. Der Maximalwert des Blasendurchmessers steigt über 22 cm nur noch gering. Eine Luftführungseinheit mit einer Höhe von 22 cm würde daher die Ausformung der Blase umhüllen. Durch die Verwendung der LFE und ein Ausnutzen des Venturi-Effekts war zudem zu erwarten, dass der extrudierte Folienschlauch schneller abkühlt und sich die Frostlinie senkt. Die Maximalwerte des Folienblasendurchmessers würden sich daher, aufgrund des Venturi-Effekts, näher am Werkzeugaustritt befinden. Deshalb war es wichtig, die zuvor bestimmten Maximalwerte mit dem zu entwickelten System reproduzieren zu können [Gla18]. Für die Einstellung eines verstellbaren Strömungsspalt zwischen Folienblase und LFE, wurde ein flexibles Material als luftführende Membran benötigt. Gleichzeitig musste das Material eine Mindeststeifigkeit aufweisen, sodass es sich nicht durch den Druck der Luftströmung verformt.

Für eine Verstellung der Membrangeometrie, boten sich hydraulische und/oder mechanische Lösungen an, die an verschiedenen Höhen eine Verstellung des Membrandurchmessers zu ließen. Im Folgenden werden verschiedene im Forschungsvorhaben umgesetzte Konzepte vorgestellt:

8.1 Druckschläuche

Eine pneumatische Verstellung kann durch ein System mit aufblasbaren Luftkammern realisiert werden. Beispielsweise durch die Schichtung von Druckluftschläuchen mit unterschiedlichen Durchmessern (Bild 8.1). Die Verstellung der flexiblen luftführenden Membran kann dabei durch eine entsprechende Veränderung des Luftvolumens in den Druckschläuchen mittels einer Pumpe oder eines Druckluftanschlusses erreicht werden. Als Material für die Druckschläuche wurde im Rahmen des Vorhabens ein thermoplastisches Polyurethan (TPU) gewählt. Die Problematik bei diesem Schlauchtyp war eine ungleichmäßige Vergrößerung des Innendurchmessers bei steigendem Druck und eine ungleichmäßige eckige Ausformung (Bild 8.1). Wenn der Innendruck über einen bestimmten Punkt erhöht wird, dehnt sich der Schlauch an der dünnsten Stelle aus, welcher sich stochastisch bedingt an einer beliebigen Stelle des Schlauches befinden kann. Die Ursache ließ sich auf eine herstellungsbedingt inhomogene Waddickenverteilung des Schlauches zurückführen [Vos19]. Ein weiteres Aufblasen des Schlauches führte demnach zu einer stärkeren Ausdünnung. Im schlimmsten Fall hätte dies zu einem Platzen des Schlauches geführt, sodass das Konzept der Druckschläuche daher nicht weiterverfolgt wurde.

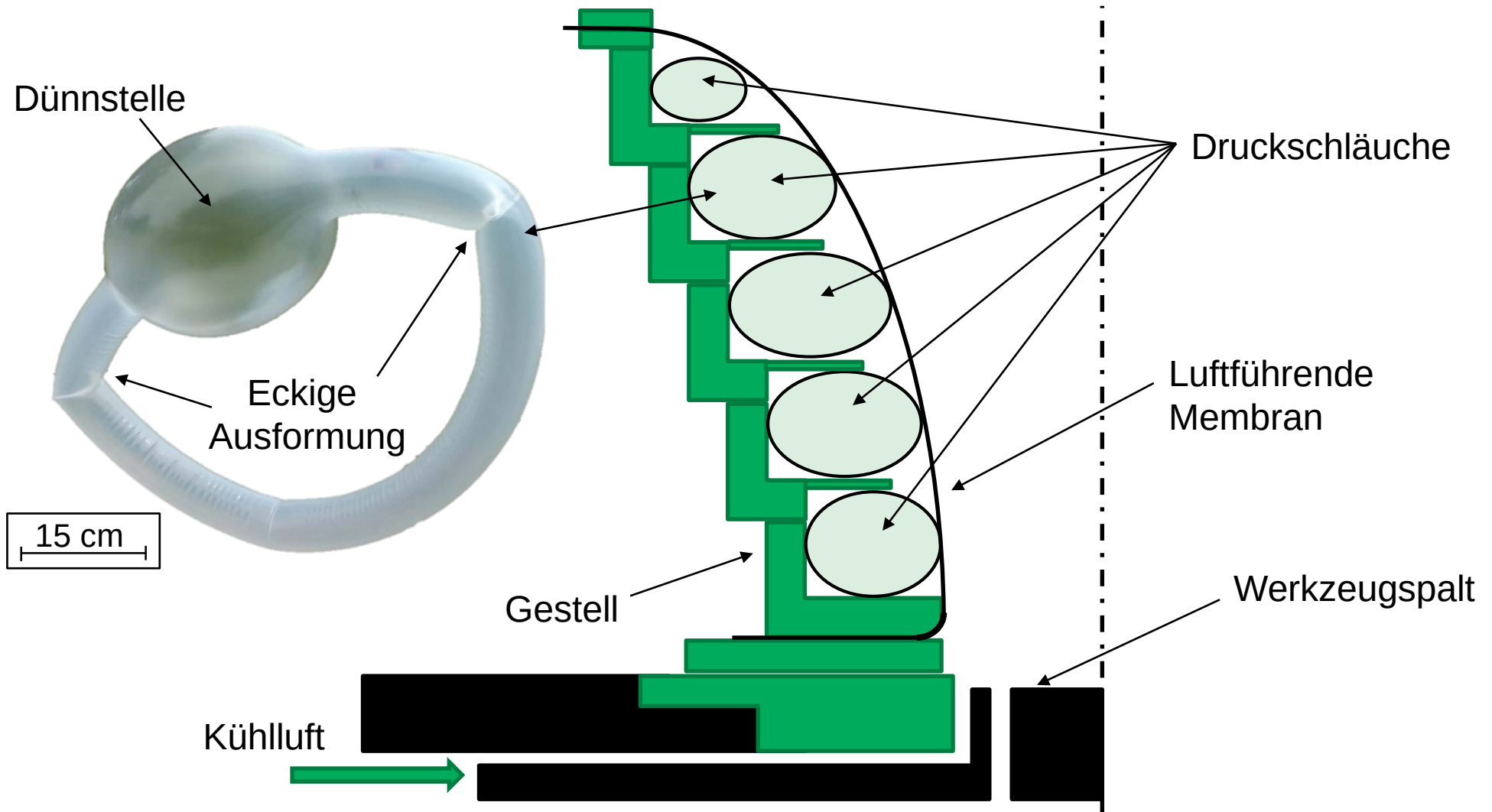
8.2 Druckschrauben

Eine weitere Möglichkeit zur Einstellung der luftführenden Membran kann mechanisch mittels Druckschrauben erfolgen (Bild 8.2). Dies erfordert die Schichtung von Ringen mit einer regelmäßigen kreisförmigen Anordnung von Gewinden, durch welche Druckschrauben eingebracht werden. Auf den Schraubenköpfen sitzende Plättchen sind dabei in Kontakt mit der luftführenden Membran. Durch ein Verstellen der Schraube kann die Geometrie der Membran verändert werden. Ein Nachteil dieses Konzepts ist jedoch die Ausbildung vieler verschiedener Druckpunkte auf der Membran, sodass eine homogene kreisförmige Verstellung der Membran nicht möglich ist. Aufgrund der im Vergleich zu dem Druckschlauch jedoch deutlich bessere Reproduktion einer möglichen Kreisform und der geringeren Fertigungskosten wurde das Konzept der Druckschrauben weiterverfolgt.

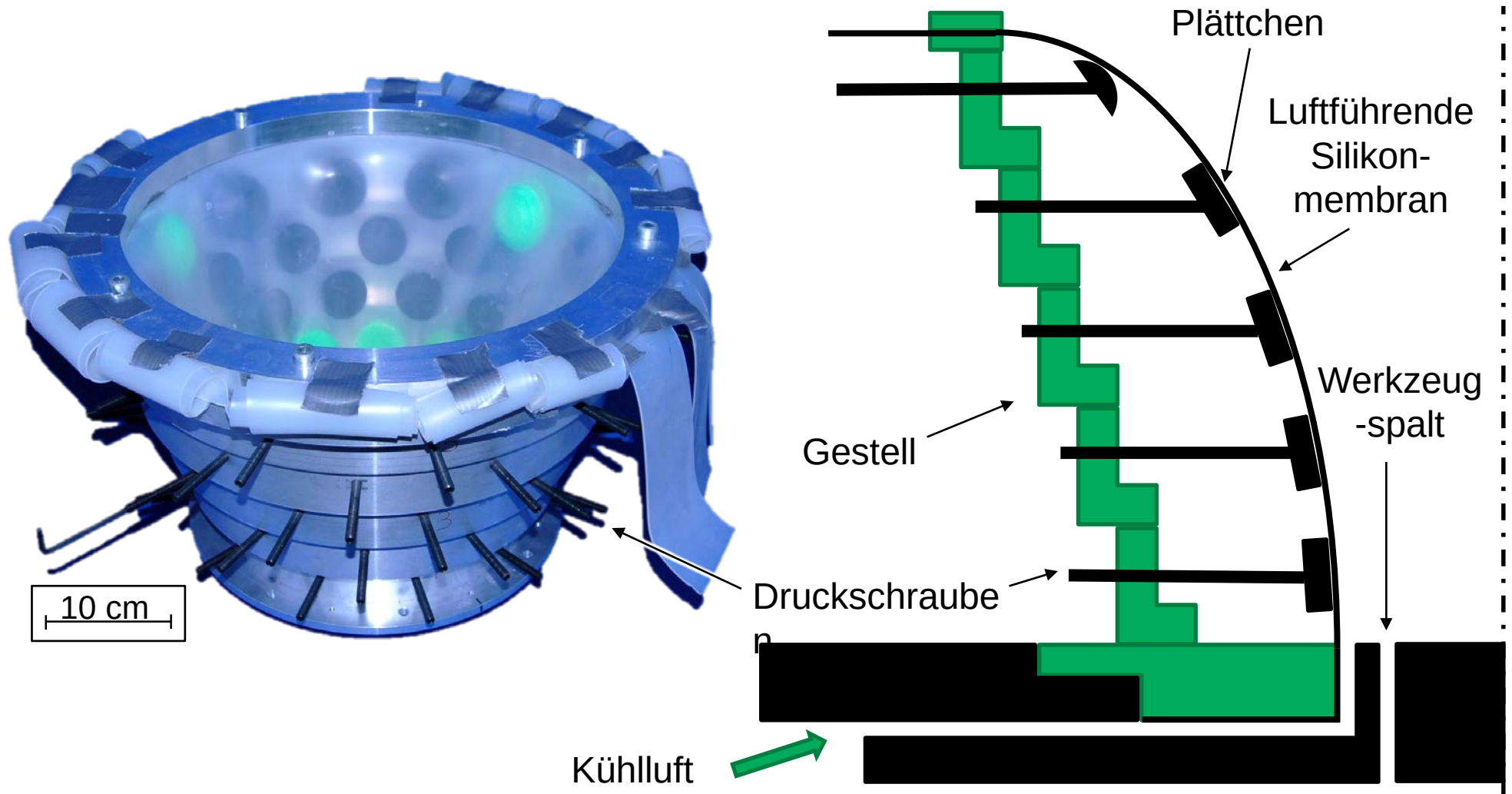
8.2.1 Erster Prototyp

Folglich wurde ein erster Prototyp einer flexiblen Luftführungseinheit mit 60 Druckschrauben gefertigt. Als luftführende Membran wurde eine Silikonmatte eingesetzt. Die Auswahl einer geeigneten Silikonstärke erfolgte dabei anhand unterschiedlicher Waddicken (1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 3 mm). Bei der Auswahl der richtigen Stärke der Silikonmatte war es wichtig den richtigen Kompromiss zwischen Flexibilität und Steifigkeit zu finden. Den besten Kompromiss lieferte eine Silikonmatte mit einer Stärke von 1,5 mm. Bei der Installation der Silikonmembran war zudem auf eine ausreichende Spannung zwischen Lufteintritt und Luftaustritt zu achten.

Konzeptskizze zur Verstellung der Membran mittels Druckschläuchen



Konzeptskizze und realer 1. Prototyp zur Verstellung der Membran mittels Druckschrauben



Die Membran wurde am Kühlringeinsatz und am oberen Rand des Luftführungssystems befestigt. Am Kühlring musste hierfür, unter Berücksichtigung der Membranstärke, ein neuer Kühlringeinsatz konstruiert und gefertigt werden. Da der Kühlringeinsatz nur bei Verwendung der LFE eingebaut wird, konnte dieser mit der Luftführungseinheit verbunden werden. Am Luftaustritt wurde die Membran zwischen zwei Aluminiumringen einklemmt (Bild 8.2) [Gla18].

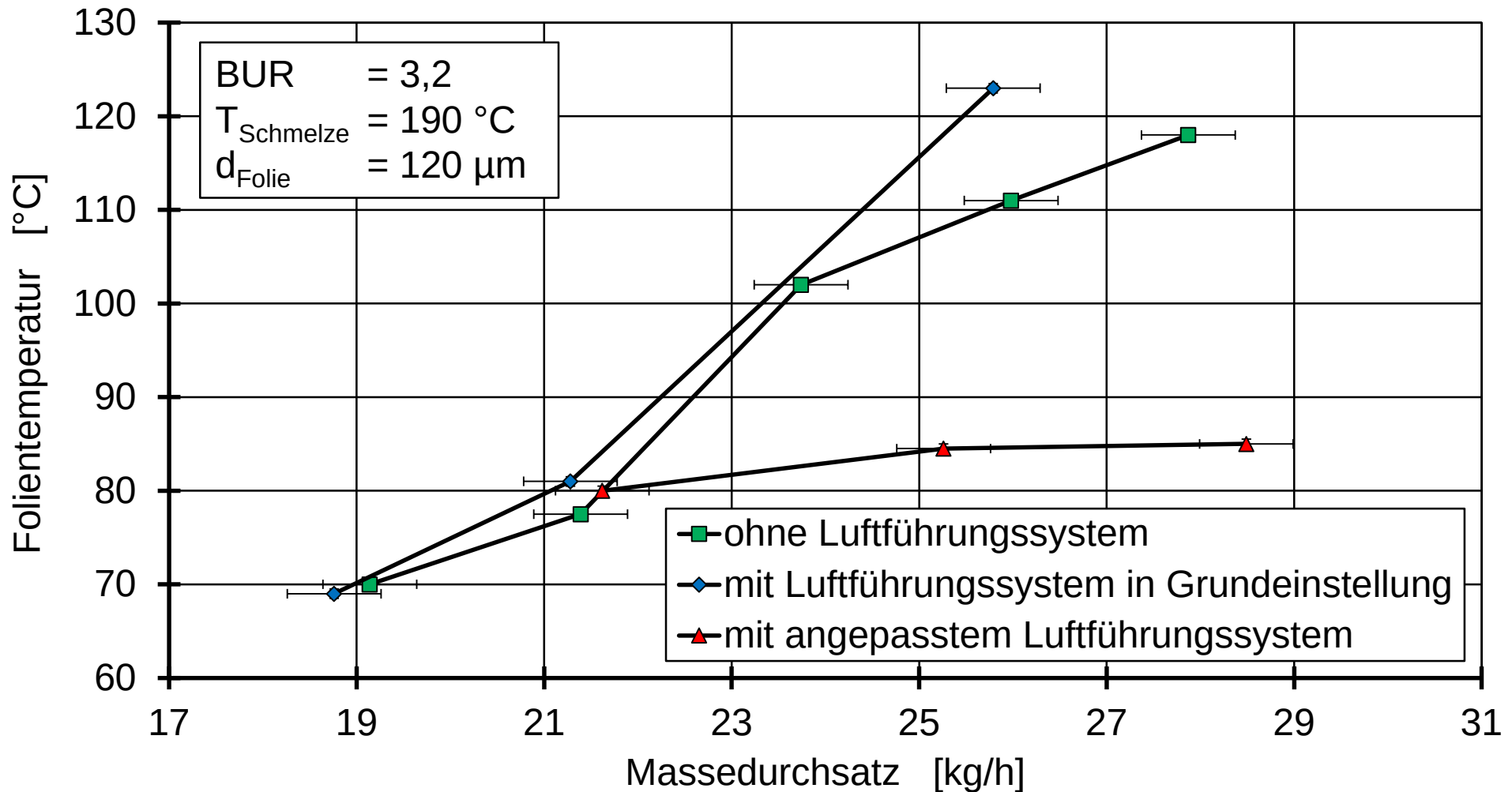
Nach der Fertigung des beschriebenen Prototyps erfolgte dessen Inbetriebnahme an der Blasfolienextrusionsanlage im Technikum des IKV. Der Fokus bei der Untersuchung des Prototyps lag zum einen darauf, wie die LFE das Abkühlverhalten der Folienblase und damit die Effizienz der Anlage beeinflusst und zum anderen, welche Auswirkung eine Geometrieangepasung der luftführenden Membran auf die Prozessstabilität besitzt. Dafür wurden Extrusionsversuche durchgeführt, bei denen drei unterschiedliche Setups miteinander verglichen wurden [HK18]:

- Ohne Luftführungseinheit
- Mit Luftführungseinheit in Grundeinstellung
- Mit angepasster Luftführungseinheit

Die Grundeinstellung der LFE entsprach dabei der Geometrie, bei der alle Druckschrauben gleich weit herausgedreht waren, sodass eine maximale Öffnung (maximaler Strömungsspalt) zwischen Folienblase und der Membran realisiert wurde. Bild 8.3 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Setups auf die Folientemperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher Massedurchsätze [HK18].

Bei allen drei Setups ist eine Temperaturerhöhung der Folienblase mit steigendem Durchsatz zu erkennen. Steigende Massedurchsätze führen bei sonst konstanten Prozessparametern zu einer kürzeren Verweilzeit des Extrudates in der Schlauchbildungszone und somit zu einer reduzierten Kühlzeit des Folienschlauches, sodass sich als Folge höhere Endtemperaturen der Folie einstellen. Die Schmelzetemperatur am Werkzeugaustritt betrug konstant 190 °C. Das Aufblasverhältnis wird mit 3,2, die Gebläseleistung mit 50 % und die Foliendicke mit ca. 120 µm konstant gehalten. Mit steigenden Massedurchsätzen ergeben sich in Abhängigkeit der untersuchten Setups größere Unterschiede in den gemessenen Folientemperaturen. Bei einem Durchsatz von 25 bis 26 kg/h liegt die Folientemperatur mit angepasster LFE bei ungefähr 84,5 °C, während sie sich ohne LFE und mit LFE in Grundeinstellung oberhalb von 110 °C befindet. Bei einer weiteren Steigerung des Durchsatzes auf 28 kg/h bis 29 kg/h steigt die Folientemperatur mit angepasster LFE weiterhin vergleichsweise gering auf 87 °C, während sie ohne LFE auf 118 °C steigt. Eine weitere Durchsatzsteigerung mit der LFE in Grundeinstellung ist nicht möglich, da die Blase innerhalb der Luftführungseinheit anfängt zu wandern und in Kontakt mit der luftführenden Membran tritt. Insgesamt zeigt sich, dass durch den Einsatz der entwickelten LFE

Einfluss der Luftführungseinheit auf die Folientemperatur bei unterschiedlichen Massedurchsätzen



signifikante Senkungen der Folientemperatur möglich sind, was mit höheren Massedurchsätzen korreliert [HK18].

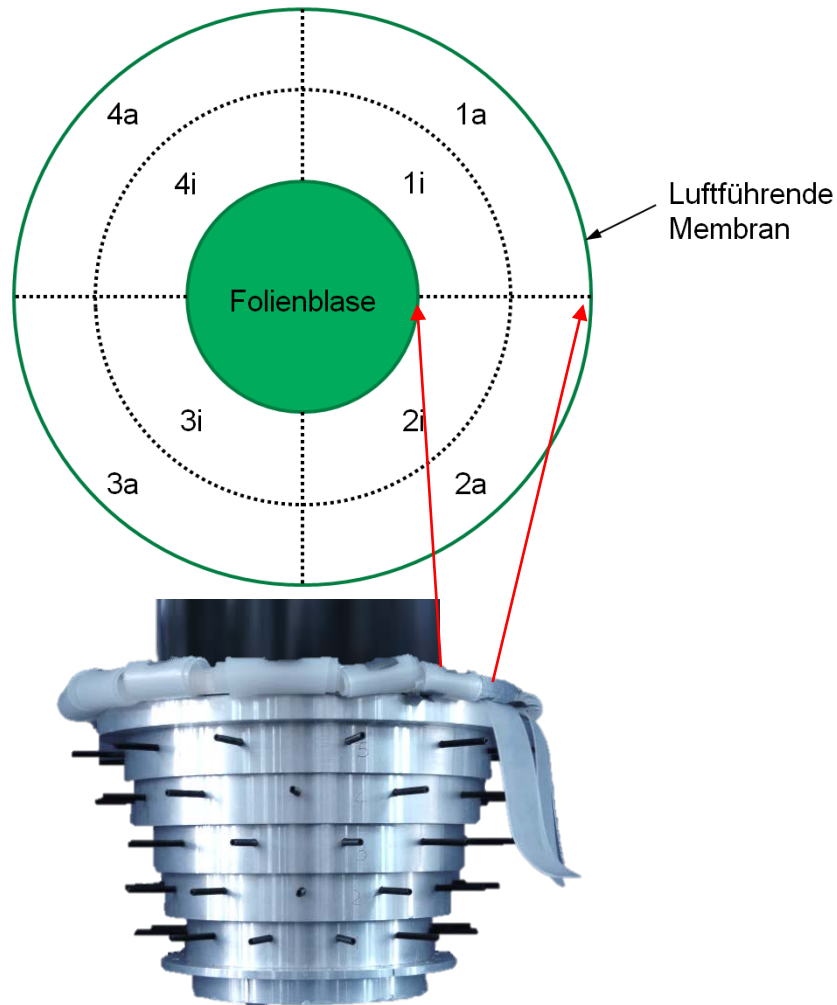
Jedoch liegen die Folientemperaturen mit Luftführungseinheit in Grundeinstellung stets oberhalb denen ohne LFE. Als Ursache für diese hohen Temperaturen und des somit verschlechterten Wärmeentzugs könnte der in Kapitel 4.3 beschriebene Coanda-Effekt angesehen werden. Die Strömung „haftet“ an der Silikonmembran, sodass der Großteil der Luftströmung abgelenkt wird und somit nicht in direkten Kontakt mit der Folienblase steht. Bild 8.4 zeigt daher die Strömungsverteilung der Luft bei Austritt aus der LFE. Die Messung der dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte mit Hilfe eines thermischen Anemometers der Fa. Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, unmittelbar nach Austritt aus der LFE. Es ist zu erkennen, dass sich die Strömungsgeschwindigkeiten bei bestimmten Spaltgrößen unterschiedlich verteilen. Zudem zeigt sich, dass bei einem großen Strömungsspalt zwischen Folienblase und Membran kaum noch Luft an der Folienblase entlang, sondern stattdessen an der luftführenden Membran strömt. Bei einer Spaltbreite von 10 cm strömt nahezu die gesamte Kühlluft an der Membran entlang, sodass die Kühlleistung an der Folienblase auf ein Minimum reduziert wird [HK18]. Bei kleineren Spalten wie 1,5 cm sind die Strömungsanteile an der Folienblase deutlich ausgeprägter [HK18].

Neben einem optimierten Wärmeentzug führt der Einsatz der Luftführungseinheit im Vergleich zum konventionellen Prozess jedoch zu einer Erhöhung der Foliendickentoleranzen von ca. 10 % [Gla18]. Der Grund für diese Zunahme liegt in einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft. Als Ursache dafür kann die hohe Steifigkeit der verwendeten Silikonmembran angesehen werden. Die Druckschrauben verursachen eine ausgeprägte Faltenbildung in Umfangsrichtung, sodass sich ein ebenfalls inhomogener Strömungsspalt einstellt. Bereiche mit einem großen Strömungsspalt führen zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten und somit zu einer verschlechterten Kühlleistung als Bereiche kleinerer Strömungsspalte. Somit wird die Folienblase in Bereichen eines großen Strömungsspaltes länger gedehnt, was zu Dünnstellen in der Folie führt [HKF20b].

