

Schlussbericht vom 28.10.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 21086 N

Thema

Optimierung der Kühlstrecke in der Blasfolienextrusion durch simulationsgestützte Entwicklung einer flexibel verstellbaren Düsenlippe unter Berücksichtigung des Coanda-Effekts

Berichtszeitraum

01.06.2020 bis 31.05.2022

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung(en)

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

Gefördert durch:

4 KURZZUSAMMENFASSUNG

Blasfolienhersteller sind aufgrund des steigenden Kostendrucks bestrebt, die Produktion möglichst effizient zu gestalten. Die Effizienz wird dabei vor allem durch die Anlagenproduktivität bestimmt. Diese wird durch den maximalen Massedurchsatz bestimmt, der wiederum dadurch bestimmt wird, wie schnell die Wärme aus dem Extrudat abgeführt werden kann. Eine Verbesserung der Folienkühlung ist durch ein optimales Düsenlippendesign und die richtige Einstellung des Kühlrings abhängig von der Prozessführung möglich.

Ziel des Forschungsvorhabens war, die Massendurchsätze bei der Blasfolienextrusion durch eine Verbesserung etablierter Doppellippenkühlringe hinsichtlich der generierten Strömungsverhältnisse zu steigern. Hierbei sollte insbesondere der Einfluss des Düsenlippendesigns auf eine Massedurchsatzsteigerung als auch die Beeinflussung der Folieneigenschaften untersucht werden. Dafür wurde eine simulationsgestützte Methodik zur strömungstechnisch optimierten Auslegung von Doppellippenkühlringen entwickelt. Mit dem Simulationsmodell kann die Kühlluftströmung und auftretende Strömungseffekte wie der Coanda-Effekt visualisiert werden. Dabei lassen sich Strömungsparameter und die Geometrie der Kühlringlippen variieren. Das Simulationsmodell erreichte im Abgleich mit Validierungsversuchen an der Blasfolienanlage des IKV eine gute Genauigkeit und ermöglichte die Auswahl einiger Lippengeometrie-kombinationen für die weiterführenden Untersuchungen. Durch den Einsatz von Nebel in den Untersuchungen wurde eine Möglichkeit gefunden, die Strömung zu charakterisieren, die eine Vorhersage über die Wärmeabfuhr erlaubt und die Simulationen anhand der Strömungsfläche validiert. In einem weiteren Schritt wurden die Einflüsse typischer Prozessparameter und der unterschiedlichen Lippengeometrien auf die Folieneigenschaften sowie auf den maximal erreichbaren Massedurchsatz untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozessparameter Gebläseleistung, BUR sowie Massetemperatur einen deutlich größeren Einfluss als die Lippengeometrie haben. Die Untersuchungen hinsichtlich einer idealen Lippengeometrie ergaben, dass eine parallele oder leicht zur Blase hingerrichtete Geometrie die besten Ergebnisse bezüglich Massestrom und Folieneigenschaften liefern. Dabei ist vor allem die Abhängigkeit einer Massedurchsatzsteigerung von der Blasenform eine wichtige Erkenntnis. Weiterhin sind starre Systeme wie ein Doppellippenkühlring für einen großen Bereich an Produkten entwickelt worden. Da für die bestmögliche Kühlung eine Anpassung der Düsenlippe notwendig wäre, wurde ebenfalls eine flexibel einstellbare Düsenlippe entwickelt und in Betrieb genommen. Diese besteht aus einer Bauweise mit drei übereinander angeordneten Irisblenden. Mit einer konturnahen Führung der Kühlluft konnte die Effizienz in Form einer Massedurchsatzsteigerung von 10% der Extrusionsanlage gesteigert werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

VORWORT UND DANK

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 21086 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurden von Lars Kraus, M. Sc. und Marius Stieglitz M. Sc., erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von Studien- und Diplomarbeiten niedergelegt. Eine Kurzfassung von jeder dieser Arbeiten befindet sich im Anhang. 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 BMWK und der AiF-Mitgliedsvereinigung „Kunststoffverarbeitung“ gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Kunststoffen, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben. Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe „Extrusion“, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	EINLEITUNG	4
3	STAND DER TECHNIK	5
3.1	Strömungsphänomene in der Folienherstellung	5
3.2	Kühlkonzepte in der Blasfolienextrusion	6
3.3	Simulative Untersuchung der Kühlluftströmung	8
3.3.1	Simulation eines Kühlrings von <i>Abdelmaksoud, Abdelsalam und Awad</i>	11
4	ZIEL UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN	13
5	VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN	14
5.1	Materialien	14
5.2	Anlagentechnik	14
5.2.1	Extruder	14
5.2.2	Werkzeug	14
5.2.3	Außenluftkühlung	15
5.2.4	Nebelmaschine	15
5.3	Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften.....	15
5.3.1	Bestimmung des Massedurchsatzes	15
5.3.2	Bestimmung der Foliendickenschwankung	16
5.3.3	Bestimmung der Breite der Kühlluftströmung	16
5.3.4	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften.....	17
5.3.5	Bestimmung der optischen Eigenschaften	18
6	AUFBAU EINES VERSUCHSTANDS ZUR KÜHLLUFTVOLUMENSTROMVISUALISIERUNG .	19
6.1	Nebelführungskonzept zur Visualisierung der Kühlluftströmung	19
6.2	Optische Vermessung und Fertigung verschiedener Blasgeometrien.....	20
6.3	Einhausung zur Abschirmung von Umgebungseinflüssen und zur Verbesserung der Bildverarbeitung.....	20
7	AUFBAU UND VALIDIERUNG EINES SIMULATIONSMODELLS ZUR STRÖMUNGSVISUALISIERUNG.....	21
8	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER AUF DIE NEBELFLÄCHE MIT ADDITIV GEFERTIGTER FOLIENBLASE	28
9	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER UND DER DÜSENLIPPENGEOMETRIE AUF DIE NEBELFLÄCHE SOWIE OPTISCHEN UND MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN	30
9.1	Einfluss der Prozessparameter.....	30
9.2	Einfluss der Düsenlippengeometrie	31