8.2.2 Zweiter Prototyp

Daher galt es, die Luftführungseinheit dahingehend weiterzuentwickeln, dass die Rundheit der luftführenden Membran optimiert wird, um ein homogeneres Strömungsprofil in Umfangsrichtung und somit ein homogeneres Dickenprofil einzustellen. Zudem war es für die Einstellung eines möglichst geringen Strömungsspaltes wichtig, eine transparente Luftführungseinheit vorzusehen, um bei laufender Extrusion eine ideale Prozesseinstellung zu ermöglichen. Die Anzahl und die Durchmesser der verwendeten Ringe wurden auf Basis der Geometrie des bisherigen ersten Prototyps (Kapitel 8.2.1) bestimmt. Für die erforderliche Transparenz wurde der Rahmen

Strömungsverteilung bei unterschiedlichen Strömungsspaltbreiten



Segment		Spaltbreite 1,5 cm	Spaltbreite 2,7 cm	Spaltbreite 10 cm
1a	[m/s]	3,5	3,5	3
2a	[m/s]	2,5	1,5	3
3a	[m/s]	2	0	3,5
4a	[m/s]	3,5	3,5	5
Mittelwert	[m/s]	2,67	2,13	3,63
Stand.	[-]	0,76	1,7	0,95
1i	[m/s]	4	4,5	0,5
2i	[m/s]	5	0	0,5
3i	[m/s]	5,5	3	0
4i	[m/s]	4	0	0,5
Mittelwert	[m/s]	4,63	1,9	0,38
Stand.	[-]	0,75	2,25	0,25

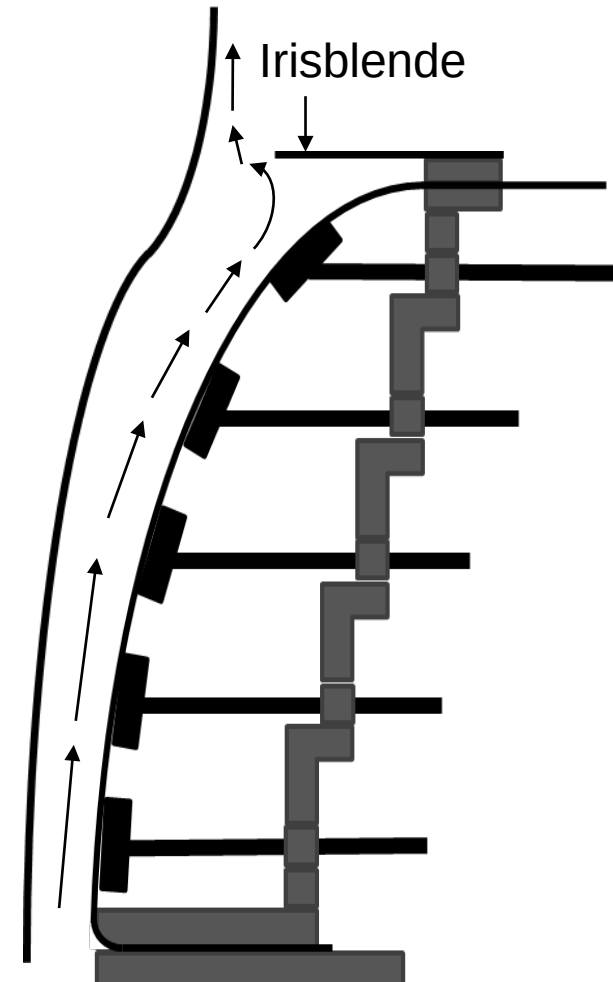
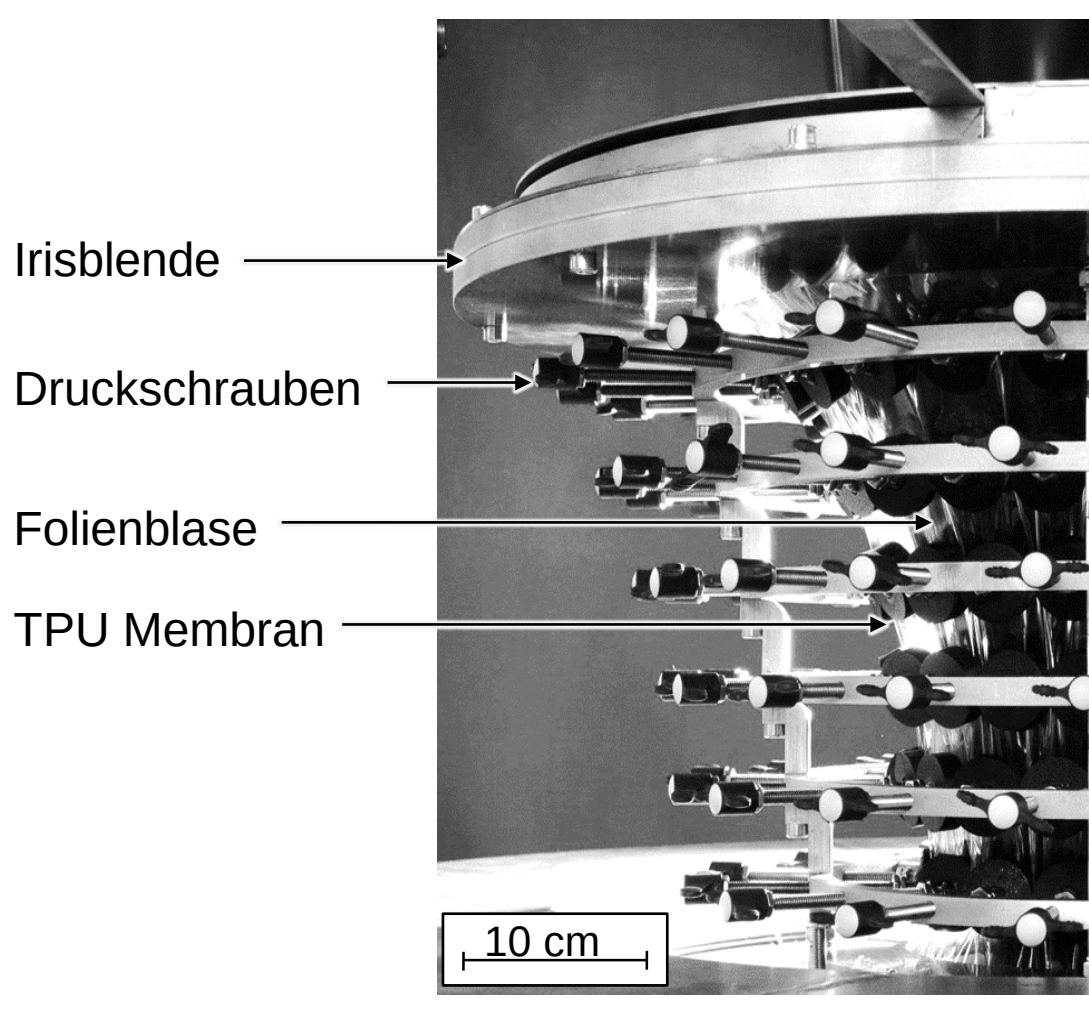
aus Aluminium mit Abstand zwischen den Ringen gefertigt. Als luftführende Membran wurde ein hochtransparentes thermoplastisches Polyurethan (TPU) vom Typ Desmopan 3690AU der Covestro AG, Leverkusen, eingesetzt. Das TPU wurde auf der Blasfolienanlage im IKV-Technikum verarbeitet. Sobald der Prozess stabil war, d. h. sobald der Blasendurchmesser dem Innendurchmesser des obersten Klemmrings und die Form der Schlauchbildungszone der Form der LFE entsprach, wurde der Extrusionsprozess angehalten. Da zu diesem Zeitpunkt der untere Teil der Schlauchbildungszone nur wenig verstreckt und daher sehr dick war, wurde der Abzug erst wenig später ausgeschaltet. Dies ermöglichte eine möglichst homogene Wanddickenverteilung über dem Blasenumfang. Die angestrebte mittlere Wanddicke lag bei ca. 200 μm , da bei dieser Wanddicke sowohl die Flexibilität des Materials als auch dessen Reißfestigkeit nach Vorversuchen im geforderten Bereich lagen. Nach dem Ausschalten des Abzugs wurde die Schlauchbildungszone herausgeschnitten und in die LFE eingespannt. Um die Dickenschwankungen zu reduzieren, wurde die Anzahl der Druckschrauben, die eine Anpassung der flexiblen Membran ermöglichten, von 60 auf 108 Schrauben erhöht. Um zu verhindern, dass die Kühlluft aufgrund des Coanda-Effektes an der Membran haftet und somit nicht im direkten Kontakt mit der Folienblase steht, wurde zudem eine Irisblende oberhalb des obersten Ringes eingesetzt, die zu Turbulenzen im Luftstrom führt (Bild 8.5) [HKF20b]. Die Irisblende zwingt die Kühlluft auch bei großen Strömungsspalten Richtung Folienblase.

Bild 8.6, links, zeigt den Einfluss der optimierten LFE auf den Massedurchsatz. Der Massedurchsatz der Versuche mit LFE liegt mit ca. 23 kg/h deutlich über dem Durchsatz des konventionellen Prozesses mit ca. 18,5 kg/h. In den Versuchen zeigte sich, dass sich die neu installierte Irisblende positiv auf den Massedurchsatz auswirkte [Vos19]. Die Durchsatzerhöhung lässt sich auf eine Verwirbelung des Kühlluftstroms knapp unterhalb der Blende zurückführen. Aufgrund der geometrischen Begrenzung wird die Kühlluft direkt zur Folienblase geführt, was eine weitere Wärmeabfuhr ermöglicht. Zudem konnte in den Versuchen gezeigt werden, dass sich durch ein Schließen der Irisblende eine zusätzliche Kalibrierung und somit eine bessere Stabilisierung der Folienblase erreichen ließ, was sich in Kombination mit der Erhöhung der Druckschrauben positiv auf die Dickenschwankung auswirkte (Bild 8.6, rechts). Die Foliendickenschwankungen mit LFE sind über die dargestellten Versuchspunkte hinaus durchweg auf einem ähnlichen Niveau der Dickenschwankungen der Referenzprüfung. Tendenziell ergeben sich sogar um ca. 2 % geringere Foliendickenschwankungen [HKF20b].

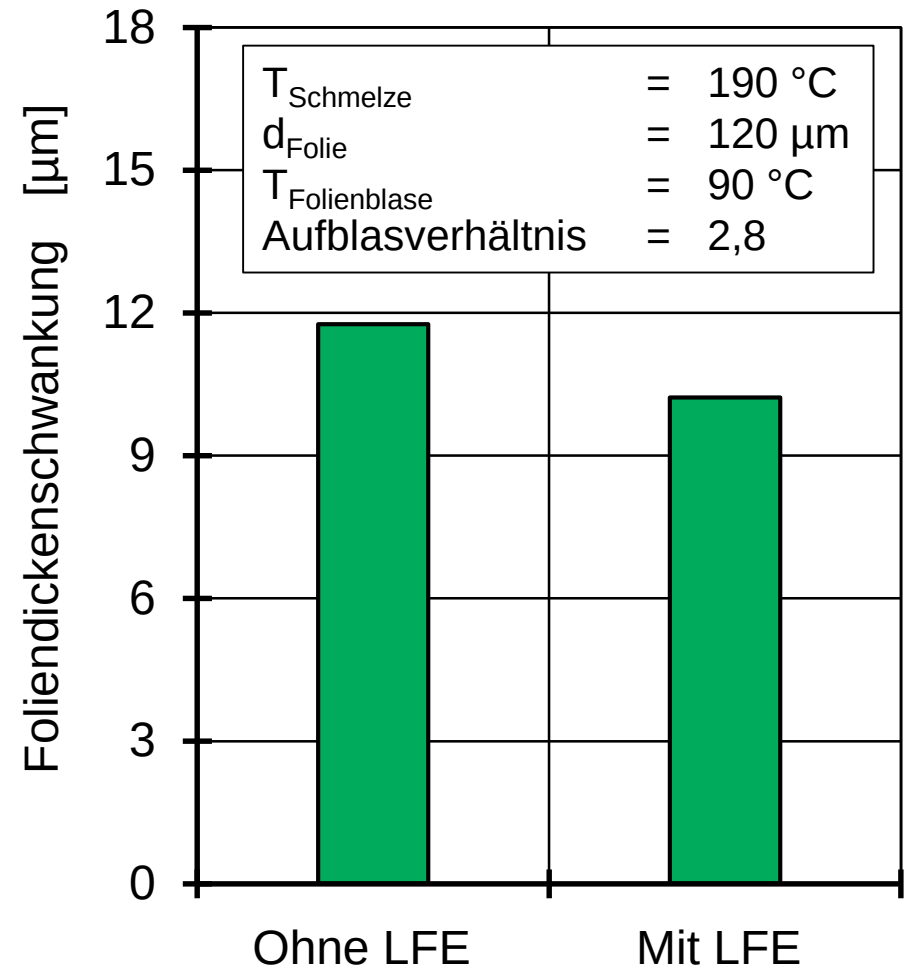
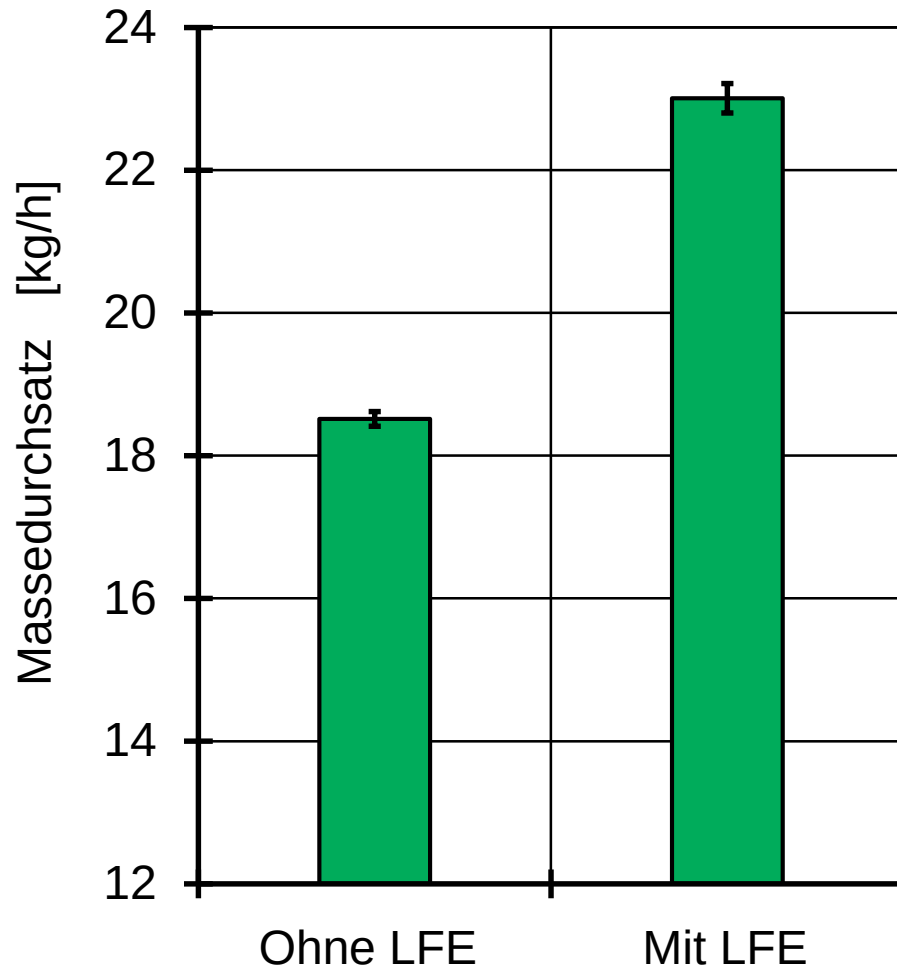
8.3 Irisblenden

Für einen industriellen Einsatz der entwickelten LFE war es zudem wichtig, mögliche Regelstrategien für eine automatisierte Einstellung der Geometrie der Luftführung, in Abhängigkeit der Prozessparameter, zu entwickeln. Hierunter können beispielsweise Konzepte fallen, die

2. Prototyp: Foliennahe Kühlung aufgrund einer Luftverwirbelung durch eine Irisblende am Austritt der LFE

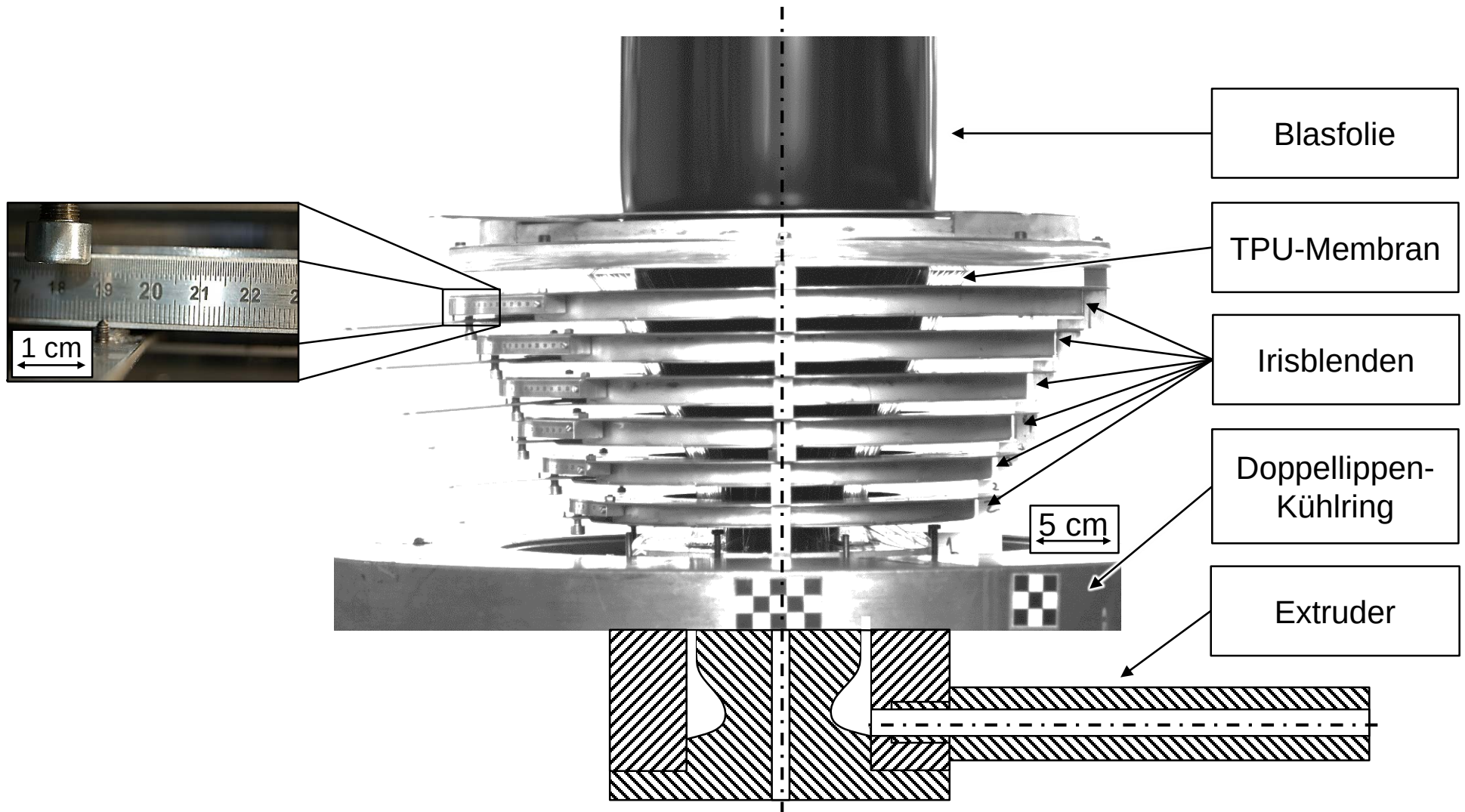


Vergleich der Blasfolienextrusion mit und ohne LFE hinsichtlich Massedurchsatz und Foliendickenschwankung



eine automatische Einstellung des Strömungsspaltens vorsehen, um ein höchstes Maß an Prozessstabilität zu gewährleisten und ein einfaches Anfahren des Prozesses zu ermöglichen. Die Entwicklung einer solchen Prozessregelstrategie bedingt jedoch einen großen Versuchsumfang. Das bestehende System (Kapitel 8.2.2) war aufgrund der vielen Druckschrauben für die Datengenerierung weniger geeignet, da die Membraneinstellung zu lange dauert. Daher wurde die LFE erneut weiterentwickelt. Die Druckschrauben wurden durch Irisblenden ersetzt, welche in der Lüftungs- und Klimabranche eingesetzt werden (Bild 8.7). Statt ihrem eigentlich Einsatzzweck, der Führung und Regulierung von Luftströmungen, werden diese nun zur mechanischen Verstellung einer luftführenden Membran eingesetzt. Dieses System erlaubt eine schnellere Anpassung der luftführenden Membran während des laufenden Betriebs. Die obere Irisblende des zweiten Prototyps (Bild 8.5), welche für das Umleiten der anhaftenden Kühlluft an der flexiblen Membran sorgte, kam ebenfalls bei der dargestellten LFE zum Einsatz [HKF20b]. Für einen praktikablen Einsatz der Einrichtung war es zudem notwendig, den Innendurchmesser der Irisblenden jederzeit in einfacher Weise quantitativ erfassen zu können. Um die Problematik zu lösen, wurden je Irisblende Stahlmaßbänder an dessen Außenseite unterhalb ihrer Hebel zur Durchmesserstellung auf bogenförmigen Distanzstücken angebracht. Gewindestifte, welche senkrecht in den Hebel eingebracht wurden, erfüllten die Funktion eines Zeigers auf der Skala (Bild 8.7). Jedem Wert der Skala konnte so eindeutig ein Innendurchmesser zugeordnet werden, welche für eine spätere Prozessregelung hilfreich war.

3. Prototyp: Verstellung der Membran mittels Irisblenden



9 ENTWICKLUNG EINER STRATEGIE ZUR EINSTELLUNG DER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT

Nach der Fertigung einer schnell und einfach zu verstellenden flexiblen Luftführungseinheit mittels Irisblenden, war es in einem weiteren Schritt wichtig, den Einfluss der LFE auf die Prozessstabilität zu untersuchen. Für die Verwendung des Konzeptes in einer industriellen Produktionsumgebung, muss ein sicheres Starten und dauerhaftes Betreiben des Prozesses gewährleistet werden. Um das System in einem späteren Entwicklungsschritt automatisierbar gestalten zu können, war es unabdingbar eine reproduzierbare Strategie zur Einstellung der Irisblenden, welche die Geometrie der luftführenden Membran bestimmen, zu ermitteln. Daher wurde in einer Versuchsreihe mit PE-LD bei einer Schmelzetemperatur von 190 °C, einer Foliendicke von 120 µm, einer Gebläseleistung von 50 % und einem Aufblasverhältnis von 2,8 eine Strategie zur Einstellung der Irisblenden entwickelt.

Wie in Kapitel 8.2.2 bereits erwähnt, wurde die oberste Blende zur Vermeidung des Coanda-Effektes als auch zur Kalibrierung der Folienblase geschlossen. Zur Einstellung der durchmesserbestimmenden Irisblenden kamen nun zwei Einstellstrategien in Frage: Die Blenden wurden zum einen, beginnend bei der düsenfernsten Blende, entgegen der Extrusionsrichtung nacheinander geschlossen. Um die Blase nicht zu deformieren, konnte die Membran nur begrenzt an die Folie herangeführt werden. Eine Ausbildung des Venturi-Effektes war bei dieser Verstellung nicht zu beobachten. Zum anderen konnte die Verstellung ausgehend von der Blende, welche sich am nächsten an der Werkzeugdüse befindet, schrittweise in Extrusionsrichtung erfolgen. Düsennahe Blenden wurden ebenfalls nur begrenzt geschlossen, um eine Deformation der Folie zu vermeiden. Anders als bei der voran beschriebenen Einstellstrategie war bereits nach Einstellung der düsennahen Blenden eine Ausbildung des Venturi-Effektes in Form eines Ansaugens der Folie in Richtung des Werkzeugs ersichtlich. Der Membrandurchmesser im düsennahen Bereich stellte somit das wichtigste Stellglied zur Ausbildung des Venturi-Effektes dar. Ein Ansatz zur Erklärung dieses Systemverhaltens liegt in der Strömungsrichtung der Kühlluft, welche vom Doppellippenkühlring in Extrusionsrichtung durch den Luftspalt zwischen Membran und Blasfolie verläuft. Wird zuerst eine Einstellung der Membran im düsenfernen Bereich vorgenommen, befindet sich der darunterliegende Strömungsspalt in keinem definierten Strömungszustand, da sowohl Folie, als auch Membran eine gewisse Nachgiebigkeit aufweisen, wodurch sich die Geometrie des Spaltes fortlaufend verändern kann. Anders verhält es sich bei Einstellbeginn bei den düsennahen Irisblenden. Eine frühzeitige Ausbildung des Venturi-Effektes im unteren Folienbereich stabilisiert die Folie weitestgehend unabhängig vom Membrandurchmesser höhergelegener Ebenen. Für die weitere Versuchsdurchführung wurde demnach eine stufenweise Einstellung der LFE in Extrusionsrichtung, beginnend bei düsennahen Blenden, vorgenommen.

10 VERSUCHSPLAN UND -DURCHFÜHRUNG

Nach einer erfolgreichen Fertigung und Strategieentwicklung zur Einstellung der Irisblenden der Luftführungseinheit folgt nun die Beschreibung des Versuchsplans und der Versuchsdurchführung für eine spätere Untersuchung des Einflusses der LFE hinsichtlich einer möglichen Massedurchsatzsteigerung, einer Beeinflussung der Foliendickenschwankung, als auch der mechanischen sowie der optischen Folieneigenschaften.

10.1 Versuchsplan

Für die Versuchsdurchführung wurde für jedes Material mit und ohne LFE ein voll-faktorieller Versuchsplan mit zwei Variationsstufen verwendet (Tabelle 10.1).

Prozessparameter	Einheit	Variationsstufe							
		-1				+1			
Aufblasverhältnis BUR	[-]	2,4				3,2			
Foliendicke d_{Folie}	[μm]	60				180			
Gebläseleistung $P_{\text{Gebläse}}$	[%]	50				100			
Schmelzetemperatur T_{sch}	[°C]	PE-LD	PE-LLD	PE-HD	PP	PE-LD	PE-LLD	PE-HD	PP
		180	190	200	220	200	210	200	240

Tabelle 10.1: Voll-faktorieller Versuchsplan

10.2 Einstellung der Doppellippe

In den bisher vereinzelt durchgeführten Versuchsreihen der entwickelten Luftführungseinheiten (siehe Kapitel 8) hinsichtlich einer Massedurchsatzsteigerung, wurde die Einstellung des Doppellippenkühlrings nicht berücksichtigt. Um jedoch das volle Potenzial der LFE hinsichtlich einer möglichen Massedurchsatzsteigerung untersuchen zu können, war es zwingend notwendig die Öffnungsweite des verwendeten Doppellippenkühlrings (0 - 30 mm) so einzustellen, dass sich für das jeweils untersuchte Material im konventionellen Extrusionsprozess ohne LFE eine maximale Kühlleistung ergab. In den Untersuchungen zeigte sich bei allen Materialien eine ideale Öffnungsweite der oberen Lippe von 15 mm. Diese wurde für alle Versuchspunkte mit und ohne LFE konstant gehalten. Da diese Einstellung hinsichtlich der konventionellen Blasfolienextrusion optimiert ist, ist die sich ergebene Massedurchsatzsteigerung als Mindest-Durchsatzsteigerung zu verstehen, sodass das wahre Potenzial der LFE möglicherweise höher ausfallen kann.