10	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER UND DER DÜSENLIPPENGEOMETRIE AUF DEN MAXIMALEN MASSEDURCHSATZ	33
10.1	Einfluss der Prozessparameter auf den Massedurchsatz.....	33
10.2	Einfluss der Lippengeometrie auf den Massedurchsatz	34
11	ENTWICKLUNG EINER FLEXIBEL EINSTELLBAREN DÜSENLIPPE	35
11.1	Konzepterarbeitung einer flexibel einstellbaren Düsenlippe.....	35
11.2	Untersuchungen zur Massedurchsatzsteigerung durch Einsatz der flexibel einstellbaren Düsenlippe.....	36
12	FAZIT UND AUSBLICK	38
13	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	40
13.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	40
13.2	Durchgeführte Transfermaßnahmen des Vorhabens:	40
13.3	Geplante Maßnahmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens:	42
13.4	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes.	43
14	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU	44
14.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	44
14.2	Wirtschaftlicher Nutzen.....	44
15	ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN.....	45
15.1	Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal	45
15.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	45
16	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	47
16.1	Abkürzungen	47
16.2	Formelzeichen und Indizes	47
17	LITERATUR.....	49
18	ANHANG.....	52
18.1	Liste der Veröffentlichungen.....	52
18.2	Liste der studentischen Arbeiten	52

1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Blasfolien, Kühlung, Massedurchsatz, Prozessoptimierung

Schlagworte: Kühlring, Strömung, Schlauchbildungszone

Blasfolienhersteller sind aufgrund des steigenden Kostendrucks bestrebt, die Produktion möglichst effizient zu gestalten. Die Effizienz wird dabei vor allem durch die Anlagenproduktivität bestimmt. Diese wird durch den maximalen Massedurchsatz bestimmt, der wiederum dadurch bestimmt wird, wie schnell die Wärme aus dem Extrudat abgeführt werden kann. Eine Verbesserung der Folienkühlung ist durch ein optimales Düsenlippendesign und die richtige Einstellung des Kühlrings abhängig von der Prozessführung möglich.

Ziel des Forschungsvorhabens war, die Massendurchsätze bei der Blasfolienextrusion durch eine Verbesserung etablierter Doppellippenkühlringe hinsichtlich der generierten Strömungsverhältnisse zu steigern. Hierbei sollte insbesondere der Einfluss des Düsenlippendesigns auf eine Massedurchsatzsteigerung als auch die Beeinflussung der Folieneigenschaften untersucht werden. Dafür wurde eine simulationsgestützte Methodik zur strömungstechnisch optimierten Auslegung von Doppellippenkühlringen entwickelt. Mit dem Simulationsmodell kann die Kühlluftströmung und auftretende Strömungseffekte wie der Coanda-Effekt visualisiert werden. Dabei lassen sich Strömungsparameter und die Geometrie der Kühlringlippen variieren. Das Simulationsmodell erreichte im Abgleich mit Validierungsversuchen an der Blasfolienanlage des IKV eine gute Genauigkeit und ermöglichte die Auswahl einiger Lippengeometrie-kombinationen für die weiterführenden Untersuchungen. Durch den Einsatz von Nebel in den Untersuchungen wurde eine Möglichkeit gefunden, die Strömung zu charakterisieren, die eine Vorhersage über die Wärmeabfuhr erlaubt und die Simulationen anhand der Strömungsfläche validiert. In einem weiteren Schritt wurden die Einflüsse typischer Prozessparameter und der unterschiedlichen Lippengeometrien auf die Folieneigenschaften sowie auf den maximal erreichbaren Massedurchsatz untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozessparameter Gebläseleistung, BUR sowie Massetemperatur einen deutlich größeren Einfluss als die Lippengeometrie haben. Die Untersuchungen hinsichtlich einer idealen Lippengeometrie ergaben, dass eine parallele oder leicht zur Blase hingerrichtete Geometrie die besten Ergebnisse bezüglich Massestrom und Folieneigenschaften liefern. Dabei ist vor allem die Abhängigkeit einer Massedurchsatzsteigerung von der Blasenform eine wichtige Erkenntnis. Weiterhin sind starre Systeme wie ein Doppellippenkühlring für einen großen Bereich an Produkten entwickelt worden. Da für die bestmögliche Kühlung eine Anpassung der Düsenlippe notwendig wäre, wurde ebenfalls eine flexibel einstellbare Düsenlippe entwickelt und in Betrieb genommen. Diese besteht aus einer Bauweise mit drei übereinander angeordneten Irisblenden. Mit einer konturnahen Führung der Kühlluft konnte die Effizienz in Form einer Massedurchsatzsteigerung von 10% der Extrusionsanlage gesteigert werden.

2 EINLEITUNG

Kunststofffolien werden heutzutage in vielen Bereichen eingesetzt. Sie reichen von der einfachen Tragetasche, über Verpackungsmaterial, Hygieneartikeln oder Medizinprodukten bis hin zur Abdeckplane in der Landwirtschaft [HM17, WB07]. Die Hersteller dieser Folien haben ein großes Interesse daran, ihre Produkte bei maximalen Massedurchsätzen herzustellen, damit eine maximale Effizienz ihrer Produktionsanlagen gewährleistet ist. Ebenso wichtig ist es, dass Rüstzeiten und damit verbundene Stillstandszeiten minimiert oder vermieden werden. Vor allem für die deutschen kmU (kleinen und mittelständischen Unternehmen) ist die Produktionseffizienz des Anlagenparks aufgrund der höheren Energie- und Lohnkosten im Vergleich zu anderen Ländern sehr wichtig. Gleichzeitig führen Preiskämpfe, z. B. im Lebensmitteleinzelhandel, zu einem hohen Kostendruck bei Folienprodukten. Eine Effizienzsteigerung kann einerseits durch eine Dickenreduktion (Downgauging) und andererseits durch eine Massedurchsatzsteigerung erzielt werden. Der wichtigste Parameter zum Erreichen von Massedurchsatzsteigerungen ist die Kühlleistung der Blasfolienextrusionsanlage [Gla18, OS10, WB07].

Konventionelle Blasfolienanlagen verwenden zur Kühlung der Folienußenseite in der Regel Doppellippenkühlringe, welche der Blase durch tangential anströmende Kühlluft Wärme entziehen. Um die Anforderungen an eine effiziente Folienkühlung zu erfüllen, ist es wichtig, die Strömungseffekte der Kühlluft zu beachten. Ein wichtiger Effekt ist der Coanda-Effekt. Der Coanda-Effekt beschreibt dabei die Eigenschaft eines strömenden Mediums sich an ebenen oder konvexen Oberflächen anzulegen [CS13, SV00a, SV00b]. Durch eine Anhaftung der Strömung an den Austrittslippen des Kühlrings kann sich im Bereich der Düsenlippen und Folienblase ein Totgebiet der Luftströmung einstellen, aus dem kaum Luftvolumen und damit Wärme heraustransportiert wird, wodurch sich der konvektive Wärmeentzug verschlechtert. Auch sind hohe Strömungsgeschwindigkeiten in einem engen Bereich nah an der Blase wünschenswert, da sie zu höherem Wärmeentzug führen. Eine Verbesserung der Folienkühlung ist demnach durch verbesserte Kühlringlippen und die richtige Einstellung des Kühlrings abhängig von der Prozessführung möglich.

Daher war es das Ziel des IGF-Forschungsvorhabens 21086 N, die Massendurchsätze bei der Blasfolienextrusion durch eine Verbesserung etablierter Doppellippenkühlringe hinsichtlich der generierten Strömungsverhältnisse um bis zu 15 % zu steigern. Hierbei sollen insbesondere der bislang nicht berücksichtigte Coanda-Effekt in die Kühlringauslegung integriert werden und der Einfluss des Düsenlippendesigns hinsichtlich einer möglichen Massedurchsatzsteigerung als auch einer Beeinflussung der Folieneigenschaften wie Dickenschwankung sowie mechanischer und optischer Eigenschaften untersucht werden.

3 STAND DER TECHNIK

Im Folgenden wird auf in der Blasfolienextrusion wirkenden Strömungsphänomene eingegangen. Zudem liegt ein besonderer Fokus auf bisher eingesetzten Kühlkonzepten in der Blasfolienextrusion. Bereits durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich des Coanda-Effekts werden ebenfalls nachfolgend erläutert.

3.1 Strömungsphänomene in der Folienherstellung

Folgende zwei Strömungseffekte nehmen einen großen Einfluss auf die Wärmeabfuhr in der Blasfolienextrusion.

Venturi-Effekt:

Der wichtigste und bekannteste Strömungseffekt bei der konvektiven Folienkühlung ist der Venturi-Effekt, welcher sowohl den Wärmeübergangskoeffizienten an der Folienblase als auch die Blasenform und damit die zur Wärmeabfuhr zur Verfügung stehende Oberfläche des Folienschlauchs gezielt optimieren kann. Der Venturi-Effekt beruht auf der Bernoulligleichung der Strömungsmechanik. Nach dieser Gleichung ist die spezifische Energie entlang einer Stromlinie konstant:

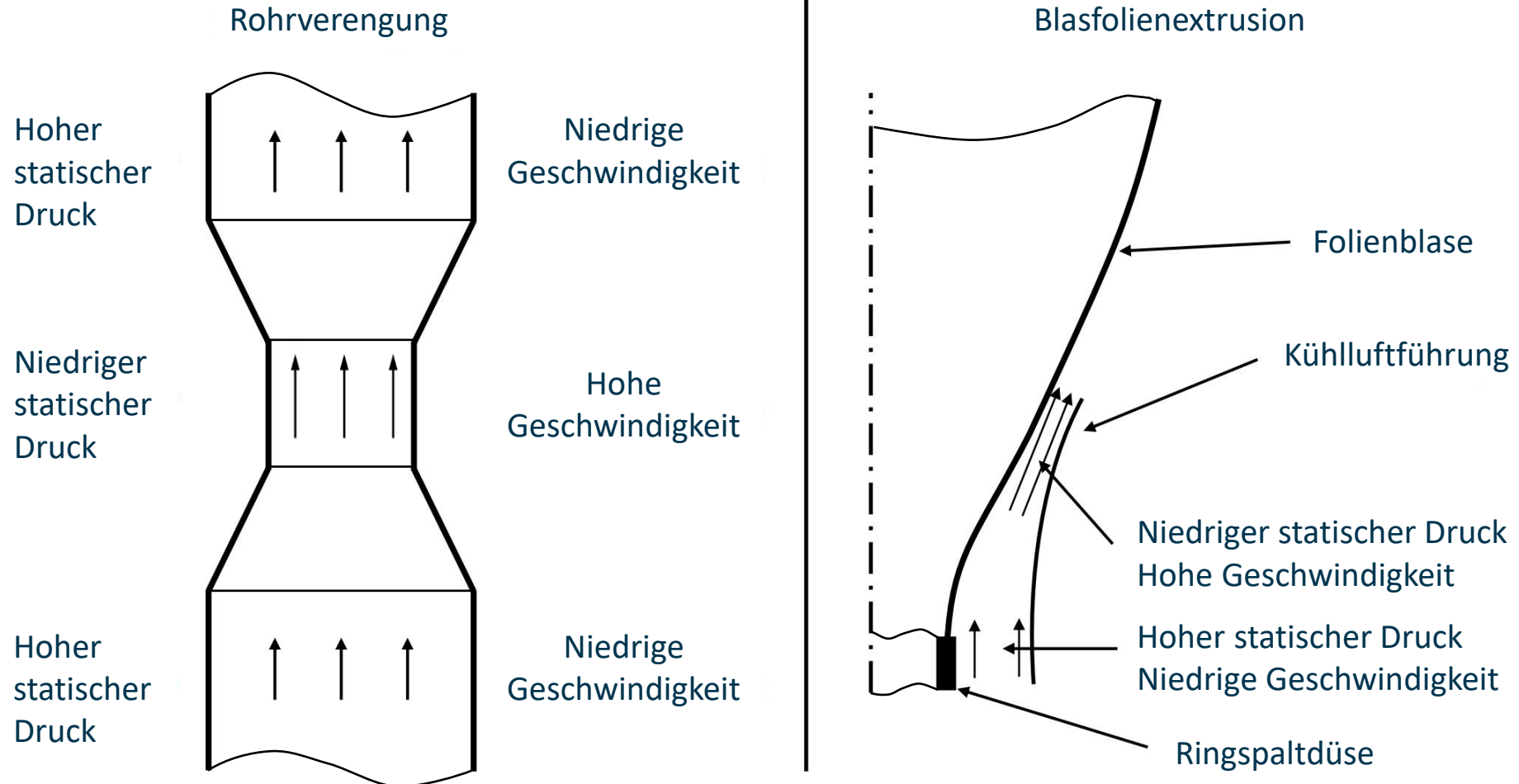
$$E = \frac{1}{2}u^2 + \frac{p}{q} = const. \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Die Kühlluft kann in der Blasfolienextrusion in guter Näherung als inkompressibel angesehen werden, da die Strömungsgeschwindigkeiten weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit liegen. Durchströmt das Fluid eine Verengung, steigt die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des geringeren Strömungsquerschnitts an, während der statische Druck in diesem Bereich sinkt [Sch18, SV00a, SV00b, ZL07]. In Bild 3.1 ist dies links anhand einer Rohrverengung und rechts anhand einer Folienblase zu sehen. Die höhere Geschwindigkeit führt aufgrund einer höheren Reynoldszahl zu einem höheren Wärmestrom. Der geringere Druck führt zu einer frühzeitigen Aufweitung der Folienblase und somit zu einer höheren wärmeabgebenden Oberfläche, sodass der Wärmestrom weiter steigt.