11 UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT AUF DEN MAXIMALEN MASSEDURCHSATZ

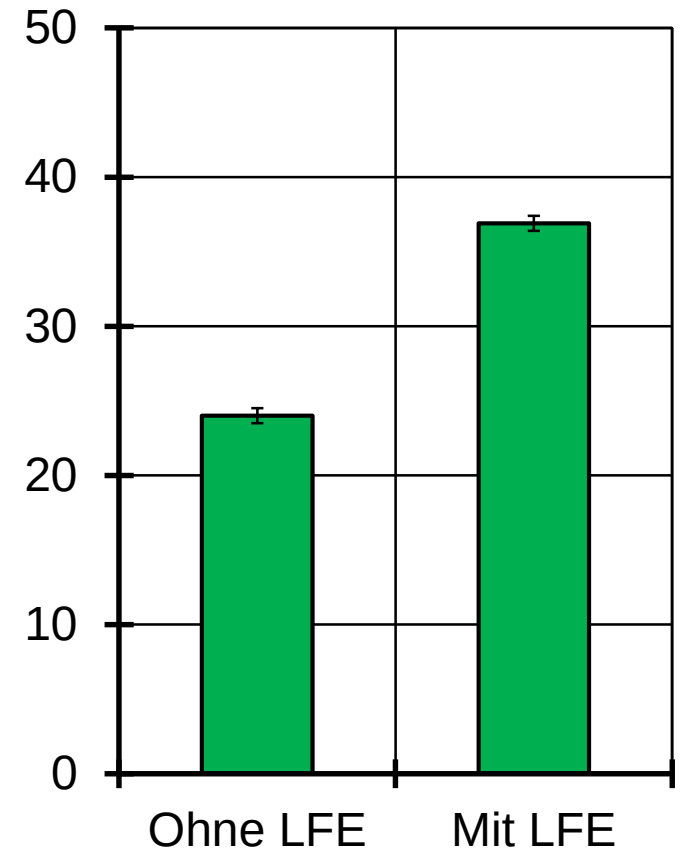
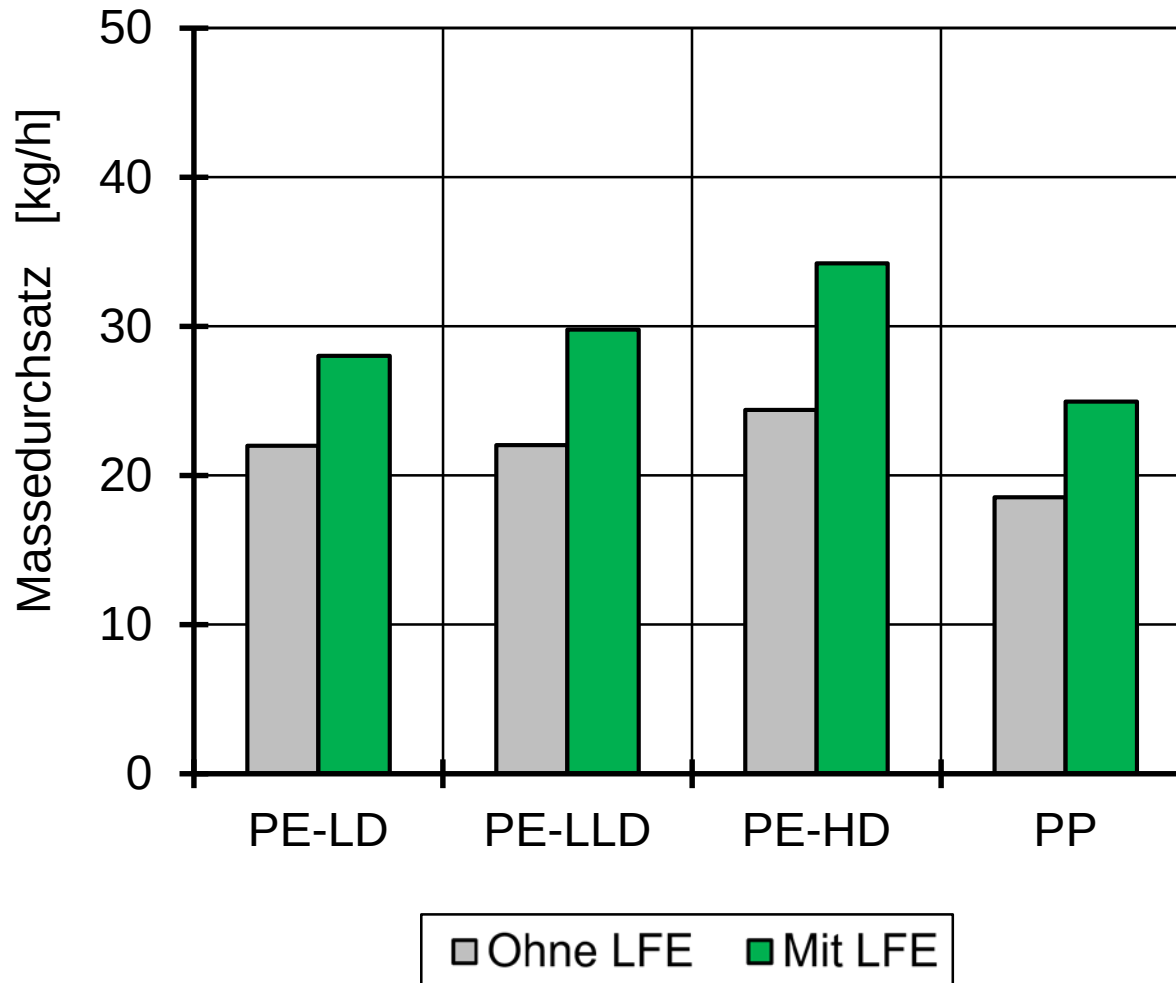
Im Folgenden wird der Einfluss der entwickelten LFE auf den Massedurchsatz dargestellt.

Eine Gesamtübersicht mit den realen Massedurchsätzen für alle untersuchten Materialien zeigt Bild 11.1. Im linken Diagramm ist jeweils der Mittelwert aus allen untersuchten Prozesspunkten mit und ohne Luftführungseinheit gezeigt. Alle dargestellten Werte sind signifikant. Zur Verdeutlichung der Signifikanz zeigt das rechte Diagramm in Bild 11.1 einen beispielhaften Prozesspunkt aus dem Versuchsplan [HKF20c]. Im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess ohne LFE lässt sich der Massedurchsatz durchschnittlich für alle untersuchten Materialien um ca. 30 % steigern. Je nach Prozesspunkt kann sogar eine Steigerung von bis zu über 60 % erzielt werden [HKF20c]. Die dargestellte Zunahme des Massedurchsatzes ist 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 Wärmeübertragungskoeffizienten führt. Andererseits ergibt sich aufgrund dieser Strömungsgeschwindigkeitserhöhung ein lokaler Unterdruck im Strömungsspalt zwischen LFE und Folienblase, was eine Oberflächenvergrößerung der Folie zur Folge hat [HKF20].

Für ein besseres Verständnis hinsichtlich der Beeinflussungshöhe der untersuchten Prozessparameter auf eine Massedurchsatzsteigerung, wurden auf Basis der Ergebnisse des Versuchsplans aus Tabelle 10.1 mit Hilfe des Statistik Programms Visual-XSel der Fa. CRGRAPH (GbR), Starnberg, Deutschland, Korrelationen hergeleitet. Diese erlauben die Beschreibung der Beeinflussungshöhe des jeweiligen Prozessparameters in Abhängigkeit einer Massedurchsatzsteigerung durch den Einsatz der LFE. Bild 11.2 zeigt beispielhaft die Einflüsse der Parameter Aufblasverhältnis, Foliendicke, Gebläseleistung und Schmelztemperatur hinsichtlich einer Steigerung des Massedurchsatzes durch den Einsatz einer LFE für ein PE-LD, charakteristisch jedoch für alle untersuchten Materialien. 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 [Kle11]. Die dargestellte Steigerung bzw. Abnahme der Massedurchsatzsteigerung bezieht sich dabei auf die Erhöhung des dargestellten Prozessparameters, um eine Variationsstufe (vgl. Tabelle 10.1). Im konkreten Fall bedeutet dies beispielsweise für die Foliendicke, dass die Massedurchsatzsteigerung bei einer Foliendicke von 60 μm (Variationsstufe -1) um ca. 10 % größer ausfallen wird als bei einer Foliendicke von 180 μm (Variationsstufe +1).

Es ist zu erkennen, dass sich eine steigende Schmelztemperatur positiv auf die Massedurchsatzsteigerung auswirkt. So kann bei einer höheren Schmelztemperatur tendenziell eine um

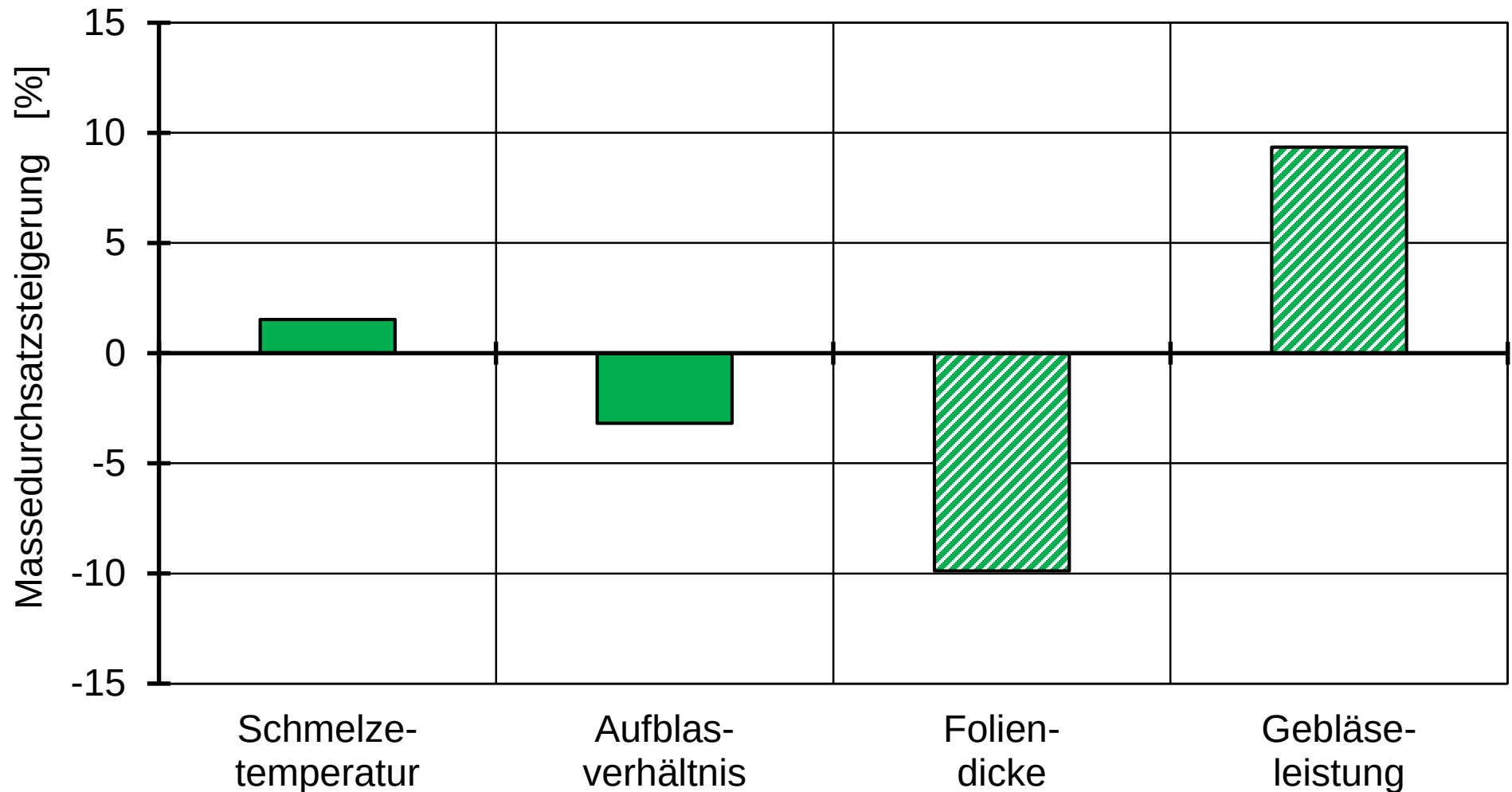
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf den Massedurchsatz



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



Effekthöhe der LFE in Abhängigkeit der Prozessparameter auf die Massedurchsatzsteigerung



ca. 2 % höhere Durchsatzsteigerung erreicht werden als bei niedrigen Temperaturen. Dies kann möglicherweise auf eine größere zur Kühlung zur Verfügung stehende Blasenoberfläche zurückgeführt werden. Eine höhere Schmelzetemperatur hat eine geringe Schmelzefestigkeit zur Folge, sodass sich die Folie bei einer höheren Schmelzetemperatur aufgrund des im Strömungsspalt vorherrschenden reduzierten statischen Druckes stärker aufweiten kann, wodurch sich nach Gleichung 4.4 eine größere Fläche für den Wärmetransport ergibt.

Einen konträren aber ebenfalls tendenziellen Zusammenhang zeigt sich bei dem Aufblasverhältnis. Die höchste Durchsatzsteigerung ist somit bei einem niedrigen BUR möglich. Dies kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Die Oberfläche einer Blasfolie ist bei einem großen BUR größer als die Oberfläche der Folie bei geringerem BUR, sodass eine frühzeitige Öffnung der Folienblase bei einem geringen Aufblasverhältnis 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 zur Folge hat. Aufgrund dessen reduziert sich nach der Bernoulli-Gleichung (vgl. Gleichung 4.8) der statische Druck, sodass sich die Folie stärker aufweiten kann [HKF20].

Einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Massedurchsatzsteigerung zeigt die Foliendicke. So führt eine dickere Folie (180 μm) zu einer um ca. 10 % geringeren Massedurchsatzsteigerung als eine dünne Folie (60 μm). 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, wodurch sich diese aufgrund des Druckgefälles stärker aufweiten kann als eine dickere Folie [HKF20].

Ein Anstieg der Gebläseleistung von 50 % auf 100 % führt ebenfalls zu einem signifikanten Anstieg der Durchsatzsteigerung von ca. 9 %. Die Durchsatzsteigerung ist auf die verstärkte Ausbildung des Venturi-Effektes zurückzuführen, welcher eine Reduktion des statischen Druckes verursacht und damit zu einer größeren Aufweitung der Folie bei größeren Gebläseleistungen führt [HKF20].

Das Potential der entwickelten LFE ist nach Bild 11.2 demnach von den gewählten Prozessparametern abhängig, sodass eine maximale Steigerung des Massedurchsatzes bei hoher Schmelzetemperatur, geringer Foliendicke, geringem Aufblasverhältnis und hoher Gebläseleistung möglich ist. An dieser Stelle ist zudem zu ergänzen, dass der Einsatz der entwickelten LFE über alle Versuchspunkte (siehe Bild 11.1) hinweg zu einer erhöhten Durchsatzsteigerung führte.

12 UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER FLEXIBLEN LUFTFÜHRUNGSEINHEIT AUF DIE FOLIENEIGENSCHAFTEN

Neben der Untersuchung des Massedurchsatzes war ebenfalls der Einfluss der flexiblen Luftführungseinheit auf die Eigenschaften der extrudierten Folien zu ermitteln. Durch den Einsatz der LFE, der als Folge des Venturi-Effektes über weite Bereiche der Schlauchbildungszone eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft hervorruft, verändert sich der Wärmeübergangskoeffizient [NN13]. Damit ergibt sich für die Folie ein vom Referenzzustand der konventionellen Kühlung unterschiedliches Temperaturprofil, das die Vorgänge der Relaxation und Kristallausbildung beeinflusst. Um den Einfluss dieser Veränderung auf die Folieneigenschaften zu ermitteln, wurden die Foliendickenschwankung als auch auf die optischen und mechanischen Eigenschaften der Folien aus dem Referenzprozess und dem Prozess bei Einsatz der LFE untersucht.

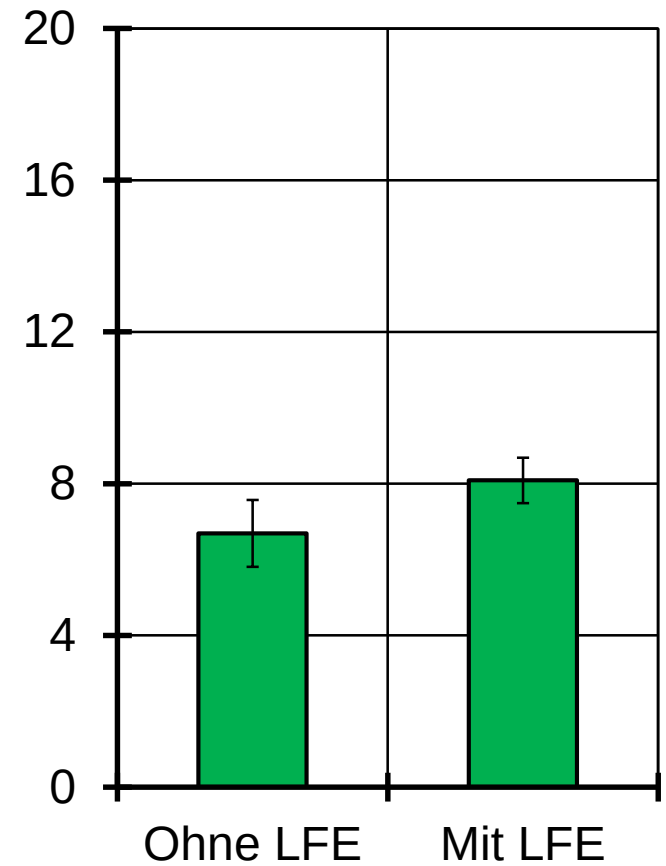
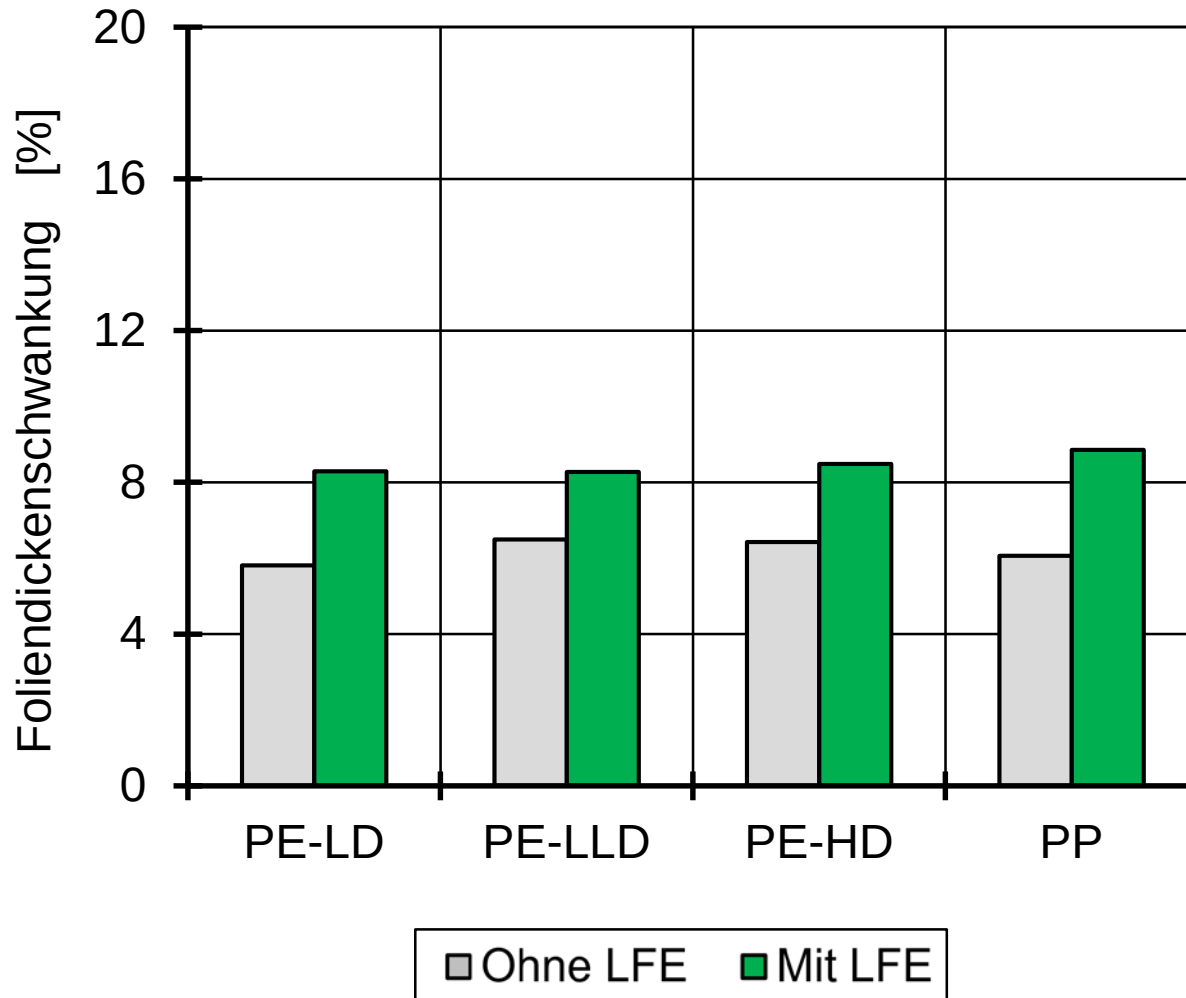
12.1 Einfluss auf die Foliendickenschwankung

In einem ersten Schritt galt es die Schwankung der Foliendicke über dem Umfang des Folienschlauches als Qualitätsmerkmal zu untersuchen, da seitens produzierender Unternehmen ein hohes Interesse darin besteht eine hohe Qualität ihrer Produkte am Markt zur Verfügung zu stellen. In den Versuchen zeigte sich jedoch, dass der Einsatz der entwickelten LFE bei allen Materialien zu einer durchschnittlichen Zunahme der Foliendickenschwankung von ca. 3 % führte (Bild 12.1). Jedoch kann diese je nach Prozesseinstellung auch nach unten variieren. So kommt es bei der gezeigten Prozesseinstellung (rechte Darstellung Bild 12.1) zu einer geringeren Zunahme der Dickenschwankung von ca. 1,5 %. Als ein Erklärungsansatz für die Zunahme der Foliendickenschwankung kann möglicherweise die Faltenbildung der luftführenden Membran herangezogen werden. Bei der Inbetriebnahme der entwickelten LFE zeigte sich, dass ein faltenfreies Einspannen der TPU Membran nicht möglich war. Durch diese Falten ergibt sich ein inhomogener Strömungsquerschnitt zwischen luftführender Membran und Folienblase. Bereiche mit einem großen Strömungsspalt führen zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten und somit zu einer verschlechterten Kühlleistung als Bereiche kleinerer Strömungsspalte. In der Theorie wird die Folienblase in Bereichen eines großen Strömungsspalt in Extrusionsrichtung länger gedehnt, was zu Dünnstellen in der Folie führt [HKF20c, HKFG20].

Ähnlich der Beschreibung der Haupteinflüsse bei der Massedurchsatzseigerung (Bild 11.2) ist in Bild 12.2 die Effekthöhe der Prozessparameter hinsichtlich einer Zunahme der Foliendickenschwankung durch den Einsatz der LFE dargestellt.

Eine Steigerung der Schmelzetemperatur wirkt sich dabei negativ auf die Foliendickenschwankung aus. So führt eine Erhöhung der Schmelzetemperatur um eine Variationsstufe tendenziell

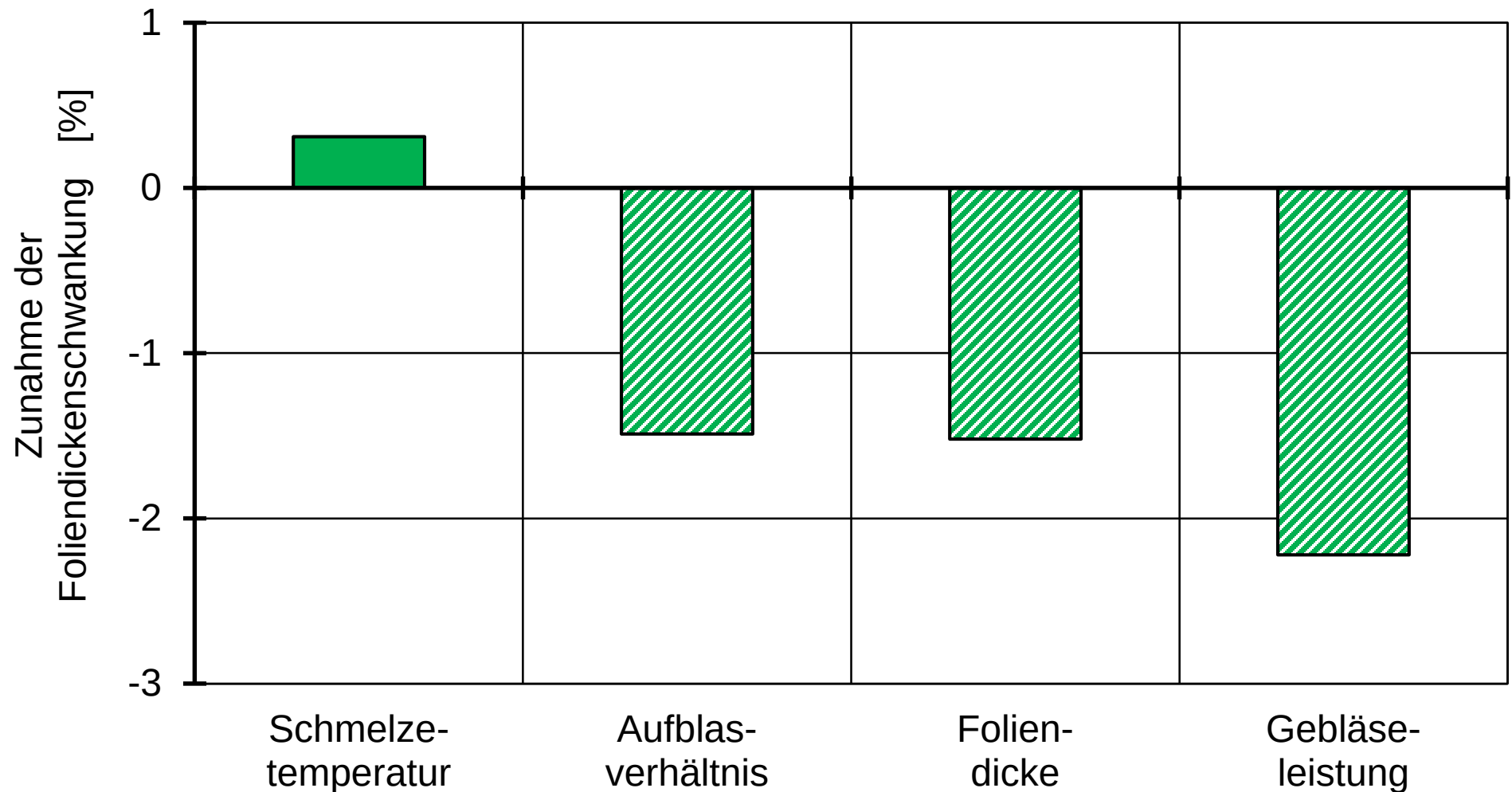
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die Foliendickenschwankung



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



Effekthöhe der LFE in Abhängigkeit der Prozessparameter auf die Zunahme der Foliendickenschwankung



zu einer Zunahme der Dickenschwankung von 0,3 %. Dies ist auf eine abnehmende Viskosität der Schmelze bei steigenden Schmelzetemperaturen zurückzuführen. Bei einer geringeren Viskosität ist die Folienblase empfindlicher gegen Kühlluftimpulse, welche durch den Einsatz der LFE erhöht werden, wodurch die Foliendickenschwankung zunimmt.