Coanda-Effekt:

Ein ebenfalls wichtiger, bislang jedoch meist vernachlässigter, Strömungseffekt in der Blasfolienextrusion ist der Coanda-Effekt. Dieser Effekt tritt auf, wenn z.B. ein Luftstrahl, also eine räumlich eng begrenzte Strömung, in einer ruhenden Umgebung an einer Fläche entlang fließt. Die Strömung „haftet“ dann, im Gegensatz zu einer Strömung ohne Coanda-Effekt, welche eine

Venturi-Effekt



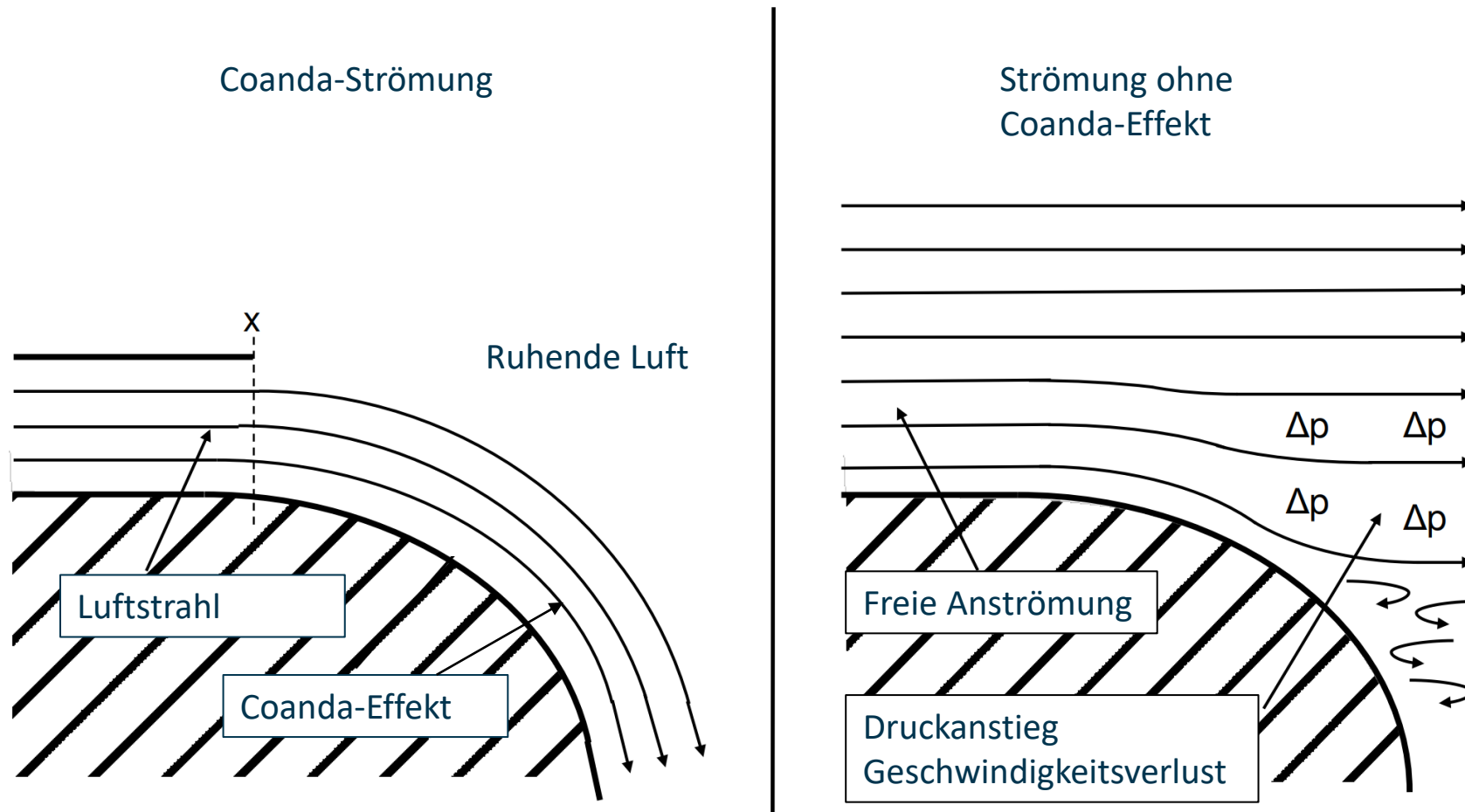
freie Anströmung aufweist, an der Oberfläche und fließt zu einem gewissen Grad an dieser entlang, selbst wenn die Oberfläche einen konvexen Verlauf beschreibt. Dieser Effekt ist in Bild 3.2 links schematisch dargestellt. Die Strömung folgt ab dem Punkt x , an dem die Luftführung auf der Oberseite abgeschnitten wird, als Luftstrahl in einer ruhenden Umgebung der konvexen Unterseite. Bei Kühlsystemen in der Blasfolienextrusion kann dieser Effekt dazu führen, dass die Kühlluftströmung an der Luftführung und nicht an der Folienblase haftet, sodass der Wärmeübergangskoeffizient in diesem Bereich beeinflusst wird. Bei einer Strömung ohne Coanda-Effekt mit freier Anströmung (Bild 3.2 rechts) erhält die Strömung im Bereich der konvex gekrümmten Wand mehr Volumen, sodass diese aufgrund der Kontinuitätsgleichung langsamer wird. Mit der sinkenden Geschwindigkeit steigt der statische Druck aufgrund der Bernoulli-Gleichung. Aufgrund des Druckanstieges und der Reibung an der Wand löst sich die Strömung ab, es entsteht ein Wirbelgebiet und die Hauptströmung folgt weiter dem Verlauf der freien Anströmung. Diese Effekte sind bei der Coanda-Strömung nicht zu sehen, da die äußere Luft in Ruhe und eine freie Anströmung nicht vorhanden ist und somit die Bernoulli-Gleichung keine Anwendung findet. Hier ist stattdessen ein Wandstrahleffekt zu sehen: Die Coanda-Strömung besteht aus einem Luftstrahl mit einer Grenzschicht sowohl an der Wandseite als auch zur umgebenden ruhenden Luft. Daher entsteht hier kein Druckanstieg, wie ihn die Bernoulli-Gleichung fordern würde. Zur Ablösung einer Coanda-Strömung führt also lediglich eine Verlangsamung der Strömung verursacht durch Reibungseffekte, sodass eine Ursache für die Ablösung der Strömung fehlt und diese somit wesentlich länger an der Wand haftet [CS13, SV05, Sch18]. Ein weiterer Aspekt des Coanda-Effekts beschreibt einen Luftstrahl, welcher in der Nähe einer Wand, welche annähernd parallel zur Strömung verläuft, in den freien Raum strömt. Dieser Luftstrahl kann sich aufgrund des entstehenden Unterdrucks auch an diese flache oder leicht gekrümmte Wand anlegen und an dieser entlangströmen, sodass im weiteren Verlauf der Wandstrahleffekt zu sehen ist [SV00b]. Die beiden genannten Effekte, „Venturi-“ sowie „Coanda-Effekt“, spielen bei der konvektiven Außenkühlung in der Blasfolienextrusion eine große Rolle. Insbesondere für die Entwicklung optimaler Kühllösungen, welche einen höheren Wärmeübergang zwischen Folienblase und vorbeiströmender Luft zum Ziel haben, müssen diese Effekte unbedingt berücksichtigt werden.