Die Zunahme der Foliendickenschwankung in Abhängigkeit des BUR zeigt einen entgegengesetzten und zudem signifikanten Verlauf. Größere Foliendickenschwankungen sind demnach bei einem niedrigen Aufblasverhältnis zu beobachten. Dies kann mit der konstruktiv bedingt besseren Anpassung der LFE auf größere Aufblasverhältnisse begründet werden. Soll eine schmalere Folie (kleines Aufblasverhältnis) hergestellt werden, muss die Membran deutlich stärker verengt werden, als bei breiteren Blasfolien (großes Aufblasverhältnis). Eine stärkere Deformation der Membran hat einen größeren Faltenwurf zur Folge, sodass sich eine inhomogenere Kühlung, welche Dick- und Dünnstellen verursacht, einstellt.

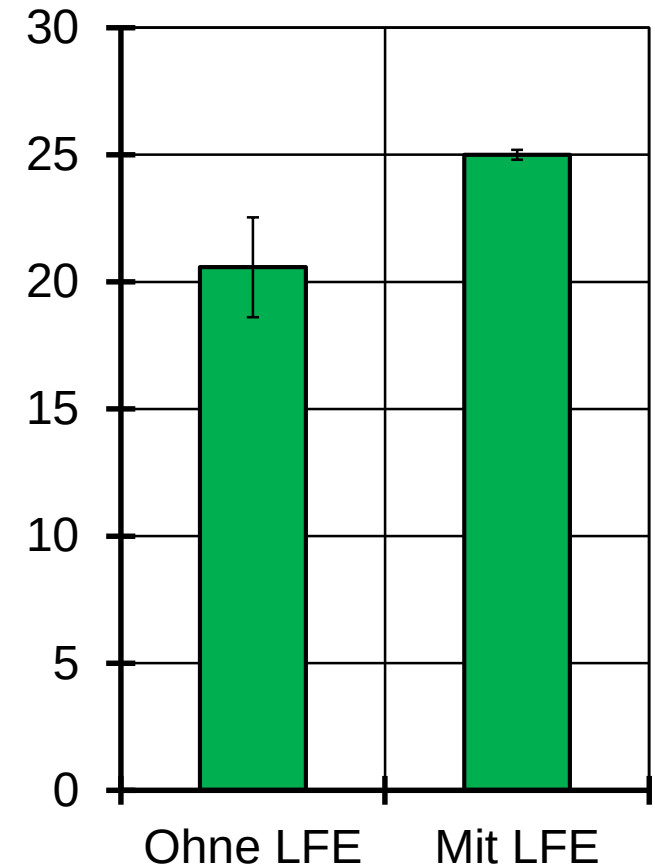
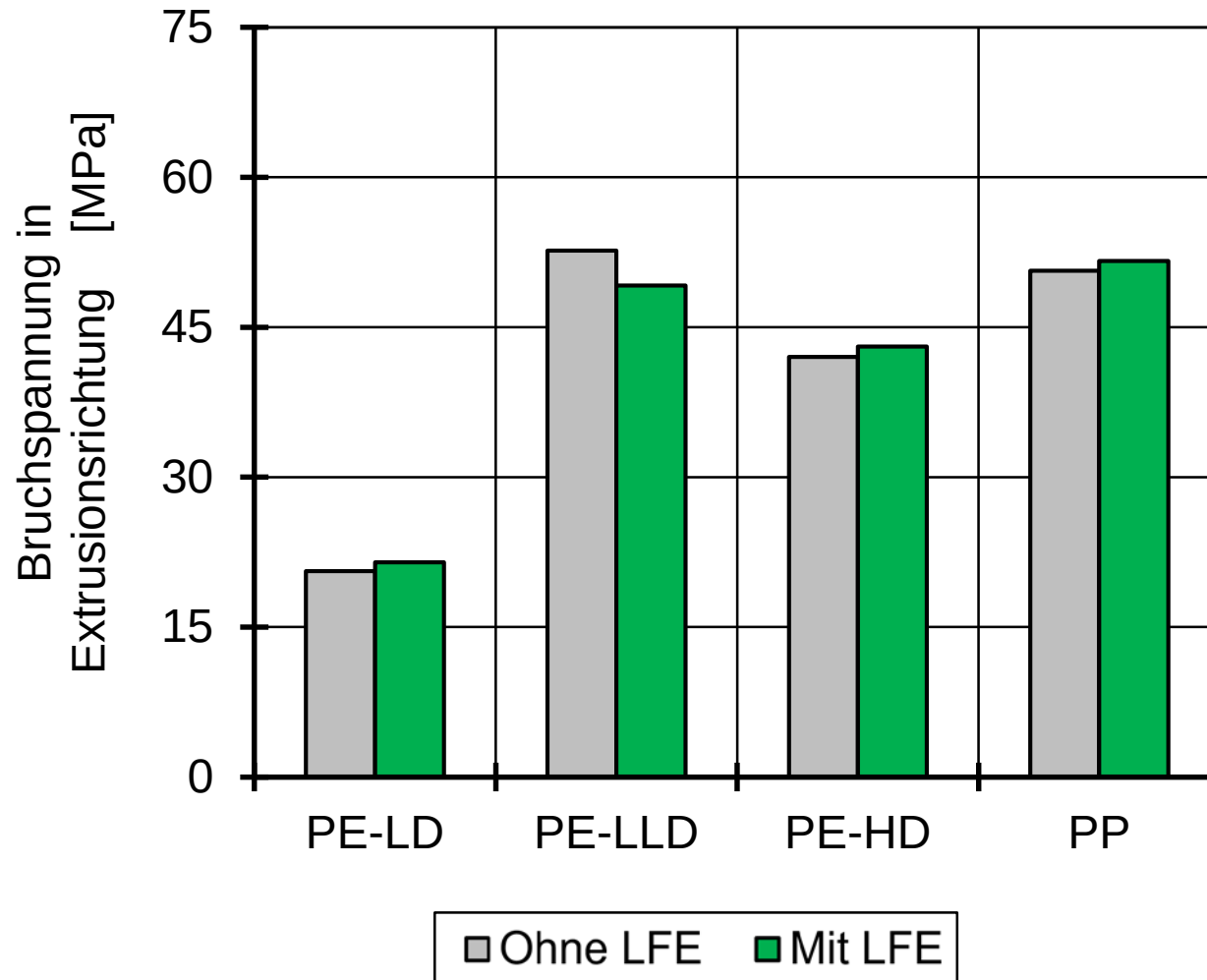
Nimmt die Foliendicke von 60 μm auf 180 μm zu, resultiert dies in einer signifikant geringeren Foliendickenschwankung von ca. 1,4 %. Dies ist auf Selbstheilungsprozesse innerhalb der Folie zurückzuführen. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen ist die Kerntemperatur im Folieninneren bei einer dickeren Folie höher als bei einer dünnen Folie. Durch die höheren Kerntemperatur dickerer Folien, welche Wärme in die Außenschichten überträgt, können sich eingefrorene Dick- oder Dünnstellen erwärmen und ausheilen.

Niedrige Gebläseleistungen zeigen einen ähnlichen Zusammenhang. Eine Steigerung von 50 % auf 100 % führt zu einer signifikant reduzierten Zunahme der Foliendickenschwankung von ca. 2,2 %. Durch den Einsatz der LFE kann sich die Folie in der Schlauchbildungszone durch Ausbildung des Venturi-Effektes bereits frühzeitig aufgeweitet werden, wodurch eine größere Oberfläche zur Kühlung der Folie bereitgestellt werden kann. Die Höhe der Oberflächenvergrößerung nimmt dabei mit steigender Gebläseleistung zu, da diese nach Gleichung 4.8 zu einer Abnahme des statischen Druckes im Strömungsspalt führt. Wird davon ausgegangen, dass die Foliendickenschwankungen unmittelbar nach dem Werkzeugaustritt niedrig sind, können die konstanten Foliendicken durch die erhöhte Oberfläche der Folie und der daraus resultierend verbesserter Kühlleistung in Werkzeugnähe frühzeitig fixiert werden [Grü20].

12.2 Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften

Neben dem Einfluss auf die Foliendickenschwankung spielt vor allem Einfluss die mechanischen Folieneigenschaften eine wichtige Rolle. Bild 12.3, links, zeigt daher ähnlich der Diagramme zuvor die mittlere Bruchspannung über den gesamten Versuchsplan für jedes Material mit und ohne LFE, als auch einen beispielhaften Versuchspunkt für das PE-LD auf der rechten Seite. Es zeigt sich im Allgemeinen eine Zunahme der Bruchspannung durch den Einsatz der

Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften in Extrusionsrichtung



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %

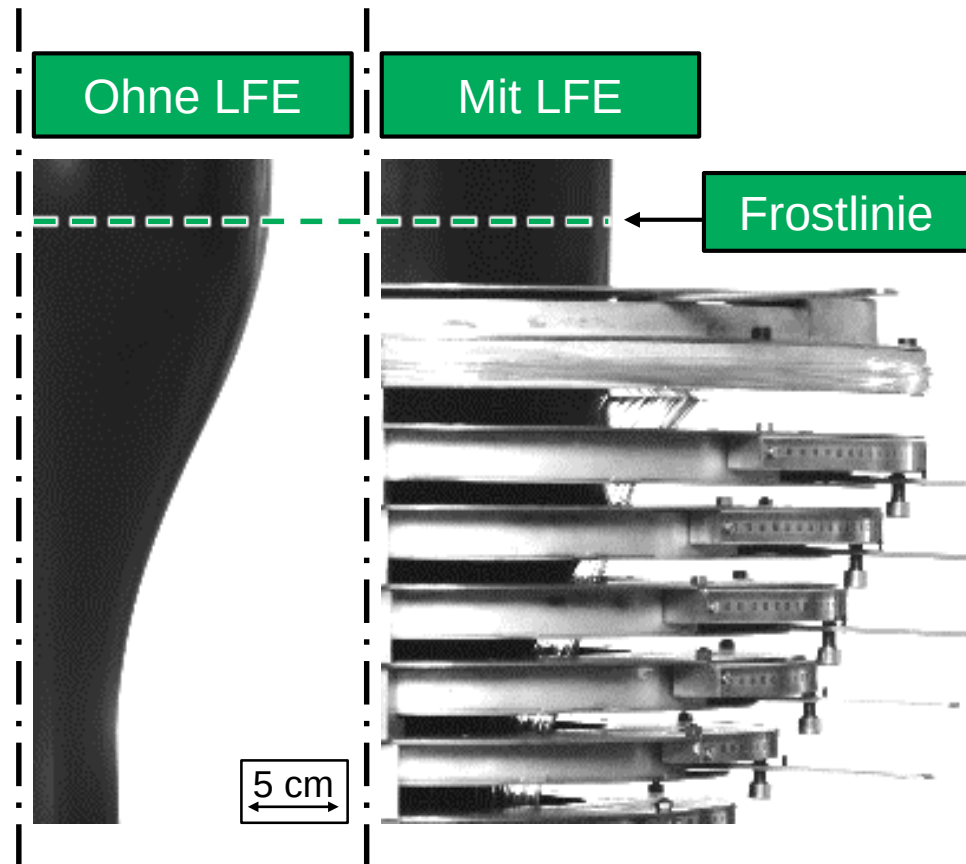


entwickelten LFE [HKF20c]. Zur Erklärung dieser Tatsache ist in Bild 12.4 zu sehen, dass beim Einsatz der LFE eine frühzeitige Aufweitung der Folie stattfindet. Durch die frühzeitige Aufweitung der Folienblase in der LFE hat sich die Blase bereits zu einem früheren Zeitpunkt in ihrer Breite vollständig ausgebildet. Bis zum Erreichen der Frostlinie, welche durch die Kristallisationstemperatur des Kunststoffes charakterisiert ist, befindet sich der Folienschlauch 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, welche eine Zunahme der Bruchspannung zur Folge haben [HKF20c]. Als Folge einer verstärkten Längsorientierung nehmen jedoch die Querorientierungen ab, sodass die Bruchspannung quer zur Extrusionsrichtung durch den Einsatz der LFE ebenfalls abnimmt (Bild 12.5). Diese Zunahme bzw. Abnahme der Orientierungen in bzw. quer zur Extrusionsrichtung lassen sich zudem über Schrumpfmessungen charakterisieren. So zeigen die nachfolgenden Bilder stärkere (Bild 12.6) bzw. geringere (Bilder 12.7) Schrumpfeigenschaften der Folie im Vergleich zum konventionellen Prozess. Bei den Schrumpfmessungen gilt, je größer der Orientierungsgrad desto größer ist der resultierende Schrumpf. Dies ist auf Relaxationsprozesse innerhalb der Folie zurückzuführen [HKF20c].

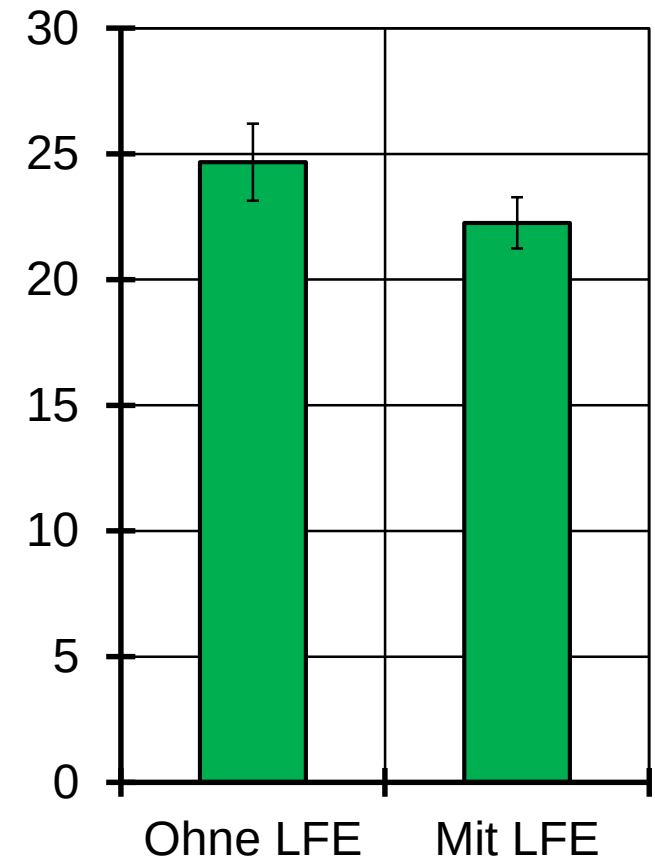
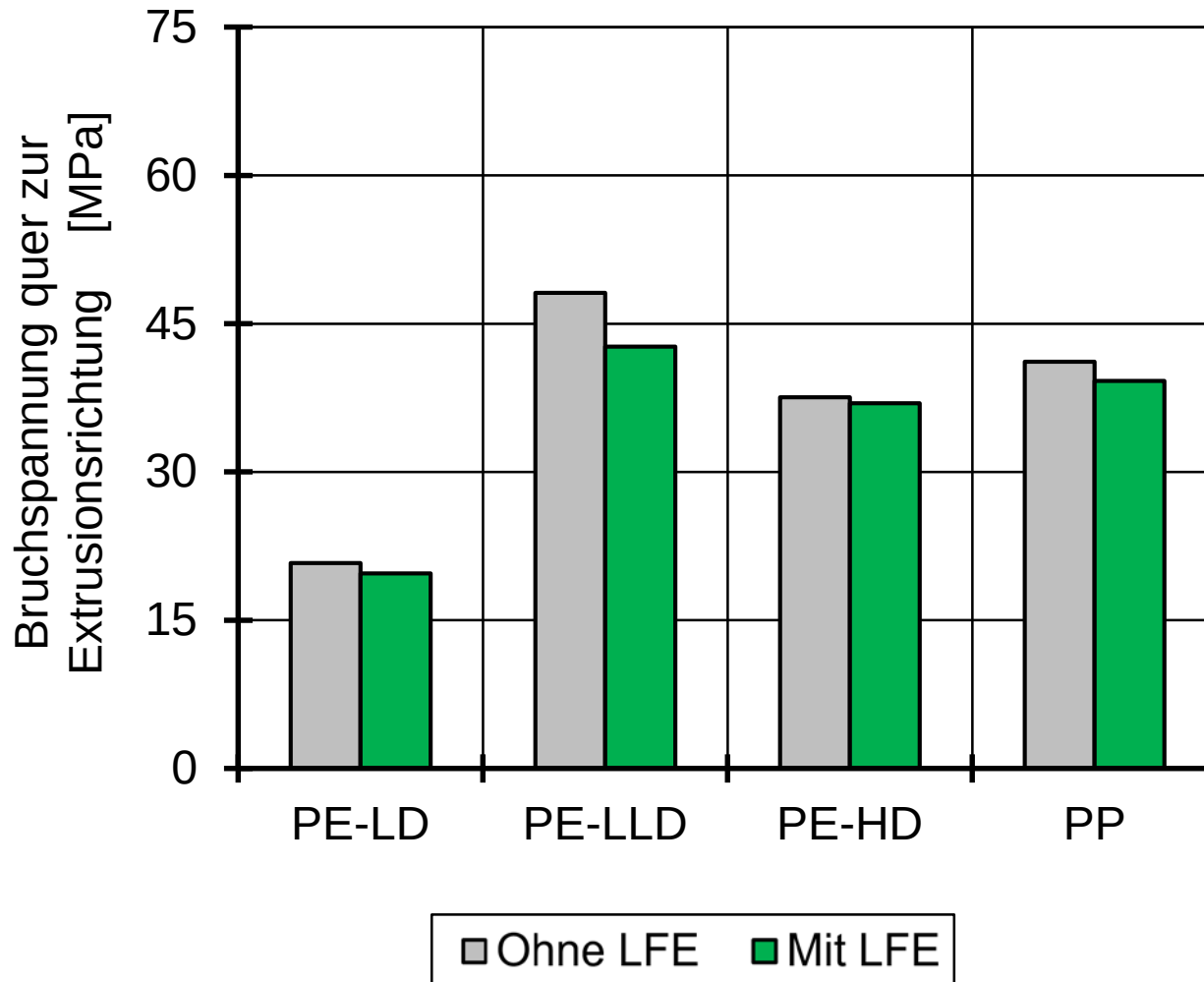
Die eingebrachten Orientierungen in Extrusionsrichtung sorgen zudem dafür, dass die Folie bereits stärker vorgestreckt ist als im konventionellen Prozess. Als Folge kann die Folie bei Belastung nur zu einem geringeren Teil weiterverstreckt werden, sodass die Folien mit LFE eine geringe Bruchdehnung aufweisen als die konventionell hergestellten Folien (Bild 12.8) [HKF20c]. Invers dazu nimmt die Bruchdehnung durch den geringen Orientierungsgrad quer zur Extrusionsrichtung zu (Bild 12.9).

Ein ähnliches Verhalten der Folie zeigt sich bei der Steifigkeit der Folie, also für das E-Modul. Jedoch steigt dieses nicht nur in (Bild 12.10), sondern auch quer zur Extrusionsrichtung an (Bild 12.11) an. Der Anstieg in Extrusionsrichtung ist wie bereits mehrfach dargestellt auf den höheren Orientierungsgrad der Moleküle zurückzuführen. Die Zunahme quer zur Extrusionsrichtung ist möglicherweise auf einen höheren Kristallisationsgrad der Folie zurückzuführen. Dieser resultiert aufgrund einer kürzeren Verweilzeit der Folie in der Kühlstrecke. Durch die entwickelte Luftführungseinrichtung sind Durchsatzsteigerungen von bis zu ca. 60 % möglich. Für die Folienherstellung bedeutet diese Steigerung zwangsläufig eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit, um die gleichen Foliendicken zu realisieren. Eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit geht jedoch mit einer kürzeren Verweilzeit der Folie innerhalb der Kühlstrecke einher, sodass sich aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen die Folientemperatur innerhalb der Kühlstrecke, oberhalb der LFE, erhöht. Durch diese Temperaturerhöhung kommt es zu einer stärkeren Nachkristallisation, was in einem größeren Kristallwachstum der teilkristallinen Phasen resultiert, wodurch sich ebenfalls der E-Modul bzw. die Steifigkeit der Folien erhöht.

Der Einsatz der LFE führt im Strömungsspalt zu einer frühzeitigen Aufweitung der Folienblase



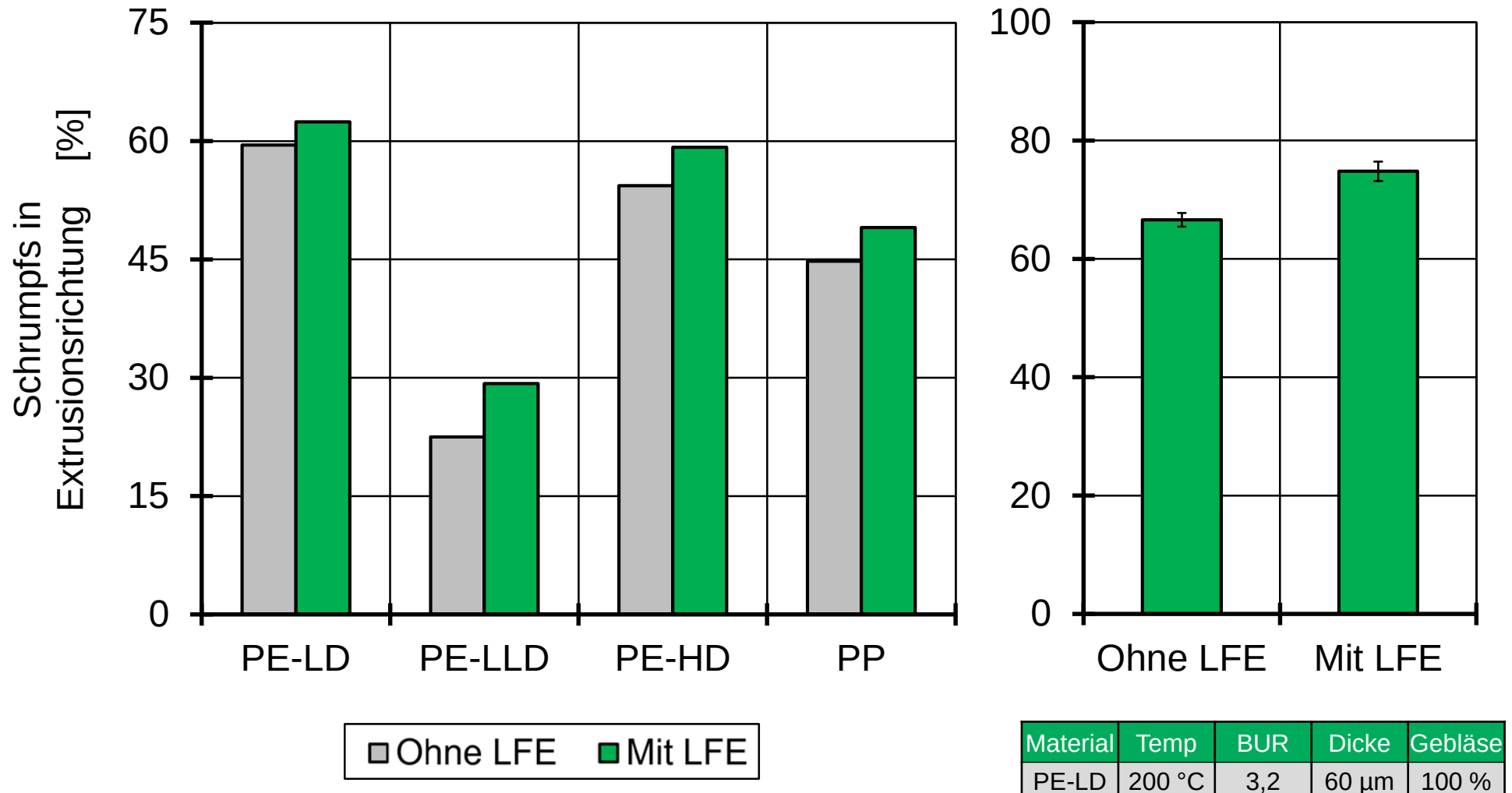
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften quer zur Extrusionsrichtung



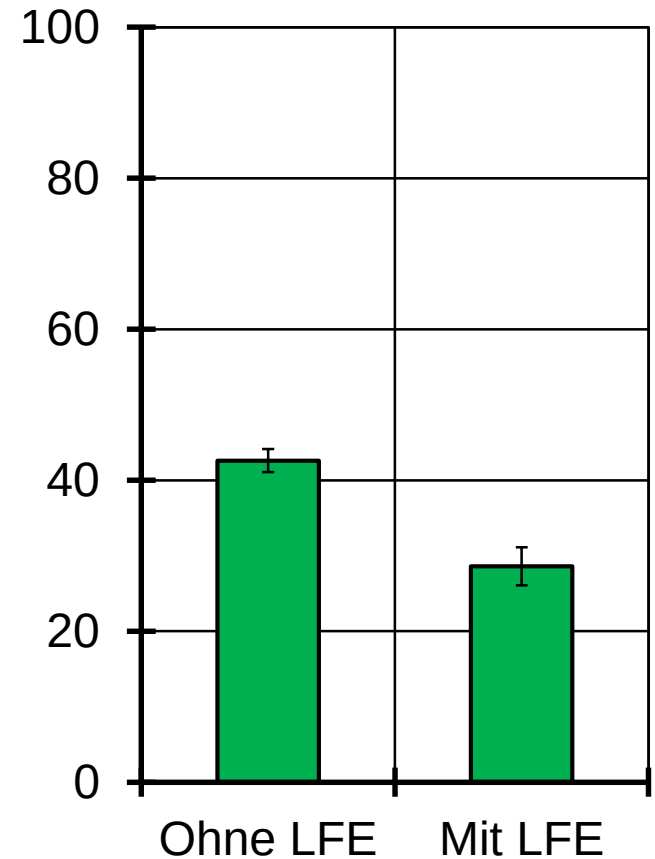
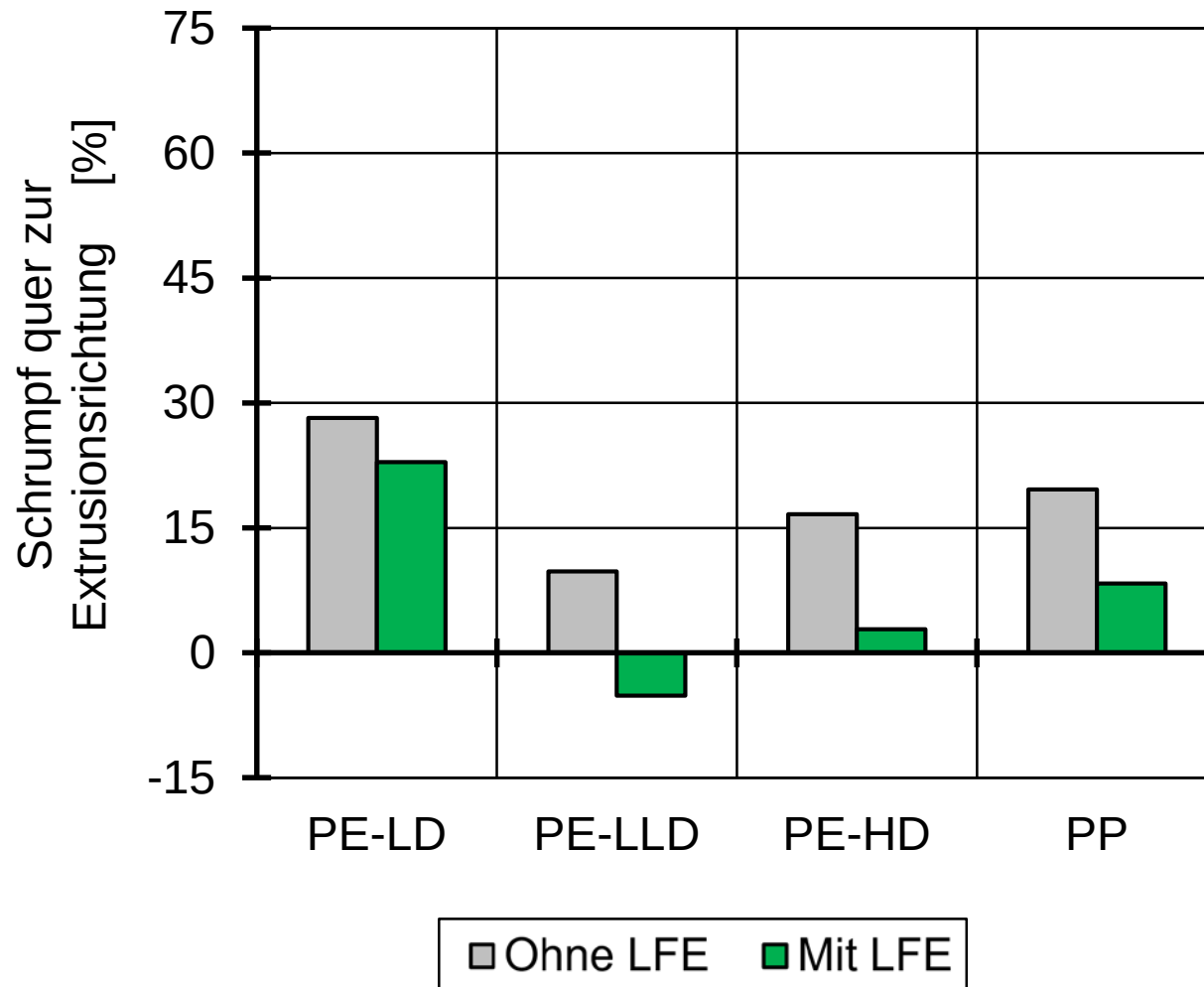
Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die Schrumpfeigenschaften in Extrusionsrichtung



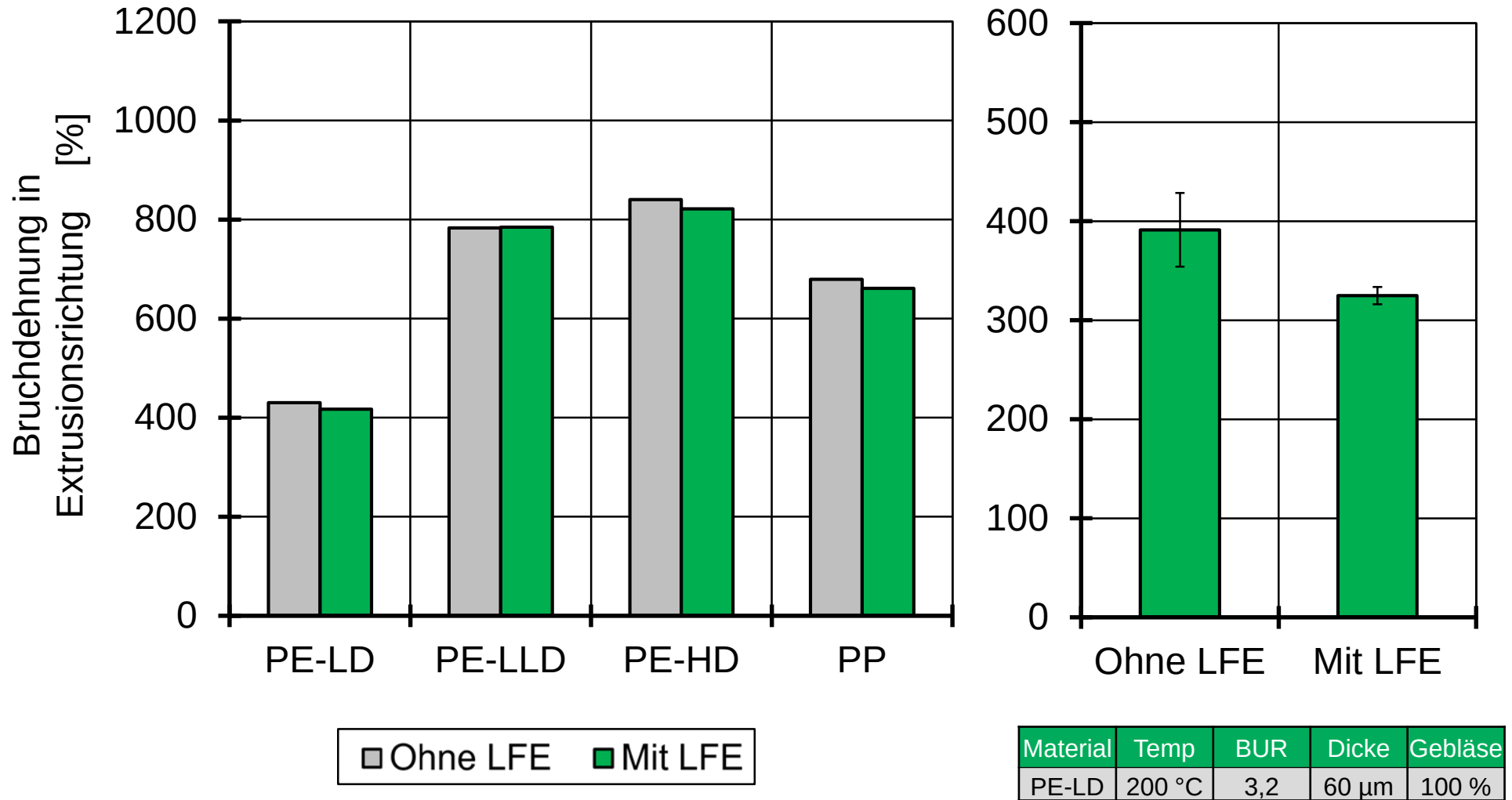
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die Schrumpfeigenschaften quer zur Extrusionsrichtung



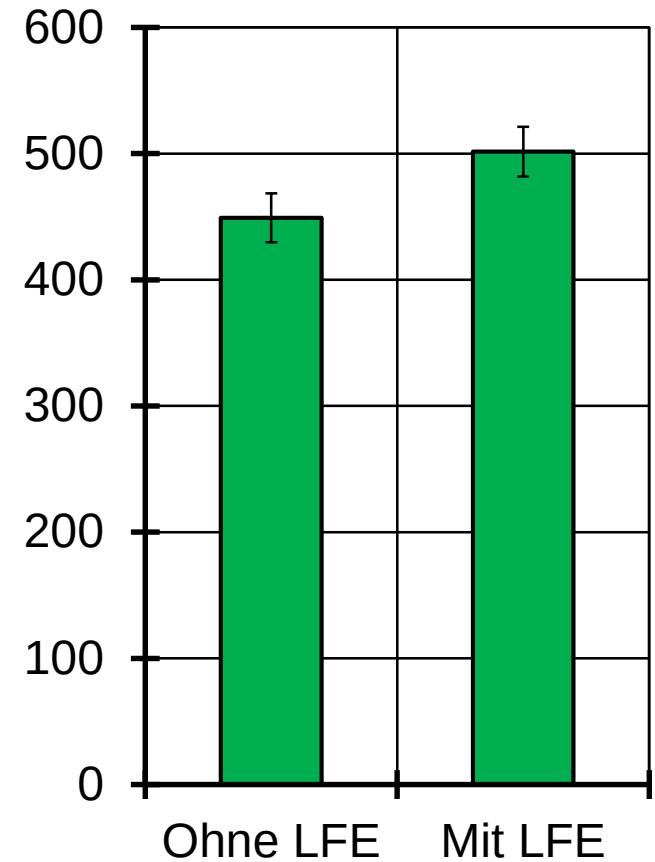
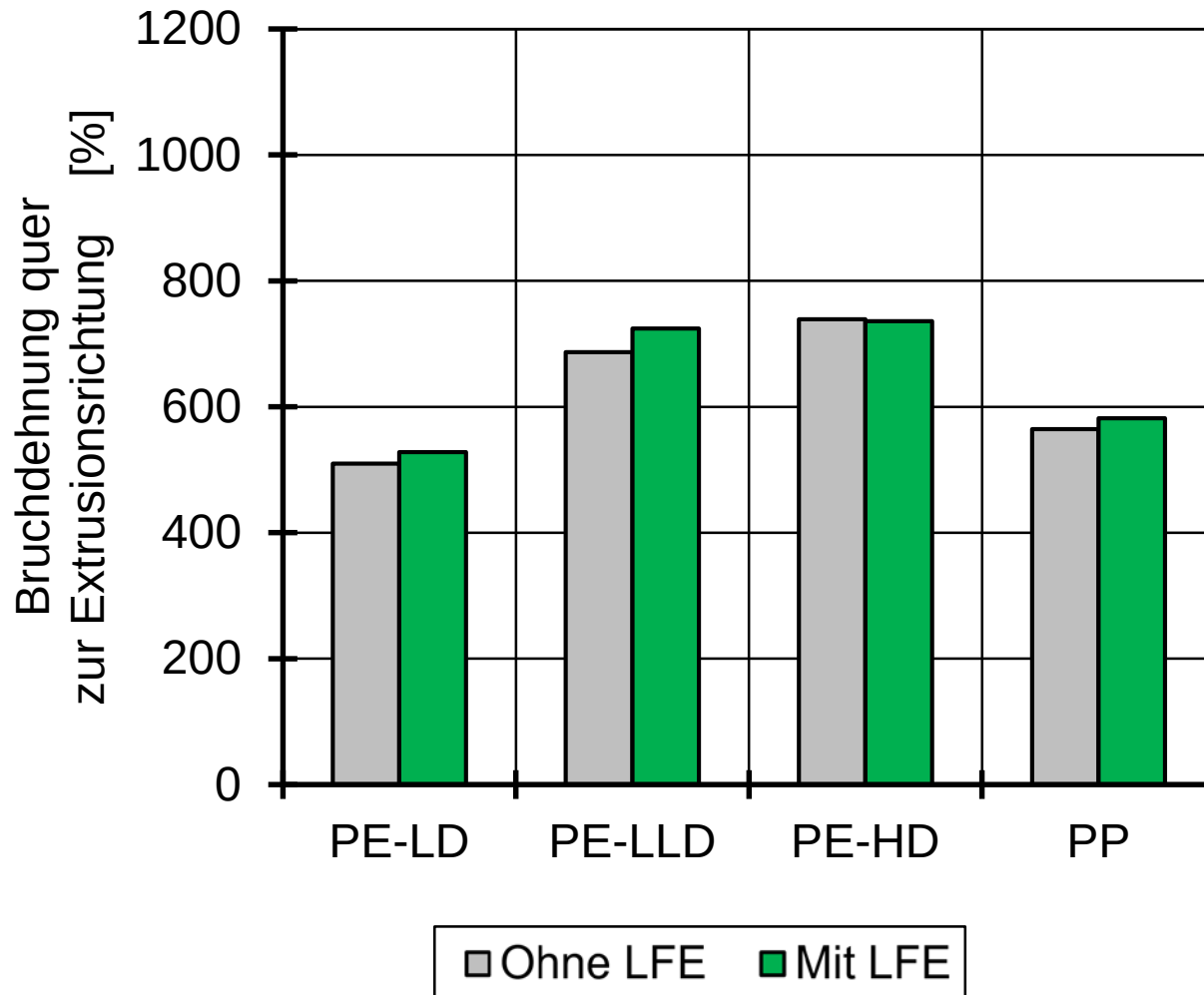
Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften in Extrusionsrichtung



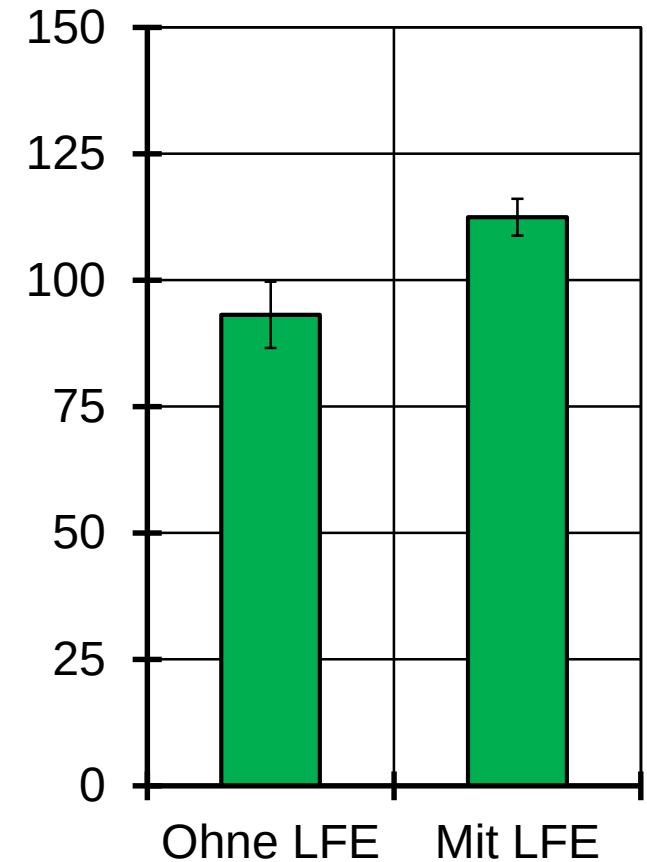
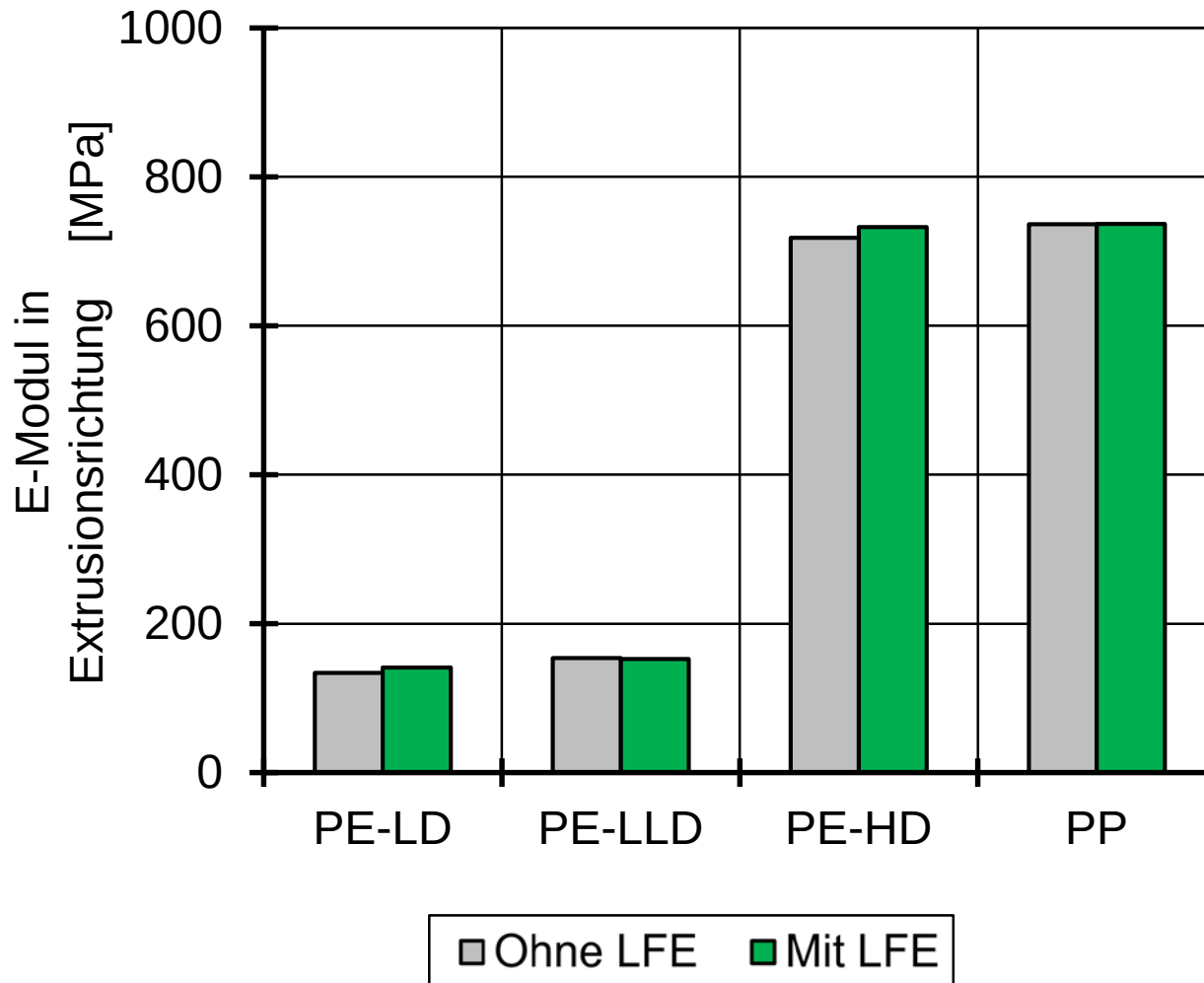
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften quer zur Extrusionsrichtung



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



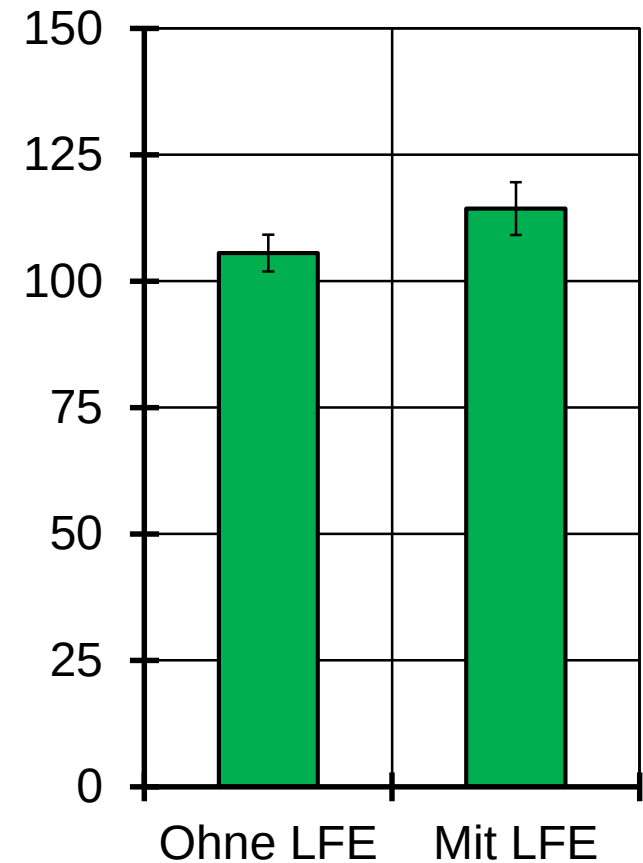
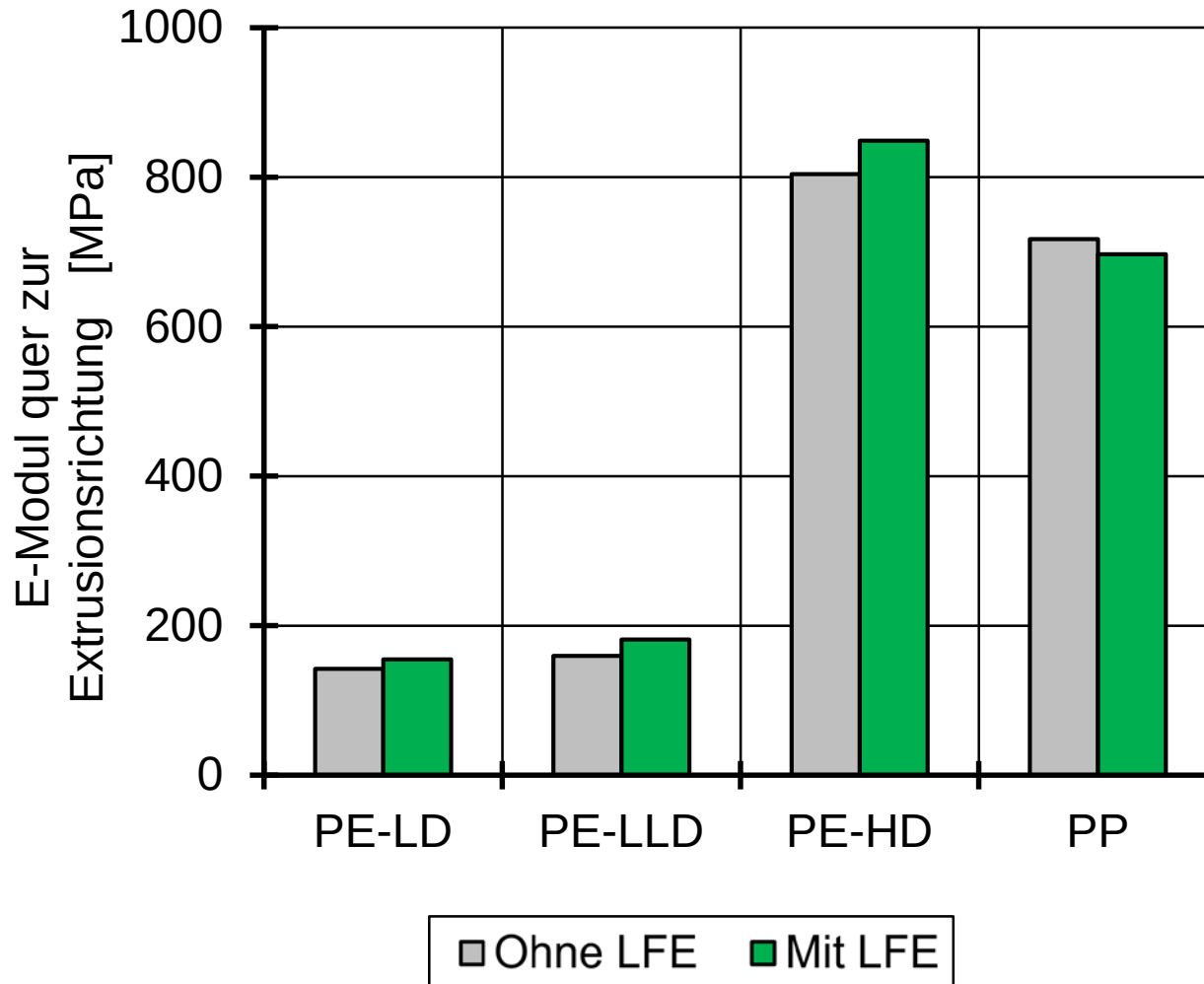
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften in Extrusionsrichtung



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften quer zur Extrusionsrichtung



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %

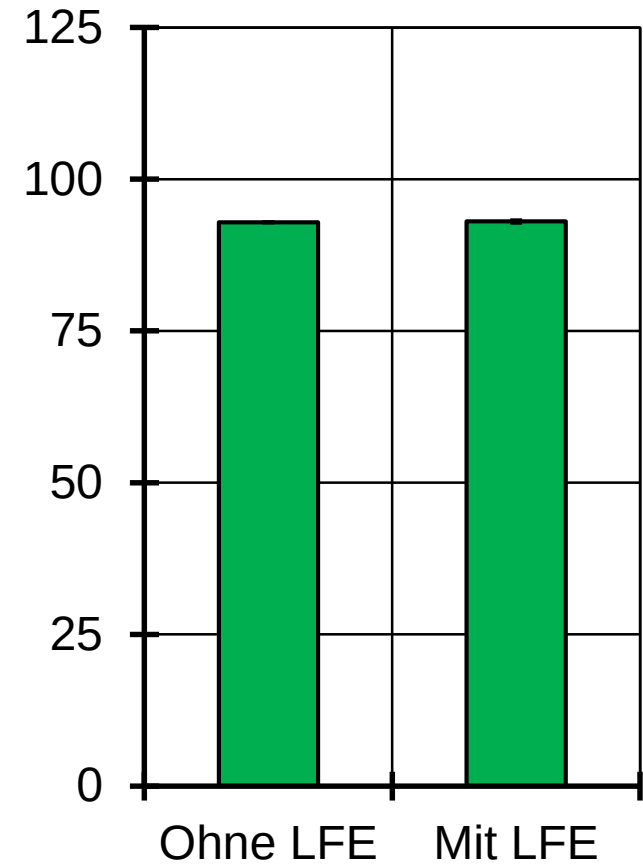
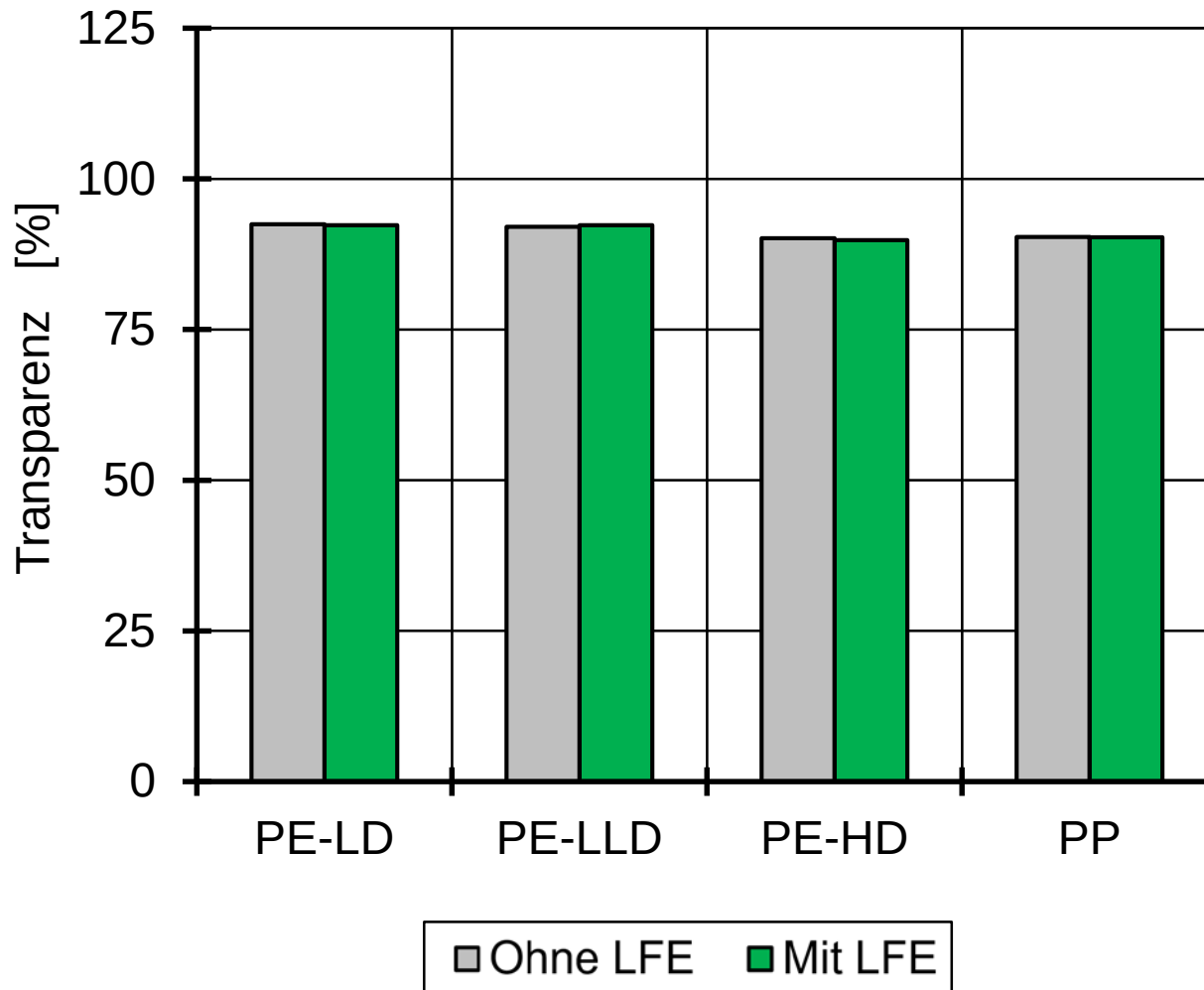


12.3 Einfluss auf die optischen Eigenschaften

Neben den mechanischen Eigenschaften spielen die optischen Eigenschaften einer Folie eine ebenfalls wichtige Rolle. Sie bestimmen das äußere Erscheinungsbild einer Folie. Die optischen Eigenschaften hängen neben dem Material besonders von der Verarbeitung ab. Durch den Einsatz der entwickelten LFE, die als Folge des Venturi-Effektes über weite Bereiche der Schlauchbildungszone eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlluft hervorruft, vergrößert sich der Wärmeübergangskoeffizient in diesen Bereichen [NN13]. Damit ergibt sich für die Folie ein vom Referenzzustand der konventionellen Kühlung unterschiedliches Temperaturprofil, das die Kristallausbildung beeinflusst. Daher wird im Folgenden der Einfluss der LFE auf die optischen Eigenschaften (Transparenz, Trübung) der Folien untersucht.