3.2 Kühlkonzepte in der Blasfolienextrusion

Nach der Beschreibung des Blasfolienextrusionsprozesses, der Wärmetransportmechanismen und der Strömungseffekte folgt nun die Vorstellung industriell eingesetzter Kühlkonzepte. Aus produktions- und verfahrenstechnischer Sicht sind die Anforderungen an effiziente Kühlsysteme [Ast78]:

- Hohe Kühlleistung: *hoher Massedurchsatz*

Vergleich zwischen Coanda-Strömung und normaler Strömung



- Gute Folienqualität: *hohe mechanische und optische Eigenschaften, geringe Foliendickenschwankung*
- Hohe Produktionssicherheit: *Vermeidung von Ausfallzeiten*
- Einfache Handhabung: *problemloses und schnelles Anfahren der Anlagen, möglichst schneller Wechsel der Produkteigenschaften*

Im Weiteren werden lediglich konvektive Kühlkonzepte vorgestellt. Um eine möglichst effiziente Kühlung zu ermöglichen, wird die extrudierte Schlauchfolie sowohl von der Innenseite als auch von der Außenseite konvektiv gekühlt. Die Kühlung der Innenseite der Folie erfolgt in der Industrie standardmäßig mittels sogenannter Blaseninnenkühlungen (Internal Bubble Cooling, IBC). Diese sorgen für einen ständigen Luftaustausch im Inneren der Folienblase und damit sowohl für eine gleichmäßigere Abkühlung der Innenseite der Folie als auch für höhere Durchsätze bei gleichbleibender Folienqualität [HSF06, Let08]. Die Kühlung der Folienußenseite wird von Kühlringen übernommen. Diese liegen auf dem Werkzeug auf und leiten die Kühlluft gegen die Folienußenseite.

Einfachlippen-Kühlring

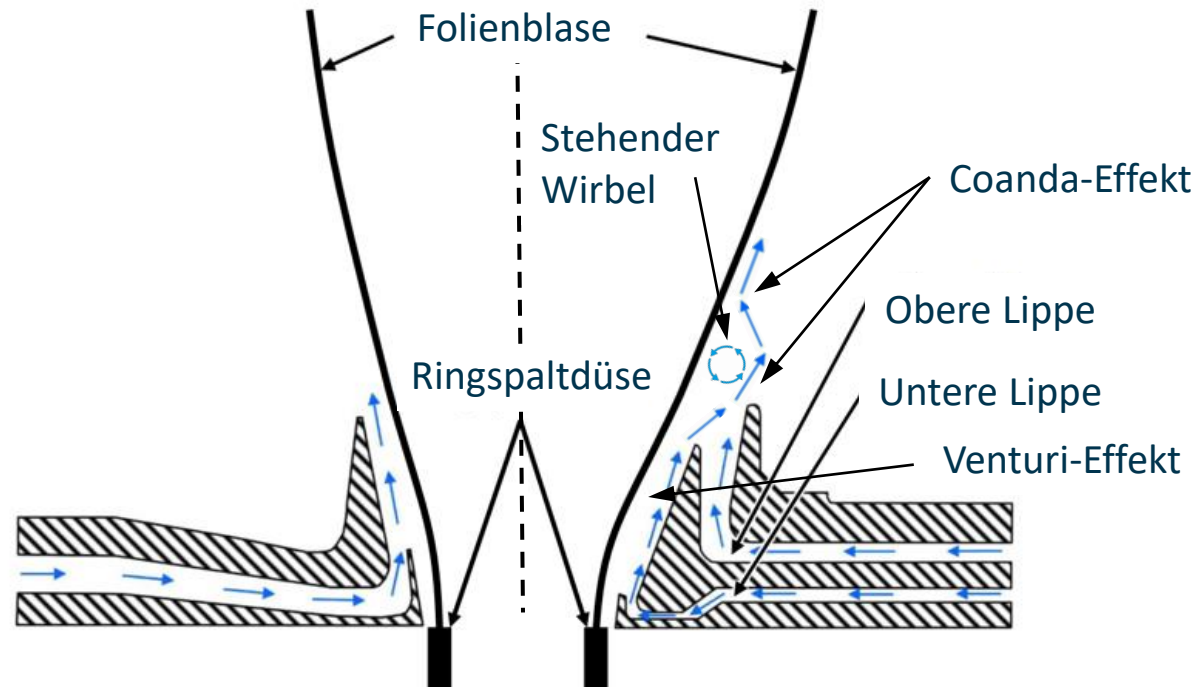
Schematisch ist in Bild 3.3 auf der linken Seite ein Einfachlippen-Kühlring dargestellt. Bevor der Kühlluftvolumenstrom aus einem Ringspalt tangential zur Folienblase austritt, wird die Kühlluft durch ein Labyrinthsystem aufgestaut, sodass die Luftströmung über den Umfang homogenisiert wird. Eine geometrische Veränderung des Spalts bewirkt eine entsprechende Veränderung der Anströmcharakteristik. Der Einfachlippen-Kühlring zeichnet sich durch seinen großen Einsatzbereich aus, da sich die werkzeugnah zugeführte Kühlluftströmung frei über der Schlauchbildungszone ausbreiten kann [Hen18, Wen11]. Da hier allerdings der Austritt der Kühlluft an der Stelle höchster Temperatur und geringster Viskosität des extrudierten Schmelzeschlauches ist, kann der Luftstrom die Folienblase verformen und somit Prozessinstabilitäten hervorrufen [Bus10, Rei15].