Bild 12.12 zeigt ähnlich wie die Abbildungen zuvor die gemittelte Transparenz der Folien mit und ohne LFE für die untersuchten Materialien. Es zeigt sich keine Beeinflussung der Folientransparenz in Abhängigkeit der LFE. Die dargestellten Unterschiede in den Folientransparenzen für die unterschiedlichen Materialien sind auf das Polymer selbst (Molekülstruktur) zurückzuführen. Während der Einsatz der entwickelten Luftführungseinheit keine Auswirkungen auf die Folientransparenz hat, scheint die Folientrübung hingegen beeinflusst zu werden (Bild 12.13). Auch in diesem Fall sind die unterschiedlichen Werte in Abhängigkeit der Materialien auf die Molekülstruktur zurückzuführen. Im Vergleich zur Transparenz beeinflusst die LFE die Folientrübung. So zeigt sich im Mittel bei den Materialien PE-LD, PE-LLD und PP eine geringe Zunahme der Folientrübung durch den Einsatz einer LFE. Diese Zunahme wird ebenfalls durch die beispielhafte Prozessparametereinstellung im rechten Diagramm in Bild 12.13 verdeutlicht. So steigt die Folientrübung um ca. 2 % von 8,7 % auf 10,5 % an. Die Zunahme der Folientrübung ist möglicherweise, wie bereits zuvor bei der Foliensteifigkeit beschrieben, auf eine kürzere Verweilzeit, aufgrund erhöhter Abzugsgeschwindigkeiten der Folie, in der Kühlstrecke zurückzuführen. Durch eine Nachkristallisation kommt es zu einem weiteren Kristallwachstum, sodass das Licht durch größere Kristalle stärker gebrochen wird, wodurch die Folientrübung zunimmt. Bei einem PE-HD führt der Einsatz der LFE durchschnittlich jedoch zu einer geringeren Folientrübung. Ein PE-HD wird üblicherweise mit einer Langhalsfahrweise hergestellt. Dies ist auf die geringere Schmelzefestigkeit eines PE-HD zurückzuführen. Somit steht im konventionellen Prozess aufgrund der später öffnenden Folienblase eine geringe Oberfläche für die Kühlung zur Verfügung. Der Einsatz der LFE führt demnach bei einem PE-HD im Vergleich zu den anderen Materialien zu einer höheren Oberflächenvergrößerung, und somit zu einer höheren Folienkühlung. Durch diese Tatsache wird die Folien stärker gekühlt, sodass sich im Vergleich zu den anderen Materialien möglicherweise eine geringe Folientemperatur in der Kühlstrecke ergibt, was zu einer reduzierten Nachkristallisation und somit zu einer geringen Folientrübung führen könnte.

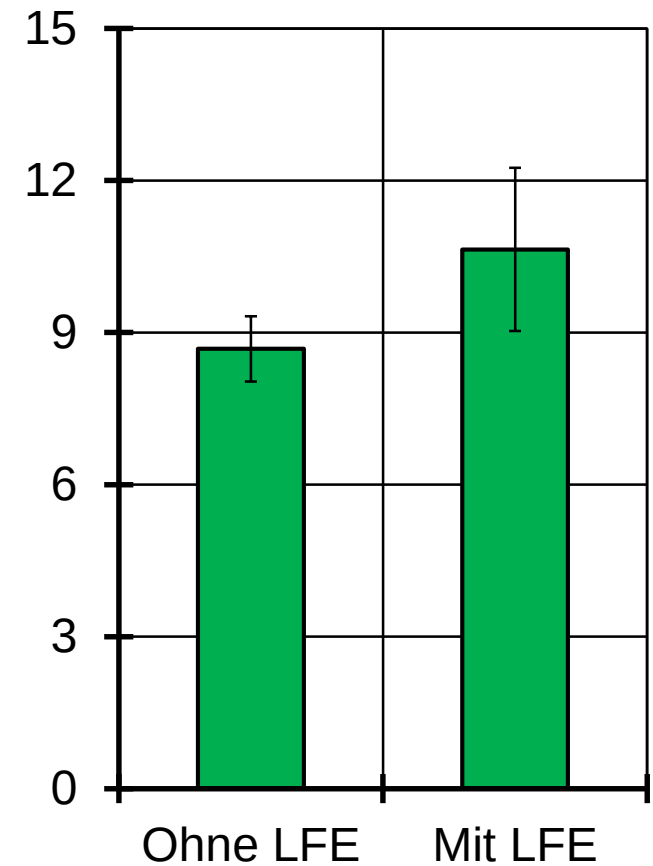
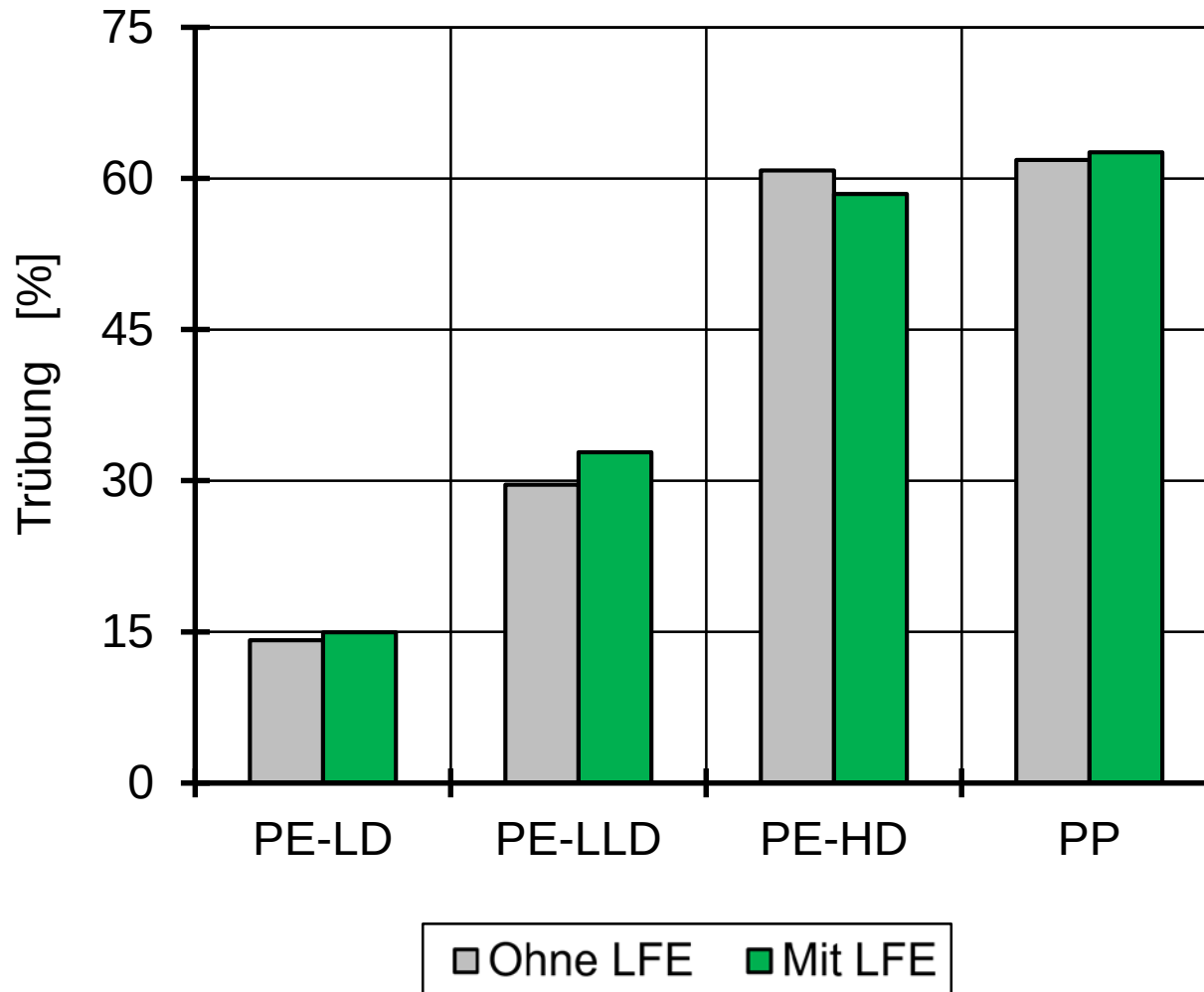
Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die optischen Eigenschaften



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



Einfluss der LFE und unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die optischen Eigenschaften



Material	Temp	BUR	Dicke	Gebläse
PE-LD	200 °C	3,2	60 µm	100 %



13 ERSTELLUNG EINES KONZEPTE FÜR DIE PROZESSREGELUNG

Nach der Untersuchung der LFE hinsichtlich des Massedurchsatz und der Folieneigenschaften sollte zudem ein Konzept für den Einsatz eines adaptiven Kühlrings in der industriellen Produktion erstellt werden. Nachdem zuvor die Randbedingungen und die Vorteile der Entwicklung ermittelt wurden, werden nun mögliche Strategien zur Regelung der LFE vorgestellt.

13.1 Analytische Modellbildung

Auf Grundlage der generierten Versuchsdaten wurde für das PE-LD versucht ein mathematisches Modell für die Einstellung der Blenden in Abhängigkeit der Prozessparameter aufzustellen. Tabelle 13.1 zeigt die analytischen Gleichungen zur Berechnung der Blendendurchmesser für jede Irisblende in Abhängigkeit der jeweils signifikanten Prozessparameter [Grü20].

Blende	Blendendurchmesser [mm]
1 (unten)	$155,7117 + 1,536277 \cdot \text{Foliendicke} - 12,0881 \cdot \text{Foliendicke}^2$
2	$164,4417 - 0,95284 \cdot \text{Foliendicke} - 13,2658 \cdot \text{Foliendicke}^2$
3	$184,4552 - 3,20305 \cdot \text{Foliendicke} - 16,5095 \cdot \text{Foliendicke}^2$
4	$199,9554 + 0,571282 \cdot \text{Foliendicke} - 15,4005 \cdot \text{Foliendicke}^2 - 11,6389 \cdot \text{Gebläseleistung}$
5	$230,8876 + 5,519557 \cdot \text{BUR} - 10,667 \cdot \text{BUR}^2$
6 (oben)	$263,4243 - 0,55489 \cdot \text{Schmelzetemperatur} - 10,9805 \cdot \text{Schmelzetemperatur}^2 + 7,333705 \cdot \text{BUR}$

Tabelle 13.1: Analytische Gleichungen zur Berechnung der Blendendurchmesser [Grü20]

Um die Güte des Modells zu bewerten, wurden die über den gesamten Versuchsplan eingestellten Blendendurchmesser mit den errechneten Werten des mathematischen Modells verglichen. Es ergab sich eine über alle Blenden gemittelte Abweichung von 11,66 mm von den real eingestellten Durchmessern mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von 6,52 mm. Da jedoch bereits minimale Änderungen der Blendendurchmesser von nur wenigen Millimetern zu einer Änderung des Prozessverhaltens, insbesondere der Blasenstabilität, führen können, war eine mittlere Abweichung von 11,66 mm für den Anwendungsfall nicht zu tolerieren, weshalb alternative Modellierungsmethoden herangezogen werden mussten [Grü20].

13.2 Modellbildung mittels Fuzzy-Control

Neben dem konventionellen Verfahren der Regressionsanalyse, existieren weitere Modellierungsverfahren, welche vorrangig zum Einsatz kommen, wenn eine klassische PID-Regelung aufgrund unklarer Zusammenhänge nicht möglich ist [Grü20]. Fuzzy-Logiken bedienen sich beispielsweise einer „unscharfen Logik“. Grundlage für die Modellierung stellt das aus einem statistischen Versuchsplan erlangte und darüber hinaus von Experten eingebrachte Wissen über

den zu modellierenden Prozess dar, welches in einem einfachen Regelwerk implementiert wird. Zum Einsatz kommen die Systeme vor allem als „Fuzzy-Control“ in der Regelungstechnik zur Prozesssteuerung von Anlagen. Fuzzy-Logiken werden darüber hinaus auch zur Optimierung von neuronalen Netzen verwendet („Neuro-Fuzzy“). Anders als neuronale Netze oder evolutionäre Algorithmen sind Fuzzy-Systeme nicht lernfähig und bedürfen in anderer Versuchsumgebung einer manuellen Anpassung [Vei16, Grü20]. Da die analytische Modellbildung keine ausreichende Genauigkeit zur Einstellung der Blendendurchmesser bietet, sollte untersucht werden, wie sich diese mit dem Einsatz von Fuzzy-Logiken verbessern lässt. Auf die Beschreibung der genauen Funktionsweise der Modellierungsmethode soll an dieser Stelle verzichtet werden. Es sei jedoch auf [Vei16] verwiesen. Zur effizienten Auswertung der aufzustellenden Modelle wurde auf die Matlab Toolbox „Fuzzy Logic“ zurückgegriffen [Grü20].

13.2.1 Fuzzifizierung

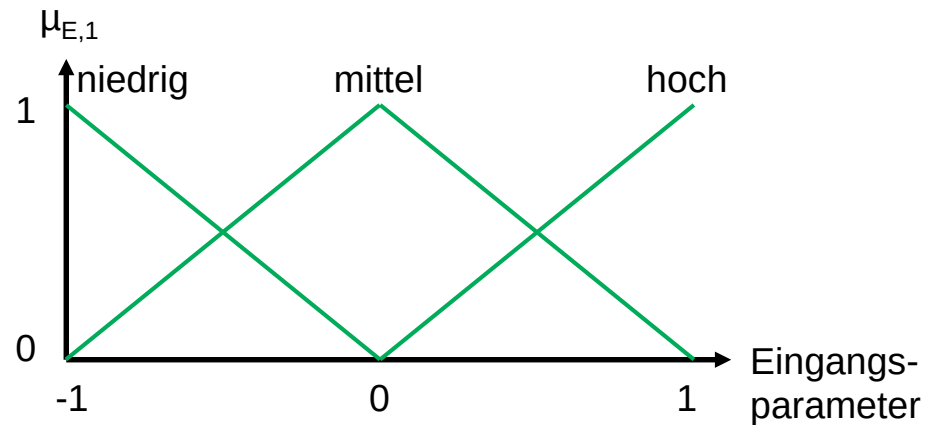
Der vorgegebene Sachverhalt wurde bei der Fuzzifizierung Zuordnungsfunktionen und -graden μ zugeordnet. Ziel war die Festlegung zu welchen Grad ein Eingangs- oder Messwert eine bestimmte Eigenschaft erfüllt [Vei16]. Die Eingangsparameter des Fuzzy-Systems entsprachen den variierten Prozessparametern Schmelztemperatur, Aufblasverhältnis, Foliendicke und Gebläseleitung. Da zur Versuchsdurchführung ein vollfaktorieller Versuchsplan zum Einsatz kam, ergab sich daraus automatisch die Definition der unscharfen Mengen durch die Höhe der eingestellten Prozessparameter, nämlich „niedrig“ (-1) und „hoch“ (+1). Beispielsweise wird die Schmelztemperatur in den Faktorstufen 180 °C (niedrig) und 200 °C (hoch) variiert. Da auch Zustände zwischen den definierten Mengen „niedrig“ und „hoch“ bestanden, war zu definieren, mit welcher mathematischen Zugehörigkeitsfunktion die einzelnen Zustände ineinander übergehen. Der einfachste Zusammenhang ist durch eine lineare Funktion beschreibbar, jedoch ist eine Vielzahl an Funktionen denkbar. Zu beachten war, dass die Summe der Zugehörigkeitsgrade eines Messwertes immer eins ist. So ist z.B. bei einer linearen Zugehörigkeitsfunktion eine Schmelztemperatur von 190 °C jeweils zu 50 % den unscharfen Mengen „niedrig“ und „hoch“ zuzuordnen. Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit verschiedener Fuzzy-Logiken wurde ein linearer und ein sigmoidaler Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion nach Bild 13.1 herangezogen [Grü20].

Die Ausgangsparameter der Fuzzy-Logik bildeten die sechs Blendendurchmesser zur Einstellung der luftführenden Membran. Die Definition der unscharfen Mengen erfolgte willkürlich in die Zustände „geschlossen“, „fast geschlossen“, „mittel“, „fast offen“ und „offen“. Möglich sind jedoch auch gröbere oder feinere Einteilungen. Die Zuordnung von Durchmesserbereichen je Blende zu den Mengen orientierte sich dabei an den minimal und maximal eingestellten Wer-

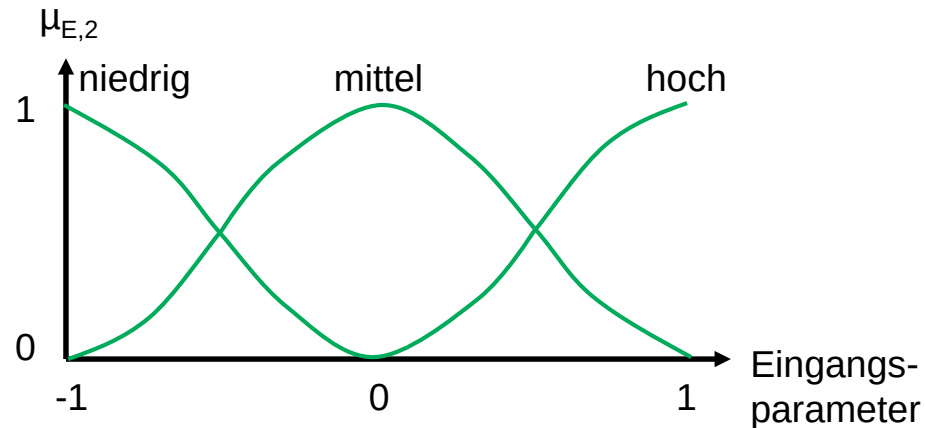
Fuzzy Control

Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsparameter

Linearer
Verlauf
(überschnitten)



Sigmoidaler
Verlauf



ten während der Versuchsdurchführung [Grü20]. Analog zu den Eingangsparametern war ebenfalls der Verlauf zwischen den festgelegten unscharfen Mengen durch mathematische Funktionen vorzunehmen. Dazu wurden lineare und sich überschneidende lineare Funktionen untersucht (Bild 13.2), mit welchen sich in vielfältigen Einsatzgebieten gute Ergebnisse erzielen ließen [Grü20].

Um die Genauigkeiten verschiedener Fuzzy-Systeme miteinander zu vergleichen, wurden die vorgestellten Zugehörigkeitsfunktion der Eingangs- und Ausgangsparameter miteinander zu jeweils einer Fuzzy-Logik kombiniert. Tabelle 13.2 zeigt die untersuchten Fuzzy-Systeme.

Fuzzy-Logik	Zugehörigkeitsfunktion	
	Eingangsparameter	Ausgangsparameter
#1	sigmoidal	linear
#2	linear	linear
#3	sigmoidal	linear (überschnitten)
#4	linear	linear (überschnitten)

Tabelle 13.2: Untersuchte Fuzzy-Logiken in Abhängigkeit der Zugehörigkeitsfunktionen [Grü20]

13.2.2 Inferenz

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es Regeln aufzustellen, nach welchen die Fuzzy-Logik arbeitet. Die Formulierung kommt der menschlichen Denkweise sehr nahe und erfolgt nach einem „Wenn-Dann-Schema“. Es war jedoch ebenfalls möglich, qualitatives Expertenwissen in das Modell einfließen zu lassen, worauf an dieser Stelle verzichtet wird [Grü20].

13.2.3 Defuzzifizierung

Bei der Defuzzifizierung erfolgte die Berechnung der Blendendurchmesser in Abhängigkeit der eingegebenen Eingangsparameter nach der „Center of Gravity- Methode“, welche die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Auswertungsverfahren darstellt. Die unscharfen Zustände wurden so wieder in konkrete Zahlenwerte überführt [Grü20].

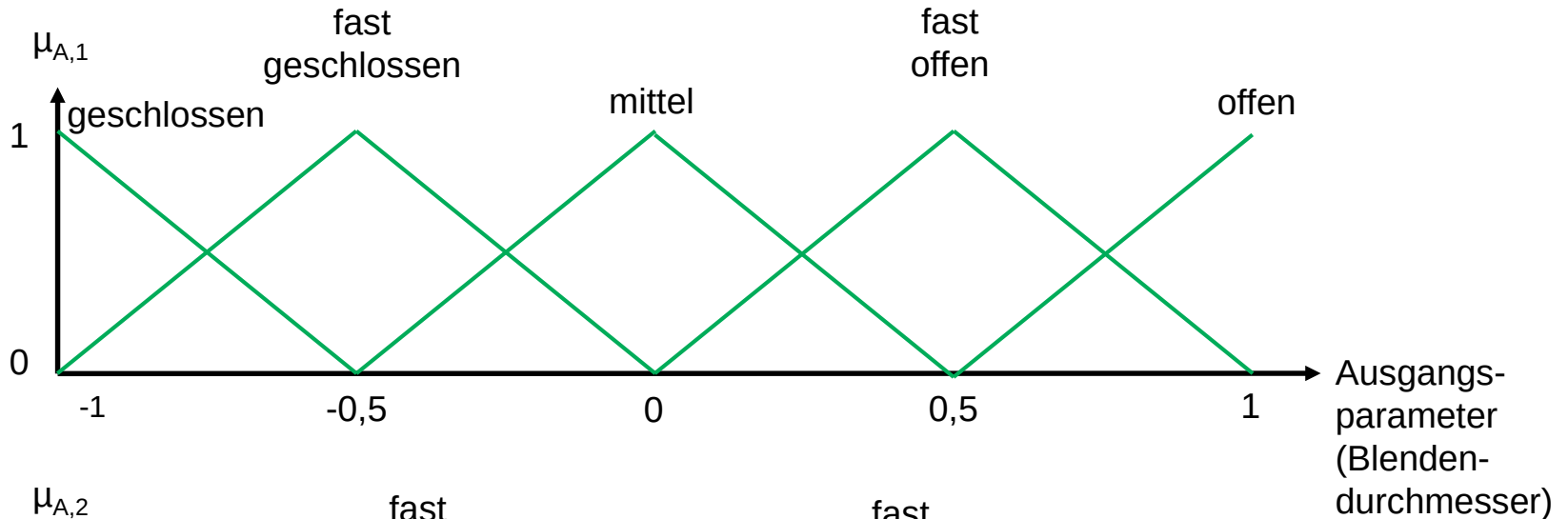
13.3 Vergleich der Modellierungsmethoden

Um die Leistungsfähigkeit der Modellierungsmethoden bewerten und miteinander vergleichen zu können, wurden die Ausgabeparameter der Fuzzy-Logiken analog zur Bewertung der Güte der analytischen Lösung mit den real eingestellten Blendendurchmessern an den erhobenen Versuchspunkten verglichen. Wurden je Fuzzy-Logik alle Abweichungen über alle sechs Blendengemittelt, ergab sich ein Qualitätsmaß, welches zum Vergleich der Fuzzy-Logiken herangezogen werden konnte. Bild 13.3 zeigt die mittlere Abweichung [mm] der Fuzzy-Modelle von den realen Parametern mit ihrer Standardabweichung. Es ist ersichtlich, dass die analytische

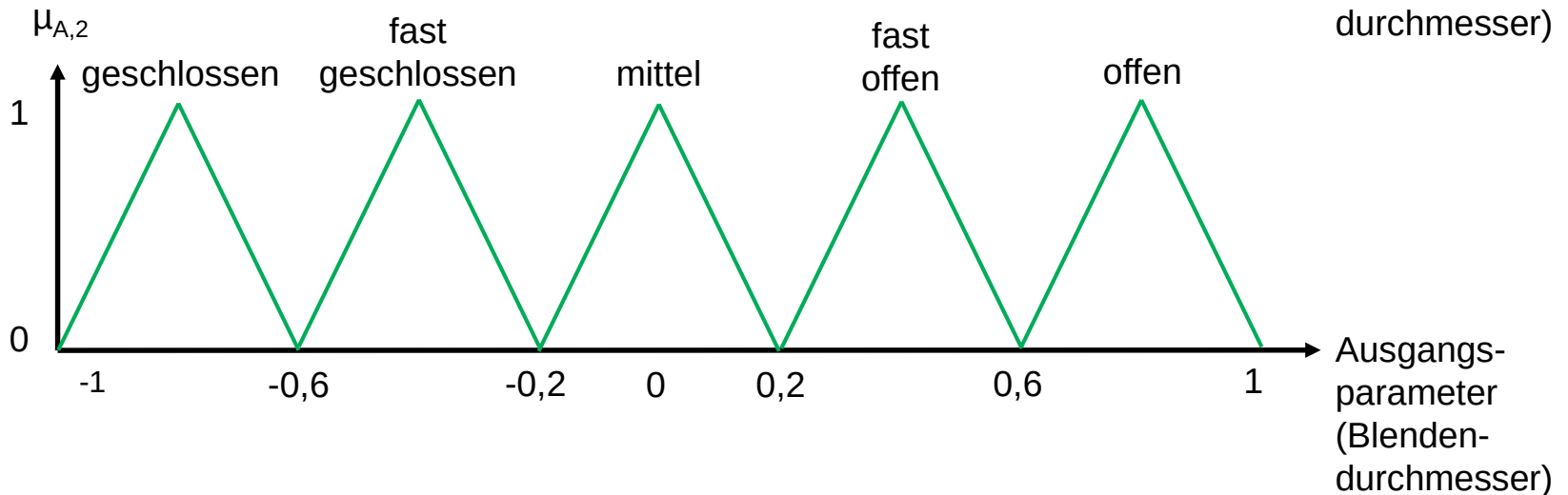
Fuzzy Control

Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsparameter

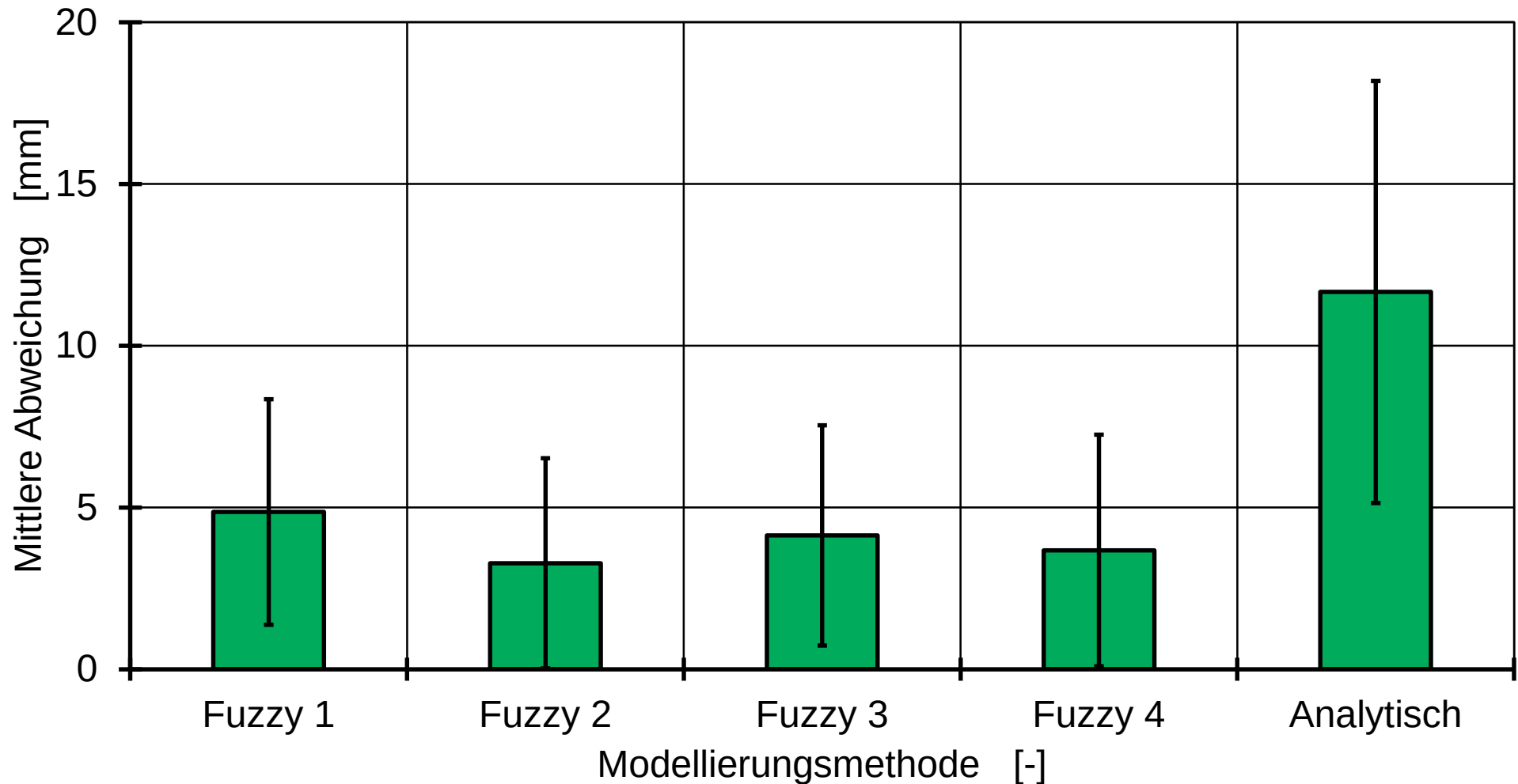
Linearer
Verlauf
(über-
schnitten)



Linearer
Verlauf



Mittlere Abweichung der Modellierungsmethoden von den realen Messwerten



Lösung, die geringste Genauigkeit zur Einstellung der Blenden ermöglicht. Mit einer mittleren Abweichung von 11,66 mm und einer Standardabweichung von 6,52 mm ist das Modell nur eingeschränkt zur Regelung nutzbar. Vorteilhaft ist jedoch, dass durch die analytische Lösung die Regelstrecke bekannt ist und übliche PID-Regler zum Einsatz kommen können. Die Verwendung von Fuzzy-Logiken verbessert die Modellgenauigkeit eklatant. So ist mit Fuzzy-Logiken, welche eine sigmoidale Zugehörigkeitsfunktion für die Eingangsparameter verwenden, bereits nur noch eine mittlere Abweichung von 4,86 mm (Fuzzy #1) und 4,14 mm (Fuzzy #3) bei geringeren Standardabweichungen von 3,49 mm (Fuzzy #1) und 3,14 mm (Fuzzy #3) möglich. Dies entspricht einer Verbesserung von ca. 140 % in der mittleren Abweichung und ca. 85 % bezüglich der Standardabweichungen im Vergleich zur analytischen Lösung. Eine linear überschnittene Zugehörigkeitsfunktion (Fuzzy #3) bezüglich der Ausgangsparameter ist dabei um ca. 17 % genauer als bei einer einfach linear angeordneten Zugehörigkeitsfunktion. Eine weitere Verbesserung der Modellgenauigkeit ist möglich, wenn statt sigmoidaler Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangsparameter ebenfalls einfach lineare Zusammenhänge verwendet werden. Fuzzy-Logik #4 ermöglicht mittlere Abweichungen von 3,67 mm bei einer Standardabweichung von 3,58 mm bei linear überschchnittener Zugehörigkeitsfunktion bezüglich der Ausgangsparameter. Wird statt einer linear überschnittenen eine einfach lineare Zugehörigkeitsfunktion verwendet, ergibt sich der in der Untersuchung bestmögliche mittlere Fehler von 2,28 mm und einer Standardabweichung von 3,25 mm. So sind Fuzzy-Logiken mit einfach linearer Zugehörigkeitsfunktion für die Eingangsparameter ca. 217 % genauer im Mittelwert und ca. 77 % in der Standardabweichung als die analytische Lösung. Eine lineare Zugehörigkeitsfunktion für die Ausgangsparameter (Fuzzy #2) führt zu ca. 12 % genaueren Lösungen als lineare überschchnittene Lösungen. Zur Regelung der Blendendurchmesser in Abhängigkeit der Blendendurchmesser ist deshalb Fuzzy #2 zu verwenden [Grü20].

14 FAZIT UND AUSBLICK

Durch eine mehrfache iterative Entwicklung einer adaptiven sowie flexiblen Luftführungseinheit in der Blasfolienproduktion ist eine konturnahe Anpassung einer luftführenden Membran durch Irisblenden an die Foliengeometrie während des Prozesses möglich. Durch diese Anpassung kann der Venturi-Effekt unabhängig der Prozessparameter für verschiedene Polyolefine (PE-LD, PE-LLD, PE-HD, PP) hervorgerufen werden, wodurch der Durchsatz im Vergleich zum konventionellen Prozess im Mittel um ca. 30 % gesteigert werden konnte. Besonders positiv auf die Massedurchsatzsteigerung wirken sich geringe Aufblasverhältnisse, geringe Foliendicken sowie hohe Gebläseleistungen aus, sodass der Durchsatz in den Versuchen bis zu über 60 % gesteigert werden konnte. Die absoluten Foliendickenschwankungen nehmen dabei um ca. 3 % zu. Die Zunahme Foliendickenschwankung kann möglicherweise auf die Faltenbildung der Luftleitmembran zurückgeführt werden, da diese eine inhomogene Wärmeabfuhr verursacht. Der Einsatz der LFE führt zudem zu einer Zunahme der Bruchspannungen von ca. 5 % sowie einer Erhöhung der Schrumpfeigenschaften von ca. 10 %. Diese Erhöhung kann durch einen höheren Orientierungsgrad der Molekülketten, eingebracht durch eine frühzeitige Aufweitung der Folienblase innerhalb der LFE, begründet werden. Durch stärkere Molekülorientierungen nimmt zudem die Bruchdehnungen der hergestellten Blasfolie um ca. 5 % ab. Um den Einsatz der LFE zudem innerhalb der Produktion zu erleichtern, wurde zusätzlich ein Konzept für einen automatischen Betrieb der Luftführungseinheit entwickelt. So ermöglichen es Fuzzy-Logiken, die Membrangeometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter im Vergleich zu einer analytischen Modellbildung, um ca. 217 % genauer vorherzusagen. Mit einer mittleren Abweichung von 3,2 mm von den realen Einstellungen der LFE, kann das Modell für eine automatisierte Prozessregelung verwendet werden.

Insgesamt konnte eine Luftführungseinheit erfolgreich entwickelt werden. Jedoch ergeben sich für die Zukunft weitere Fragestellung, welche gelöst werden müssen, um einen erfolgreichen industriellen Einsatz der Entwicklung zu garantieren. So sollte eine Membran entwickelt werden, welche ein faltenfreies Einspannen ermöglicht, sodass bisherige erhöhte Dickenschwankungen vermieden werden. Ebenfalls sollte an dieser Stelle über eine strukturierte Membranoberfläche nachgedacht werden, um den Wärmeentzug weiter zu erhöhen. Neben einer optimierten Membran ist es für eine mögliche analytische Regelung zudem wichtig, die strömungsmechanischen Vorgänge im Strömungsspalt zwischen Blasfolie und Membran zu untersuchen (Luftgeschwindigkeit und statischer Druck), sodass auf diesen Erkenntnissen die analytische Lösung zur Einstellung der Membran verbessert werden kann. Alternativ ist es zielführend weitere Fuzzy-Logiken hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu optimieren oder auch evolutionäre Algorithmen bzw. neuronale Netze zur Regelung der Membrangeometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter einzusetzen.

In Zukunft sollte ebenfalls ein möglicher Scale-up der entwickelten Technologie auf einer industriellen Blasfolienanlage durchgeführt werden, um das erwähnte Potential zu evaluieren. Die meisten Industrieanlagen verwenden bereits heute interne Blasenkühlungssysteme (IBC), die das Kühlpotential und damit die Leistung der Anlage verbessern. Durchsatzsteigerungen von bis zu 60% durch den Einsatz einer LFE sind in Kombination mit einer IBC nicht zu erwarten. Ein Scale-up scheint jedoch an dieser Stelle sehr vielversprechend zu sein, da bereits Durchsatzsteigerungen von bis zu 20 % einen klaren Wettbewerbsvorteil darstellen. Insbesondere kleinere Folienhersteller, deren Ausrüstung nicht dem neuesten Stand der Technik entspricht, können ihre bestehenden Anlagen einfach und schnell mit dieser Technologie nachrüsten. Auch die Größe der LFE lässt sich leicht skalieren, sodass diese etwa der Höhe der Frostlinie entsprechen sollte, um die gesamte Schlauchbildungszone zu umschließen. Für eine durchschnittliche Blasfolienanlage mit einem Düsendurchmesser von 300 mm ergibt sich daraus eine Höhe von ca. 1,2 m und eine Investition von ca. 15.000 €. Bei einer durchschnittlichen Steigerung der Produktionskapazität von ca. 10-20 % kann sich diese Investition schnell amortisieren.

15 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

15.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Zur Sicherstellung des Transfers der Forschungsergebnisse waren verschiedene Maßnahmen während der Laufzeit des Projekts und nach dessen Abschluss geplant. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Zeitraumen: Quartale 2, 5, 8 der Projektlaufzeit
<i>Während der Projektlaufzeit haben drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses stattgefunden (05.09.2018 - Teilnehmer: 13 / 28.06.2019 - Teilnehmer: 14, 26.05.2020 - Teilnehmer: 20). Der Dialog mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses auch außerhalb der stattgefundenen Treffen hat entscheidend zum Fortgang und Erfolg des Projektes beigetragen. Darüber hinaus haben Mitglieder das Projekt durch Bereitstellung von Materialien und der Diskussion der Ergebnisse unterstützt, ein optimales Projektergebnis zu erzielen.</i>	
Maßnahme: Fachbeiratsgruppe	Zeitraumen: Jährlich im November
<i>Innerhalb der Laufzeit des Forschungsprojektes haben zwei Sitzungen der Fachbeiratsgruppen des IKV stattgefunden (06.11.2018 und 04-05.11.2019). Bei der FBG 2018 wurde das Forschungsvorhaben den Fachbeiratsgruppen „Extrusion“ (Teilnehmer: 25) in Form eines Vortrages vorgestellt. Bei der FBG 2019 (Teilnehmer: 47) wurde das Projekt in den Pausen mit Industrievertretern diskutiert.</i>	
Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Zeitraumen: Kontinuierlich während und nach der Projektlaufzeit
<i>Innerhalb des Projektzeitraumes konnte durch den Austausch mit verschiedenen Unternehmen aus der Folienindustrie bei der jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppe Extrusion (2018,2019) des IKV in Aachen sowie bei der Folienkonferenz des IKV im November 2018 in Aachen, bereits viele Fragen, Anregungen und erste Ergebnisse ausgiebig diskutiert werden. Hierbei konnten die Technologie und die erzielten Ergebnisse vielen Unternehmen vorgestellt und erste Ansätze ein Nachfolge-Forschungsvorhabens „adaptiver Kühlring II“ generiert werden.</i>	

Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	Zeitraumen: Zwischenergebnisse nach einem Jahr und Abschlussveröffentlichung nach Projektende
<i>Durch Publikationen in Fachzeitschriften wurden die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden in Form von Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften einem breiten Publikum vorgestellt:</i> HOPMANN, CH.; KRAUS, L.: Mehr Effizienz durch Flexibilität. <i>Extrusion</i> 24 (2018) 8, S. 36-40 HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.: Flexible Luftführungseinheit für mehr Massedurchsatz in der Blasfolienextrusion. <i>Extrusion</i> 26 (2020) 2, S. 32-36 HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.; GRÜBER, D.: Investigations of film thickness variations in blown film extrusion when using air guiding systems. <i>Journal of Plastic Film & Sheeting</i> 36 (2020) HOPMANN, CH., KRAUS, L., FACKLAM, M.: Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion. <i>Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kunststofftechnik (WAK)</i> 16 (2020) (angenommen) HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.: Kühlluft flexibel führen. <i>Kunststoffe</i> 110 (2020) 9	
Maßnahme: Hinweise in der Fachpresse	Zeitraumen: Kontinuierlich während der Laufzeit
<i>Neueste Erkenntnisse des Projektes sind durch Pressemitteilungen in Fachzeitschriften, bzw. online veröffentlicht worden (u.a.):</i> KM – Kunststoff: Magazin: https://www.kunststoff-magazin.de/extrusion/mehr-power-in-der-blasfolienextrusion---adaptiver-kuehling-fuer-mehr-durchsatz-und-weniger-ruestaufwand.htm K-Zeitung Online: https://www.k-zeitung.de/blasfolien-mehr-durchsatz-und-qualitaet/ Kunststoffe: https://kunststoffe-live.censhare.de/news/markt-und-wirtschaft/artikel/es-ist-angerichtet-9966746.html	

Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen	Zeitraumen: Während der Laufzeit / nach Abschluss
<i>Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind auf nationalen Fachtagungen und Konferenzen vorgestellt worden:</i> HOPMANN, CH.; KRAUS, L.: Adaptiv verstellbarer Kamin für mehr Produktivität in der Blasfolienextrusion. In: <i>IKV Fachtagung: Folienkonferenz 2018</i>	
Maßnahme: Richtlinienarbeit	Zeitraumen: Während der Laufzeit / nach Abschluss
<i>Durch projektbegleitende Diskussionen in der Fachwelt konnte ein breites Interessentenspektrum angesprochen und Ideen und Anregungen zum Thema gesammelt werden.</i>	
Maßnahme: Forschungsbericht	Zeitraumen: 1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Die Ergebnisse sind in zwei Zwischenberichten sowie in dem vorliegenden Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben zusammengefasst. Dieser Forschungsbericht steht interessierten Unternehmen zur Verfügung wodurch die erzielten Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich sind.</i>	
Maßnahme: Beratung von Unternehmen	Zeitraumen: Während der Laufzeit / nach Abschluss
<i>Während und nach der Projektlaufzeit des Forschungsvorhabens sind drei Unternehmen mit konkreten Fragestellungen hinsichtlich der Übertragung der Ergebnisse auf Ihre Materialien als auch hinsichtlich eines Scale-Ups der entwickelten Technologie auf das Forschungsinstitut zugegangen. Die erzielten Ergebnisse standen dabei als Basis für eine Beratung und Diskussion zur Verfügung.</i>	
Maßnahme: Durchführung von Testreihen am IKV	Zeitraumen: Nach Abschluss
<i>Unternehmen, die auf Basis der Ergebnisse das neuentwickelte Verfahren für eigene Anwendungen evaluieren möchten, ohne die komplette Anlagentechnik zu beschaffen, haben die Möglichkeit, das am IKV vorhandene Equipment zur Durchführung von Testreihen für Vorserienanwendungen zu nutzen. Somit haben die Unternehmen die Möglichkeit das Potential</i>	

des adaptiven Kühlrings für Ihre Materialien zu testen. Eine Firma hat diese Technologie zudem bereits erfolgreich am IKV getestet.

Maßnahme:

Akademische Lehre / Personaltransfer

Zeitraumen:

Während der Laufzeit / nach Abschluss

Einige der Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurden, sind durch die Unterstützung von Studenten entstanden. So konnten mehrere wissenschaftliche Arbeiten durch Studenten angefertigt werden. Darüber hinaus sind die erzielten Ergebnisse in die Ausbildung junger Ingenieure eingeflossen, sodass die Studenten das erarbeitete Wissen später als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen können.

Forschungslabor

KLEIN, D.: *Untersuchung der Wechselwirkung zwischen einem adaptiven Kühlring und der Umgebungsluft in der Blasfolienextrusion.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichtes Forschungslabor 2020 – Betreuer: L. Kraus

Bachelorarbeit

VOSSEL, T.: *Weiterentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2019 – Betreuer: L. Kraus

VÖLKEL, L.: *Beeinflussung des Wärmeübergangs durch strukturierte Gussmembranen eines adaptiven Luftführungssystems in der Blasfolienextrusion.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus

TASSLER, F.: *Einfluss eines adaptiven Kühlrings auf den Massedurchsatz und die Folieneigenschaften in der Blasfolienextrusion.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus

Masterarbeit

GLADBACH, P. W.: *Prototypenentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2018 – Betreuer: L. Kraus

GRÜBER, D.: *Entwicklung eines Regelungskonzeptes für den Einsatz eines adaptiven Kühlrings in der Blasfolienextrusion.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus

Maßnahme:

Dissertation

Zeitraumen:

Nach Abschluss des Forschungsvorhabens

Zusätzlich besteht für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstelle die Möglichkeit zur Promotion auf dem beantragten Forschungsthema.

Angestrebte Promotion des Herrn Lars Kraus, M. Sc. im 2.Quartal 2021

15.2 Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes

Innerhalb der drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, der Darstellung der Ergebnisse auf den IKV-Fachbeiratsgruppensitzungen sowie durch direkten Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft war es möglich, den Projektfortschritt und die Projektergebnisse kontinuierlich und direkt Vertretern interessierter Industrieunternehmen zu kommunizieren und zu diskutieren. Durch Hinweise in der Fachpresse, wissenschaftliche Publikationen in Form von Veröffentlichungen, den Forschungsbericht sowie durch Vorträge konnte zusätzlich ein breites Fachpublikum angesprochen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind darüber hinaus in die Lehre eingeflossen, um angehenden Ingenieuren potenzielle Möglichkeiten neuer Technologien und Verfahren vorzustellen. Sowohl in Lehrveranstaltungen als auch studentischen Arbeiten konnten sich die Studierenden umfassend mit der Thematik vertraut machen und ihre ingenieurtechnischen Fähigkeiten vertiefen.

Mit dem breitgefächerten Transferkonzept konnte somit das Ziel erreicht werden, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse einem breiten industriellen Nutzerkreis vorzustellen und als Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten zur Verfügung zu stellen. In Zukunft werden darüber hinaus die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens die Grundlage für bilateraler Industrieprojekte oder Beratungen zur Optimierung bestehender Blasfolienanlagen darstellen.

Die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes ist somit gegeben.

16 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU

16.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Nach Abschluss des Forschungsvorhabens werden interessierte Unternehmen anhand des Abschlussberichts, Veröffentlichungen und Präsentationen über die erzielten Erkenntnisse detailliert informiert, sodass diese das generierte Wissen in ihre eigenen Entwicklungsprozesse einbeziehen können. Dabei besteht zusätzlich die Möglichkeit, in ergänzenden bilateralen Projekten z. B. im ZIM-Programm mit der Forschungsstelle eine konkrete Umsetzung zu erarbeiten. Eine mögliche Fragestellung stellen Versuchsreihen mit dem Einsatz einer internen Blasenkühlung (IBC) dar, um das Potential der Entwicklung auch an hoch modernen Extrusionsanlagen abschätzen zu können und so einen erfolgreichen industriellen Transfer der Technologie ermöglichen. Die große Bandbreite an möglichen Anwendungen und Produkten für die verschiedensten Bereiche, das große Potenzial zur Durchsatzsteigerung und die geringen Investitionskosten der entwickelten Luftführungseinheit lassen eine Umsetzung in weitere konkrete Produkte innerhalb der nächsten fünf Jahre nach Projektabschluss erwarten.

16.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Durch die Entwicklung einer konturnahen Kühlung von Blasfolien wurde eine neue Möglichkeit zur Produktivitätssteigerung in der Blasfolienextrusion geschaffen, die für die Verarbeiter zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit ihres Prozesses genutzt werden kann, da sich durch den höheren Wärmeentzug aufgrund der adaptiven sowie flexiblen Luftführungseinheit zum einen für alle Materialien signifikante Massedurchsatzsteigerungen ergaben und zum anderen ein signifikanter Anstieg der mechanischen Eigenschaften erzielt werden konnte. Durch diese Zunahmen, sowohl des Massedurchsatzes als auch der Mechanik, lassen sich zudem CO₂-neutralere Folien als auch Downgauging-Ansätze (siehe Kapitel 17.2) realisieren.

Die erzielten Forschungsergebnisse können in der gesamten Blasfolienextrusionsbranche genutzt werden. Neben den kmU-lastigen Extrusionsbetrieben profitiert auch der durch kmU geprägte Werkzeugbau, der die neue Technologie umsetzen und vertreiben kann. Somit können die Ergebnisse branchenübergreifend von einer großen Anzahl vom kmU genutzt werden.

17 ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

17.1 Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal

Im Vorhaben wurden folgende Geräte beschafft:

- Kamin mit adaptiv veränderbaren Luftführungselementen

Der beschaffte Kamin, bzw. die Luftführungseinheit ermöglichte im Gegensatz zu bisher bestehenden Konzepten eine flexible Anpassung der Geometrie an die Blasfolie, sodass eine Effizienzsteigerung bei der Herstellung von Blasfolien möglich war. Die Beschaffung dieser Luftführungseinheit wurde in den Arbeitspaketen zwei bis sechs dazu verwendet, das Potenzial der Kühltechnologie zu bestimmen, die Zusammenhänge zwischen der neuartigen Luftführung und dem erzielbaren Massedurchsatz sowie den resultierenden Folieneigenschaften zu ermitteln und nötige Verbesserungspotenziale für einen Einsatz im Produktionsumfeld zu identifizieren. Daneben diente die LFE dazu, Bedien- und Regelungskonzepte für die Verwendung der Technologie im industriellen Maßstab zu entwickeln und zu überprüfen. Das Gerät war in der Form noch nicht am IKV vorhanden und waren für eine erfolgreiche Bearbeitung des Projektes notwendig.