Doppellippen-Kühlring

Eine Weiterentwicklung stellt daher der Doppellippenkühlring dar, welcher heutzutage der industriell am häufigsten genutzte Kühlring ist (Bild 3.3 Rechts). Dieser besitzt einen zweiten Luftaustrittsspalt oberhalb des ersten. Hier tritt aus dem unteren Spalt ein geringer Luftstrom aus, welcher den extrudierten Schmelzeschlauch direkt nach dem Werkzeugaustritt vorkühlt. Der größere Teil der Kühlluft tritt aus dem oberen Ring aus. Hier ist die Folienblase bereits vorgekühlt und nicht mehr so anfällig gegen Verformungen, sodass die Kühlleistung gesteigert werden kann. Bei richtiger Anordnung kann außerdem der Venturi-Effekt im Bereich der unteren Lippe genutzt werden, sodass die ausströmende Kühlluft die Folienblase definiert ansaugt

Kühlluftströmung bei Einfach- und Doppellippenkühlringen

Vergleich zwischen Einfach- und Doppellippen-Kühlring



Schematische Darstellung
der Luftführung in einem
Einfachlippen-Kühlring

Schematische Darstellung
der Luftführung in einem
Doppellippen-Kühlring

und frühzeitig aufweitet (Bild 3.3 rechts). Dies ist auf die so entstehende Druckdifferenz zwischen der Blasenaußenseite (Venturi-Effekt, statischer Druck sinkt) und der Blaseninnenseite (Stützluft, IBC) zurückzuführen. Somit steht eine größere Folienoberfläche A für den Wärmeaustausch zur Verfügung, sodass die Kühlleistung weiter gesteigert werden kann. Außerdem wird die Folienblase durch den reduzierten statischen Druck stabilisiert [Ove09, Rah10, Rei15]. Bei dem Einsatz eines Doppellippenkühlrings muss allerdings ebenfalls der in Kap. 3.2 vorgestellte Coanda-Effekt beachtet werden. Durch eine ungünstige Einstellung des Doppellippenkühlrings haftet die Kühlluft an der Kühlringgeometrie und wird von der Folienblase wegelenkt. Dadurch entsteht in diesem Bereich ein stehender Wirbel. Aufgrund des Coanda-Effekts wird die Strömung von diesem Wirbel wieder zur Folienblase geführt (Bild 3.3 rechts). Im Bereich des stehenden Wirbels wird der Wärmeübergangskoeffizient α reduziert, sodass die Kühlleistung des Doppellippenkühlrings sinkt. Dieses Wirbelgebiet kann durch eine gezielte Anpassung der Kühlluftströmung mit z.B. der Gebläseleistung oder durch Justierung des Kühlringringes durch den Anlagenbediener minimiert werden [AAA10].

3.3 Simulative Untersuchung der Kühlluftströmung

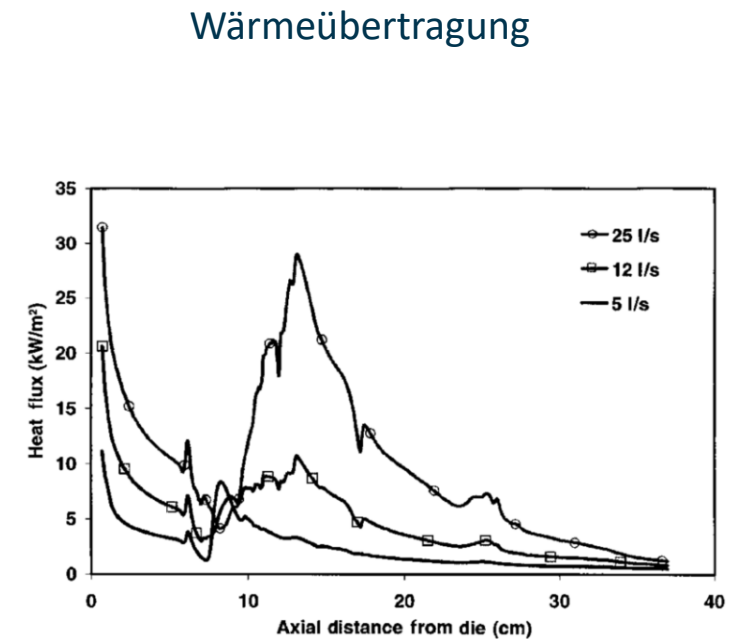
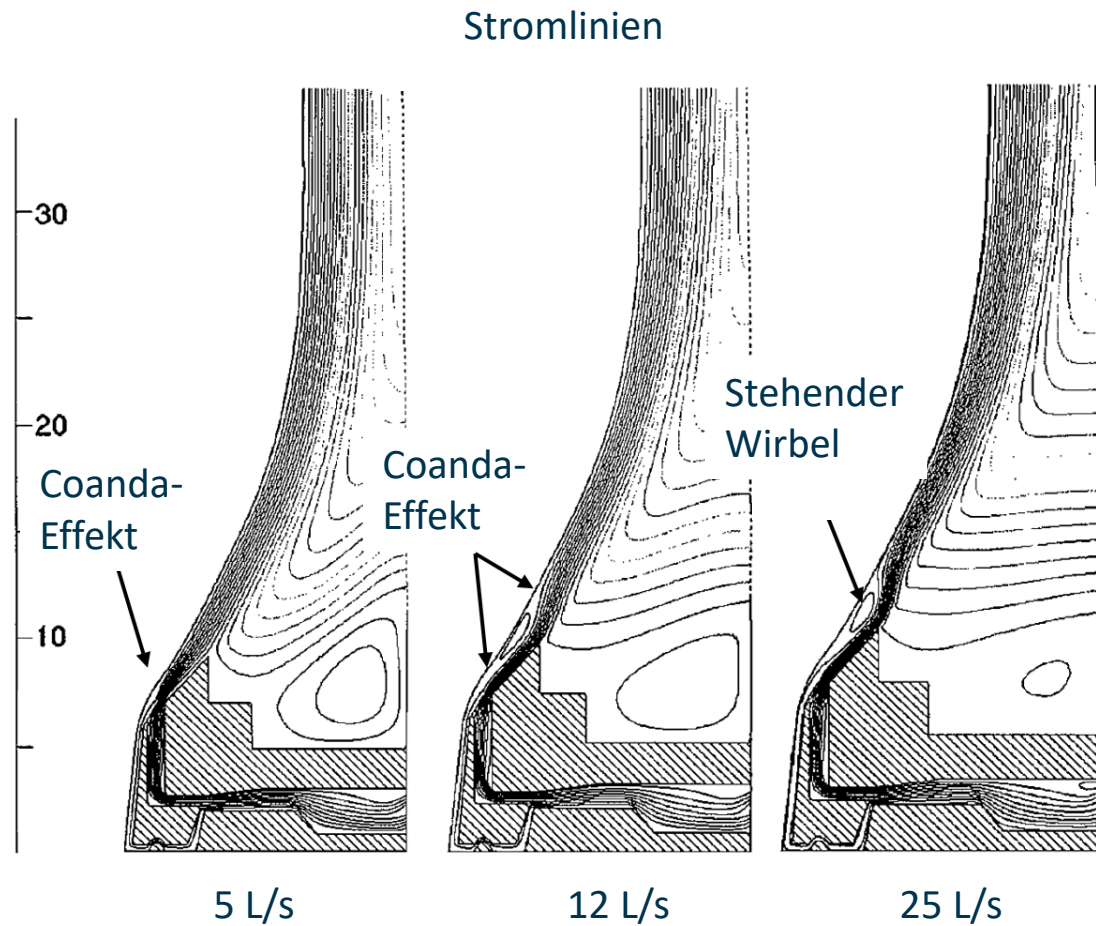
Bisher basiert die Auslegung und Optimierung der Kühlsysteme von Blasfolienanlagen meist auf der experimentellen Entwurfsmethode, sodass die Anpassung vor allem auf Erfahrungswissen basiert. Diese Methodik ist jedoch sehr zeitaufwendig und kostenintensiv [JFW13, SWV99]. Eine numerische Lösung des Problems der Kühlringoptimierung wurde daher bereits in den 70er Jahren von *Pearson* und *Petrie* gesucht, sodass der Kühlprozess bereits im Vorfeld untersucht werden kann. Da die numerische Lösung jedoch unrealistische Folienkonturen ergab und somit eine Optimierung bestehender Systeme nicht möglich war, konnten hier keine relevanten Ergebnisse erzielt werden [PP70a, PP70b, PP70c]. In den Arbeiten von *Janas* [Jan15] wurde ebenfalls eine numerische Methode zur Optimierung der Blasfolienkühlung entwickelt. Aufgrund des sehr hohen Zeitaufwands der Simulationen, konnte keine zielorientierte und praxistaugliche Optimierungsmethode entwickelt werden und auf diese Arbeit wird nicht weiter eingegangen [Jan15]. An der McMaster University, Hamilton, Kanada wurde in den Jahren 1999 bis 2005 von *Sidiropoulos* und *Vlachopoulos* ein erstes Simulationsmodell entwickelt, welches ausschließlich die Strömungsprozesse der Kühlluft und die Wärmeübertragung zwischen Folienblase und Kühlluftströmung abbildet. Dazu wurde ein verstellbarer Doppellippenkühlring mit einem Düsendurchmesser von 50 mm der Firma Future Design Inc., Ontario, Kanada, modelliert. In den Simulationen wurden die Öffnung der Doppellippe, der Kühlluftvolumenstrom und das Lippendesign variiert. Die Simulationen nutzen starre Geometriemodelle sowohl für eine kurze Schlauchbildungszone als Nachbildung der Verarbeitung von LLD-Polyethylen als auch für eine lange Schlauchbildungszone für HDPE. Da in diesen Simulationen neben dem Venturi-Effekt erstmals der Coanda-Effekt in der Blasfolienextrusion visualisiert