Zudem war laut Antrag eine weitere Beschaffung geplant:

- Kamin mit austauschbaren Luftführungselementen

Das Ziel des ersten Arbeitspaketes „Ermittlung geeigneter Geometrien der luftführenden Membran“ war es, geeignete Geometrien für die luftführende Membran bei verschiedenen Prozesszuständen und verarbeiteten Kunststoffen zu ermitteln. Nach der optischen Vermessung der minimalen und maximalen Foliengeometrien sollte nach Antrag die genaue Ausgestaltung der flexiblen luftführenden Membran durch die Verwendung austauschbarer, starrer Luftführungselemente erfolgen. Anhand der bekannten Blasengeometrien für die definierten Prozesszustände sollten die ringförmigen Luftführungselemente, beginnend vom Düsenaustritt, aufgesetzt werden, um schmalen Spalt zwischen Luftführung und Folienkontur erzeugen. Es sollten sukzessiv weitere Führungselemente aufgesetzt und die Reaktion der Folienblase dokumentiert werden. Dies sollte die Untersuchung der Beeinflussung der Folienblase durch die Luftführung und die Ermittlung der Prozessstabilität für die jeweilige Kombination aus Blasengeometrie und Luftführung ermöglichen. Nach Rücksprache mit dem PbA war dieses im Antrag geplante Vorgehen jedoch nicht zielführend, da die ermittelten Geometrien keinen direkten Transfer auf ein flexibles System zulassen. Der PbA war sich daher einig, dass das gewählte Vorgehen der Verstellung der luftführenden Membran mittels Druckschrauben zielführender war, sodass von dieser Beschaffung abgesehen wurde.

Der Personaleinsatz umfasste 24 Mannmonate eines wissenschaftlichen Mitarbeiters mit abgeschlossener wissenschaftlicher Ausbildung, 48 Mannmonate studentische Mitarbeiter und einen Mannmonat eines Angestellten mit abgeschlossener technischer Ausbildung gemäß der Planung im Antrag. Der wissenschaftliche Mitarbeiter war erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Projekts wissenschaftliche Arbeiten durchführten. Darüber hinaus hat ein Techniker die Forschungsarbeiten bei der Installation und Bedienung der Anlagentechnik unterstützt. Dieser Personeneinsatz war für den Projekterfolg zwingend erforderlich.

17.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie aus den Kapiteln 6-13 hervorgeht, sind im Rahmen des Forschungsprojekts umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Notwendige Anpassungen in den Arbeitspaketen (AP1) haben nicht zu einer Reduktion des Arbeitsumfangs geführt, sondern es wurden einzelne Maßnahmen durch geeignetere Maßnahmen ersetzt, weshalb der Umfang der Forschungsarbeiten sich nicht verändert hat.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass in diesem Forschungsvorhaben eine konventionelle Blasfolienextrusionsanlage um eine adaptive sowie flexible Luftführungseinheit erweitert konnte. Durch den Einsatz dieser Luftführungseinheit konnten für alle untersuchten Materialien (PE-LD, PE-LLD, PE-HD, PP) signifikante Massedurchsatzsteigerungen von durchschnittlich über 30 % erreicht werden. Diese Durchsatzsteigerungen erlauben neben einem erhöhten Produktionsvolumen zudem die Herstellung Kohlenstoffdioxid (CO_2) neutralerer Verpackungsprodukte: Der am häufigsten verwendete Kunststoff für Blasfolien ist Polyethylen (PE), welches im Vergleich zu anderen Kunststoffen eine besonders hohe spezifische Wärmekapazität von ca. $2,1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ aufweist. Bei einer beispielhaften Verarbeitungstemperatur von ca. 180°C muss beim Abkühlen der PE-Folie auf eine Temperatur von 100°C am Ende der Schlauchbildungszone ca. 168 kJ/kg an Wärme abgeführt werden. Bei einer mittelgroßen Blasfolienextrusionslinie mit einem Massedurchsatz von 700 kg/h wird eine thermische Kühlleistung von ca. 33 kW benötigt. In der Praxis werden für Extrusionslinien bei solchen Massedurchsätzen Kühlaggregate mit einer Kühlleistung von 100 kW eingesetzt, die in Summe (Kühlring und Innenkühlung) ca. $7.500 \text{ m}^3/\text{h}$ 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 7.200 Betriebsstunden pro Jahr eine Menge

an elektrischer Energie von 25.000 kWh (entsprechend ca. 15 t CO₂) pro Blasfolienanlage eingespart werden kann. Pro Kilogramm produzierter Blasfolie bedeutet dies nur eine geringe Einsparung von 2,97 g CO₂. Allerdings werden allein in Deutschland ca. 2,28 Millionen Tonnen Kunststoff zu Folien für Verpackungsanwendungen verarbeitet, sodass sich ein branchenweites CO₂-Einsparpotenzial von mehreren tausend Tonnen ergibt [HKF20c]. Zudem lassen sich durch die entwickelte Technologie Downgauging-Ansätze verfolgen. Bei flexiblen Verpackungen kann der Ressourceneinsatz beispielsweise durch dünnere Folienlösungen (Downgauging) verringert werden, indem dickere, traditionelle Folie durch eine leistungsfähigere, dünnere Folie ersetzt werden. Da in dem Forschungsvorhaben gezeigt werden konnte, dass es neben Steigerungen des Massedurchsatzes ebenfalls zu einem Anstieg der mechanischen Folieneigenschaften kam, können dünnere Folie bei identischen mechanischen Eigenschaften hergestellt werden.

Insgesamt wurde bewiesen, dass durch den Einsatz einer adaptiven sowie flexiblen Luftführungseinheit eine kostengünstige Maßnahme für eine Durchsatzsteigerung gegeben ist. Das in dem Vorhaben erarbeitete Prozesswissen bildet dabei eine wichtige Grundlage dafür, dass Blasfolienbetriebe die Technologie schnell und kosteneffizient in ihrem Produktionsbetrieb übernehmen können. Jedoch führt der Einsatz einer LFE zu einer Erhöhung der Foliendickenschwankung, was möglicherweise durch Faltenwurf der Membran verursacht wird. Daher sind weitere Untersuchungen zur Weiterentwicklung des Prozesses notwendig, um das Potenzial des Verfahrens vollständig zu nutzen. Insgesamt konnten jedoch die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit bestätigt werden.

18 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

18.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BUR	Blow-up- ratio (Aufblasverhältnis)
IBC	Internal bubble cooling
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
MFR	Melt Flow Rate
LFE	Luftführungseinheit
PE-LD	Low density Polyethylen
PE-LLD	Linear low density Polyethylen
PE-HD	High density Polyethylen
PP	Polypropylen
TUR	Take-up ratio (Abzugsverhältnis)

18.2 Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	Wärmeübergangskoeffizient
B	$[\text{mm}]$	Breite
Bi	$[-]$	Biot-Zahl
c_p	$[\text{J}/\text{K}]$	Spezifische Wärmekapazität
d	$[\text{mm}]$	Dicke
D	$[\text{mm}]$	Durchmesser
E	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-3}]$	Spezifische Energie
L	$[\text{m}]$	Länge
L_0	$[\text{m}]$	Anfangslänge
$\dot{m}_A$	$[\text{kg}/\text{h}]$	Massendurchsatz der Außenschicht
P	$[\%]$	Gebläseleistung
p	$[\text{bar}]$	Statischer Druck
Pr	$[-]$	Prandl-Zahl
$\dot{Q}$	$[\text{W}/\text{s}]$	Wärmestrom
Re	$[-]$	Reynolds-Zahl
S	$[\%]$	Schrumpf
T	$[\text{°C}]$	Temperatur Temperaturdifferenz

ΔT	[°C]	
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$\dot{V}$	[m³/s]	Volumenstrom
η	[Pa·s]	Viskosität
λ	[W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[kg/m³]	Dichte

19 LITERATUR

- [BR12] BACKMANN, M.; RÜBBELKE, I.: Blasfolienextrusion. In: *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*, München: Carl Hanser Verlag 2012
- [BR13] BACKMANN, M.; RÜBBELKE, I.: Blasfolienextrusion. In: LIMPER, A., (Hrsg.): *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*, München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [BS16] BAEHR, H. D.; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2016
- [Bus10] BUSSMANN, M.: *Ein kalibrierbares integratives Modell zur Beschreibung des Schlauchbildungsprozesses in der Blasfolienproduktion*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2010
- [CC90] CAO, B.; CAMPBELL, G.A.: Viscoplastic-Elastic Modeling of Tubular Blown Film Processing. *AIChE Journal* 36 (1990) 3, S. 420-430
- [Gla18] GLADBACH, P.: *Prototypenentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2018 – Betreuer: L. Kraus
- [Hen18] HENNIGS, M.: *Kontaktkühlung in der Blasfolienproduktion*, RWTH Aachen, Dissertation, 2018, ISBN: 978-3-95886-250-0
- [HK18] HOPMANN, CH., KRAUS, L.: Mehr Effizienz durch Flexibilität. *Extrusion* 24 (2018) 8, S. 36-40
- [HKF20a] HOPMANN, CH., KRAUS, L., FACKLAM, M.: Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion. *Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kunststofftechnik (WAK)* 16 (2020) (angenommen)
- [HKF20b] HOPMANN, CH., KRAUS, L., FACKLAM, M.: Flexible Luftführungseinheit für mehr Massedurchsatz in der Blasfolienextrusion. *Extrusion* 26 (2020) 2, S. 32-36
- [HKF20c] HOPMANN, CH., KRAUS, L., FACKLAM, M.: Luft flexibel führen. *Kunststoffe* 110 (2020) 9, S.
- [HKFG20] HOPMANN, CH., KRAUS, L., FACKLAM, M., GRÜBER D.: Investigations of film thickness variations in blown film extrusion when using air guiding systems. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 36 (2020) DOI: 10.1177/8756087920932952
- [Jan15] JANAS, M L.: *Eine neuartige numerische Methode zur Optimierung und Intensivierung der Blasfolienkühlung*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2015
- [Kle11] KLEPPMANN, W.: *Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren*. Carl Hanser Verlag, München, 2011

- [Kne15] KNEER, R.: *Wärme- und Stoffübertragung I/II*. RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, Aachen, 2015
- [Lim13] LIMPER, A.: *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*. München, Carl Hanser Verlag, 2013
- [Lor16] LORENZ, N.: *Untersuchung der Kühlwirkung einer Kontaktkühlung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2016 – Betreuer: M. Hennigs
- [LT85] LUO, X-L.; TANNER, R.I.: A Computer Study of Film. *Polymer Engineering and Science* 25 (1985) 10, S. 620-629
- [MP75] MENGES, G.; PREDÖHL, W.O.: Certain aspects of film blowing of low-density polyethylene. *Polymer Engineering & Science* 15 (1975) 5, S. 394-399
- [MH+11] MENGES, G.; HABERSTROH, E.; MICHAELI, W.; SCHMACHTENBERG, E.: *MENGES Werkstoffkunde der Kunststoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 2011
- [Mic09] MICHAELI, W.: *Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk*. München: Carl Hanser Verlag, 2009
- [Nen06] NENTWIG, J.: *Kunststoff-Folien: Herstellung – Eigenschaften – Anwendung*, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006, ISBN: 9783446403901
- [NN08] N.N.: EP1982819A2: *Verfahren und Vorrichtung zur Kühlung eines Folien-schlauchs bei der Blasfolienherstellung*. Patentschrift, Europäisches Patentamt, 17.04.2008
- [NN13] N.N., VDI (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2013, ISBN: 9783642199806
- [NN15] N. N.: DE102013016898 A1: *Innenkühlkörper für eine Blasfolienanlage, Blasfolienanlage mit einem solchen Innenkörper sowie Verfahren zum Betreiben einer solchen Blasfolienanlage*. Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, 2015
- [NN16] N. N.: DE102014017556 A1: *Innenkühlturm für Folienblasanlagen*. Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, 2016
- [NN20] WALLER, P.: Causes and Remedies to 7 Instability Patterns in Blown Film Extrusion
URL: https://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/waller_abstract.pdf, 01.07.2020
- [NN65] N.N.: US3176814: *Resilient lock for clutch adjusting device*. Patentschrift, United States Patent Office, 06.04.1965
- [NN70] N.N.: US3507006: *Apparatus für producing thermoplastic film*. Patentschrift, United States Patent Office, 21.04.1970

- [NN74] N.N.: DE2256942: *Vorrichtung zur Herstellung von Blasfolien*. Patentschrift, Deutsches Patentamt, 21.09.1974
- [NN82] N.N.: EP0078738B1: *Apparatus for cooling a plastic tabular film, and method*. Patentschrift, Europäisches Patentamt, 26.10.1982
- [NN86] N.N.: EP0121158B1: *Kühlvorrichtung für aus einem Folienblaskopf extrudierte Kunststoffschlauchfolien*. Patentschrift, Europäisches Patentamt, 17.12.1986
- [NN89] N.N.: US4826414: *Air rings for production of blown plastic film*. Patentschrift, United States Patent and Trademark Office, 1989
- [NN94] N.N.: EP0285368B1: *Bubble forming and stabilising device for use in a continuous extrusion process for making a blown film*. Patentschrift, Europäisches Patentamt, 23.02.1994
- [OS10] OVERBECK, J; SCHIPPERS, S.: *Vielschichtig aus der Krise*. Kunststoffe 100 (2010), S. 58-64
- [Pre79] PREDÖHL, W.: *Technologie extrudierter Kunststofffolien*. Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1979
- [Rah10] RAHM, W.: *Blasfolienextrusion. Extrusion thermoplastischer Kunststoffe*. Düsseldorf, 2010
- [Sch10] SCHRÖDER, W.: *Fluidmechanik – Aachener Beiträge zur Strömungsmechanik*, Aachen: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, 2010, ISBN: 386130371X
- [Sch15] SCHÜTZ, K.: *Untersuchung der Kühlwirkung einer Kontaktkühlung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2015 – Betreuer: M. Hennigs
- [Spi04] SPIRGATIS, J.: *Untersuchung des Einflusses des instationären konvektiven Wärmeübergangs bei der Folienherstellung auf die Folienqualität*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2010
- [SV00a] SIDIROPOULOS, V.; VLACHOPOULOS, J.: The Effects of Dual-Orifice Air-Ring Design on Blown Film Cooling. *Polymer Engineering and Science* 40 (2000) 7, S. 1611-1618
- [SV00b] SIDIROPOULOS, V.; VLACHOPOULOS, J.: An Investigation of Venturi and Coanda Effects in Blown Film Cooling. *International Polymer Processing* 15 (2000) 1, S. 40-45
- [SV05] SIDIROPOULOS, V.; VLACHOPOULOS, J.: Temperature Gradients in Blown Film Bubbles. *Advances in Polymer Technology* 24 (2005) 2, S. 83-90
- [Vei16] VEIT, D.: *Modellbildung und Simulation in der Kunststoff- und Textiltechnik*, Vorlesungsumdruck, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen, 2016

- [Vos19] VOSSEL, T.: *Weiterentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2019 – Betreuer: L. Kraus
- [Wag75] WAGNER, M.H.: Das Folienblasverfahren als rheologisch-thermodynamischer Prozeß. *Rheol. Acta* 15 (1975) 1, S. 40-51
- [WB07] WORTBERG, J; BUSSMANN, M.: *Vielseitige Verpackung*. Essener Unikante (2007) 31. S. 110-121
- [Wen11] WENIGMANN, S.: *Einsatz feuchter Luft zur Beeinflussung der Kühlleistung von Blasfolienextrusionsanlagen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2011 – ISBN: 3-86130-275-X
- [ZL07] ZHANG, Z.; LAFLEUR, P.G.: A Study of Heat Transfer in the Blown Film Process. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 23 (2007), S. 297-317
- [ZL08] ZHANG, Z.; LAFEUR, P.G.: *Investigation of LDPE Film Instability Indiced by Air Cooling*. *Polymer Engineering and Science* 10 (2008) 2, S. 1504-1510

20 ANHANG

20.1 Liste der Veröffentlichungen

HOPMANN, CH.; KRAUS, L.: Mehr Effizienz durch Flexibilität. *Extrusion* 24 (2018) 8, S. 36-40

HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.: Flexible Luftführungseinheit für mehr Massedurchsatz in der Blasfolienextrusion. *Extrusion* 26 (2020) 2, S. 32-36

HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.; DANIEL, G.: Investigations of film thickness variations in blown film extrusion when using air guiding systems. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 36 (2020)

HOPMANN, CH., KRAUS, L., FACKLAM, M.: Erhöhung der Kühlleistung durch den Einsatz einer flexiblen Luftführungseinheit unter Ausbildung des Venturi-Effekts bei der Blasfolienextrusion. *Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kunststofftechnik (WAK)* 16 (2020) (angenommen)

HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.: Kühlluft flexibel führen. *Kunststoffe* 110 (2020) 9

20.2 Liste der studentischen Arbeiten

GLADBACH, P. W.: *Prototypenentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2018 – Betreuer: L. Kraus

VOSSEL, T.: *Weiterentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2019 – Betreuer: L. Kraus

GRÜBER, D.: *Entwicklung eines Regelungskonzeptes für den Einsatz eines adaptiven Kühlrings in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus

TASSLER, F.: *Einfluss eines adaptiven Kühlrings auf den Massedurchsatz und die Folieneigenschaften in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus

20.2.1 Zusammenfassung der studentischen Arbeiten

GLADBACH, P. W.: *Prototypenentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2018 – Betreuer: L. Kraus:

In der Herstellung von Blasfolien besteht ein stetiges Interesse daran die Durchsätze bestehender Anlagen zu erhöhen, um eine hohe Effizienz des Produktionsverfahrens zu gewährleisten. Da der Massedurchsatz und somit die Produktivität einer Blasfolienanlage stark von der Höhe des Wärmeentzugs aus dem Folienschlauch abhängt, werden bestehende Kühlsysteme stetig weiterentwickelt und optimiert. Bei konventionellen Blasfolienanlagen wird die extrudierte

Blase üblicherweise konvektiv von innen und außen gekühlt. Ein wesentlicher Nachteil einer konvektiven Kühlung ist jedoch der geringe Wärmeübergangskoeffizient. Eine Verbesserung der Kühlleistung kann beispielsweise erreicht werden, indem der Kühlluftstrom an der Außenseite des extrudierten Schmelzeschlauchs mit höherer Geschwindigkeit geführt wird. Mit steigender Luftgeschwindigkeit sinkt der hydrodynamische Druck in unmittelbarer Nähe zur Blase, sodass eine stabile Blase trotz hoher Luftgeschwindigkeiten gewährleistet werden kann. Diese Umwandlung von Druck in Geschwindigkeit wird als sogenannter Venturi-Effekt bezeichnet. Der Venturi-Effekt kann beispielsweise durch Verwendung eines Doppellippenkühlrings und/oder eines Luftführungssystems ausgelöst werden. Luftführungssysteme führen dabei den austretenden Luftstrom eng an der Folienaußenseite entlang. Der Nachteil solcher bestehender Systeme ist die fehlende Flexibilität für eine konturnahe Anpassung des Führungssystems an die Blasenform.

Durch einen stetig steigenden Individualisierungsgrad kommt es jedoch immer häufiger zu Material- und Prozesswechseln. Bei einem Materialwechsel oder einer Änderung der Prozesseinstellung während des laufenden Prozesses müsste allerdings durch die dadurch geänderte Blasen geometrie das Luftführungssystem gewechselt werden. Um einen Wechsel des Luftführungsrings durchführen zu können, muss der Extrusionsprozess angehalten und nach dem Wechsel wieder gestartet werden. Durch ein adaptiv einstellbares Luftführungssystem könnten diese Stand- und Umbauzeiten eingespart werden.

In dieser Arbeit wird daher ein Prototyp für ein adaptives Luftführungssystem für eine Blasfolienextrusionsanlage am IKV entwickelt. Das Ziel ist hierbei die Machbarkeit eines adaptiven Luftführungssystems nachzuweisen und dieses in die Blasfolienproduktion zu integrieren. Im ersten Schritt werden ohne Luftführungssysteme optische Bilduntersuchungen durchgeführt, um die Geometrie der extrudierten Blase in Abhängigkeit unterschiedlicher Prozessparameter zu ermitteln. Anhand der ermittelten Geometrien wird anschließend ein Gestell konstruiert und gefertigt, das adaptiv während der laufenden Extrusion an die Blasenkontur angepasst werden kann. Anschließend werden mit dem entwickelten Prototyp Validierungsversuche bezüglich Massedurchsatzsteigerungen durchgeführt. Dabei ist vor allem eine Einschätzung der Effizienzsteigerung durch Verwendung eines solch adaptiven Luftführungssystems notwendig.

Die Versuchsreihen zeigen, dass durch den Einsatz eines adaptiven Luftführungssystems die Folientemperatur in großem Maße gesenkt werden kann (Bild 2.1). Mit der Anpassung der luftführenden Geometrie kann eine Senkung der Folientemperatur erreicht werden. Dadurch kann bei gleicher Frostlinienhöhe eine Durchsatzsteigerung von bis zu 27% von ungefähr 22 kg/h zu ungefähr 28 kg/h erzielt werden. Durch eine Änderung des Aufblas- und Abzugsverhältnisses verändert sich die Geometrie der Folienblase. Mit einer Anpassung der Kontur des adaptiven Luftführungssystems an die Folienblase kann auf diese Prozessänderungen reagiert werden und

die Kühlleistung an der Außenseite der Folienblase trotz veränderter Blasengeometrie verbessert werden. Allerdings kann bei der Verwendung dieser Entwicklung eine Senkung der Folienqualität beobachtet werden. Es kommt zu einer inhomogenen Luftgeschwindigkeitsverteilung, sodass an den Stellen mit geringerer Geschwindigkeit langsamer gekühlt und die Folie stärker verstreckt wird. Dadurch kommt es zu Dickenschwankungen in radialer Richtung.

VOSSEL, T.: *Weiterentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2019 – Betreuer: L. Kraus:

Die Industrie der Blasfolienextrusion ist seit jeher bestrebt die Massedurchsätze bestehender Extrusionsanlagen zu erhöhen, um die Effizienz ihrer Produktion zu steigern. Der Massedurchsatz ist unmittelbar von der Abkühlrate des extrudierten Folienschlauchs abhängig. Die Kühlung erfolgt meist konvektiv, sodass zur Steigerung der Kühlleistung die Luftgeschwindigkeit der Anströmung erhöht werden kann. Diese Steigerung führt allerdings ab einem gewissen Punkt zu einer Instabilität der Folienblase und des Prozesses.

Bei starren Luftführungssystemen kann durch eine Querschnittsverengung mit Hilfe des Venturi-Effekts die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Blase erhöht und der statische Druck gesenkt werden, sodass höhere Luftgeschwindigkeiten bei einer erhöhten Folienblasenstabilität möglich sind. Durch steigende Individualisierung und damit kleinerer Losgrößen ändert sich die Geometrie der Folienblase häufig, sodass bei einer flexiblen Produktion in Abhängigkeit des Produktes unterschiedliche Luftführungssysteme verwendet werden. Dies führt zu teuren Standzeiten der Anlage, da der Prozess zum Wechsel des starren Luftführungssystems gestoppt werden muss. Solche Stand- und Umbauzeiten können durch die Verwendung eines adaptiven Luftführungssystems, welches eine luftführende flexible Membran konturnah an die Folienblase anpassen kann, verhindert werden.

Zu diesem Ziel wurde ein erster Prototyp für ein adaptives Luftführungssystem am IKV entwickelt. Dieser Prototyp weist allerdings einige Probleme im Bereich der Folienqualität und der Luftströmung auf. Das Ziel dieser Arbeit ist demnach die Optimierung des bestehenden Prototyps und dessen Validierung in Versuchsreihen. Dazu werden in einem ersten Schritt verschiedene Konzepte evaluiert. Im zweiten Schritt wird ein Konzept ausgewählt und ein neuer Prototyp konstruiert und gefertigt. Im dritten Schritt erfolgt dessen Validierung an einer Blasfolienextrusionslinie am IKV hinsichtlich den Zielen Massedurchsatzsteigerung, Dickenschwankungsreduktion, Transparenz und Luftströmungsoptimierung.

Durch die Verwendung einer luftführenden Membran aus einem transparenten TPU, einer Optimierung der Verstellelemente und dem Einsatz einer Irisblende ist es möglich die genannten Ziele zu erreichen. Der Massedurchsatz konnte um etwa 32 % gesteigert, die Dickenschwankung um etwa 3 % verringert und die Luftströmung im Vergleich zum ersten Prototyp optimiert

werden. Die Transparenz des Prototyps ermöglicht die optische Analyse des Luftspalts zwischen luftführender Membran und der Folienblase.

GRÜBER, D.: *Entwicklung eines Regelungskonzeptes für den Einsatz eines adaptiven Kühlrings in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus:

Zur Steigerung der Kühlleistung in der Blasfolienextrusion haben sich Luftführungssysteme etabliert, welche in starrer oder flexibler Bauweise ausgeführt sind. Starre Systeme sind jedoch nur für eine prozesspunktabhängige Foliengeometrie optimiert, sodass bei einer Produktänderung die Produktion aufgrund des Austausches eines entsprechenden Luftführungssystems unterbrochen werden muss, was zu teuren Anlagenstillständen führt. Am Markt verfügbare flexible Systeme sind zudem nur begrenzt durch ihre luftführenden Elemente an die Blasfolie anpassbar, sodass der gewünschte Venturi-Effekt nicht für alle Foliengeometrien in der Schlauchbildungszone hervorgerufen werden kann.

Mit einer optimierten adaptiven LFE ist es möglich den Venturi-Effekt prozesspunktunabhängig durch eine im laufenden Betrieb an die Foliengeometrie anpassbare luftführende Membran hervorzurufen, wodurch sich der Massedurchsatz im Vergleich zum konventionellen Blasfolienprozess im Mittel um 33,8 % steigern lässt. Je nach Prozesspunkt kann jedoch eine Steigerung von bis zu 62 % erzielt werden. Für maximale Durchsätze ist die Massetemperatur sowie die Foliendicke auf einem niedrigen und das Aufblasverhältnis sowie die Gebläseleistung auf einem hohen Niveau einzustellen. Durch den Einsatz der LFE kommt es zu einer absoluten Zunahme der Foliendickenschwankung von 4,3 %. Niedrige Foliendicken und Gebläseleistungen verbessern die Foliendickenschwankungen jedoch signifikant. Die Versuche zeigen, dass es durch die Verwendung einer LFE zu einem Anstieg des Flatterns der Folie innerhalb der Schlauchbildungszone kommen kann. Eine optische Erfassung der Schlauchbildungszone zeigt, dass eine erhöhte Massetemperatur, Foliendicke sowie Gebläseleistung bei einem geringen Aufblasverhältnis zu einem Anstieg des Folienflatterns führen. Eine Korrelation zwischen Folienflattern und der Dickenschwankung kann jedoch nicht nachgewiesen werden. Für einen möglichen Einsatz dieser Entwicklung in der Industrie ist es zudem wichtig, mögliche Regelstrategien für eine automatisierte Einstellung der LFE in Abhängigkeit der Prozessparameter zu entwickeln. Eine mit den erhobenen Versuchsdaten entwickelte analytische Prozessmodellierung lässt nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und der Einstellung der LFE zu, weshalb auf eine Modellierung mittels Fuzzy-Logik zurückgegriffen wird, auf deren Grundlage eine sehr genaue Regelung der LFE ermöglicht wird.