wurde, werden die durchgeführten Simulationen im Folgenden näher beschrieben [SV99, SV00a, SV00b, SV05].

Zunächst untersuchten *Sidiropoulos* und *Vlachopoulos* den Effekt der Gebläseleistung auf den Venturi- sowie den Coanda-Effekt. Die Strömung wurde sowohl mit einer kurzen als auch mit einer langen Schlauchbildungszone simuliert. Auf Bild 3.4 links ist der Vergleich von simulierten Strömungslinien bei einer kurzen Schlauchbildungszone und einem Kühlluftvolumenstrom von 5 Litern pro Sekunde (L/s) auf der linken Seite, 12 L/s in der Mitte und 25 L/s auf der rechten Seite zu sehen. Es wird deutlich, dass eine Erhöhung des Kühlluftvolumenstroms den Verlauf der Kühlluft deutlich beeinflusst. Bei einem kleinen Volumenstrom haftet der Luftstrahl permanent an der Folienblase. Bei einem mittleren Volumenstrom von 12 L/s haftet der Luftstrahl aufgrund des Coanda-Effekts hingegen zuerst an der Kühlringgeometrie und wird von der Folienblase weggerichtet. Etwas oberhalb des Kühlrings legt sich der Luftstrahl aufgrund eines zweiten Coanda-Effekts wieder an die Blase, sodass im Zwischenraum ein stehender Wirbel entsteht. Bei einem hohen Volumenstrom von 25 L/s ist dieses Verhalten deutlich stärker ausgeprägt. Deutlich oberhalb des Kühlrings prallt der von der Folienblase weggerichtete Luftstrahl erst wieder auf diese, sodass hier ein größerer stehender Wirbel entsteht. Zudem kann der auf die Folienblase zurückgeführte Luftstrahl Prozessinstabilitäten hervorrufen. Bei allen Volumenströmen ist deutlich zu erkennen, dass Umgebungsluft mitgerissen wird, sodass die Geschwindigkeit bei Erreichen der Frostlinie etwa eine Größenordnung kleiner ist als die Geschwindigkeit bei Kühlringaustritt. Der Luftstrahl folgt nach dem stehenden Wirbel bei allen untersuchten Konfigurationen bis zum höchsten simulierten Punkt weiterhin der Blasengeometrie [SV99, SV00b]. Auf Bild 3.4 rechts ist die flächenbezogene Wärmestromdichte $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$ aller simulierten Volumenströme über die Höhe der Folienblase aufgetragen. Bei allen Volumenströmen ist ein anfänglicher Peak zu sehen. Hier tritt die Kühlluft aus der unteren Lippe aus. Die Höhe des Peaks ist proportional zum ausströmendem Kühlluftvolumenstrom. Aufgrund der schnellen Erwärmung des kleineren Volumenstroms sinkt die Wärmestromdichte schnell ab. Der zweite Peak ist bei einem Volumenstrom von 5 L/s an der Stelle der zweiten Lippe. Bei höheren Volumenströmen mit einem stehenden Wirbel ist dieser Peak wesentlich breiter. Im Vergleich zum kleinen Volumenstrom ist er überproportional größer und an der Stelle des sich wieder anlegenden Kühlluftstroms. Obwohl der Coanda-Effekt den Wirbel entstehen lässt, sorgt er für eine Wiederanlegung des Luftstroms und hat so einen positiven Einfluss auf die Wärmestromdichte und den Wärmeübergangskoeffizienten. Allerdings führt der wiederanlegende Kühlluftstrom möglicherweise zu Blaseninstabilitäten [SV99, SV00b]. Dies ist aufgrund der starren simulierten Blasenform nicht darstellbar.

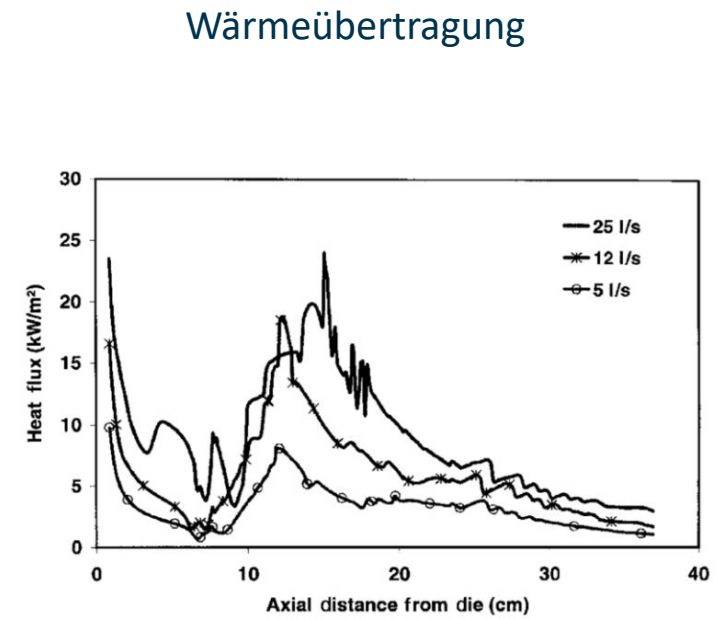
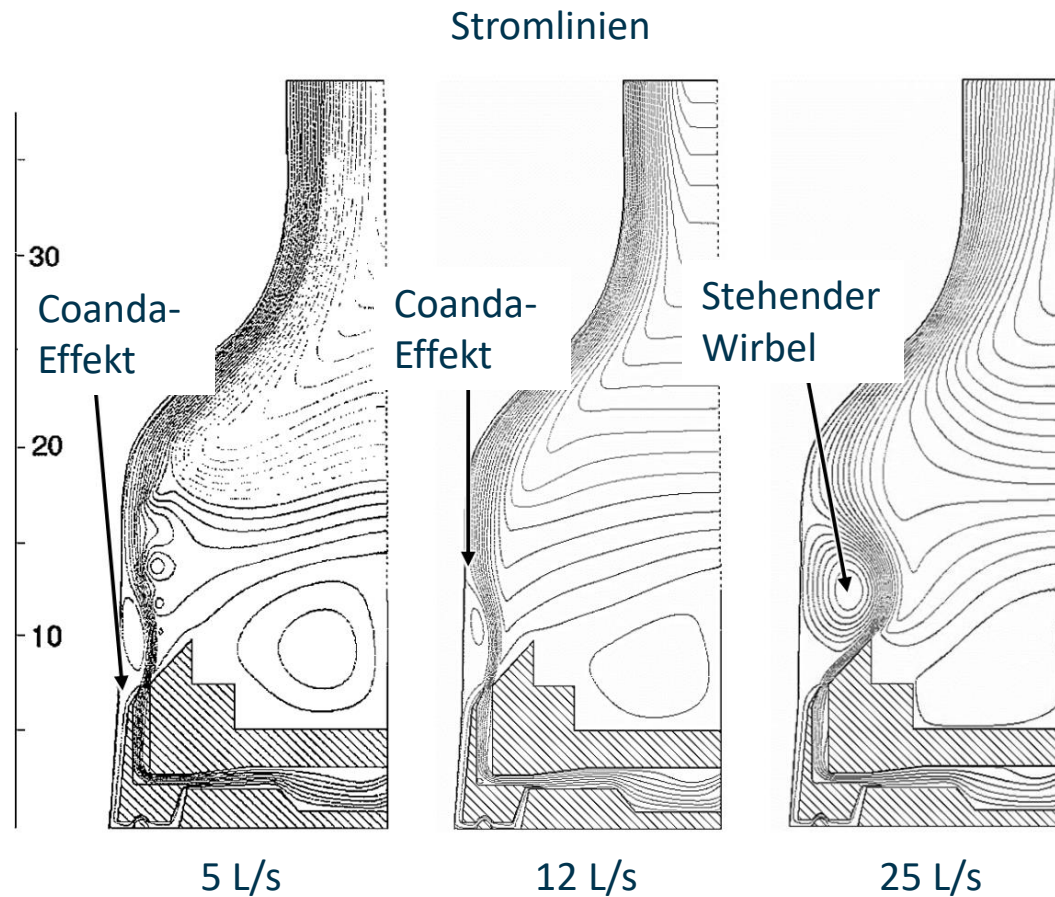
Die Simulationen der Strömung mit der langen Schlauchbildungszone sind auf Bild 3.5 links zu sehen. Bei einem kleinen Volumenstrom von 5 L/s bilden sich, anders als bei der kurzen

Variation des Volumenstroms bei Verwendung einer LLD-PE Blasengeometrie



[SV00b]

Variation des Volumenstroms bei Verwendung einer HD-PE Blasengeometrie

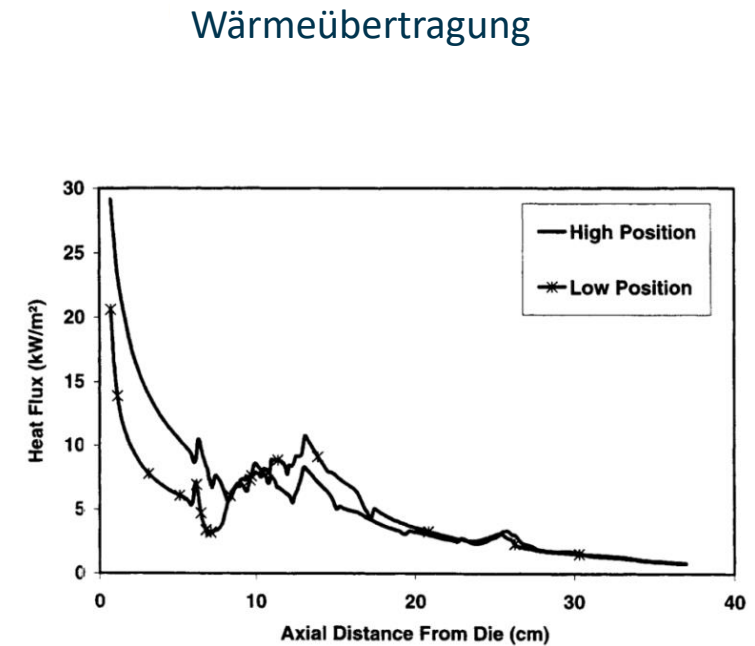
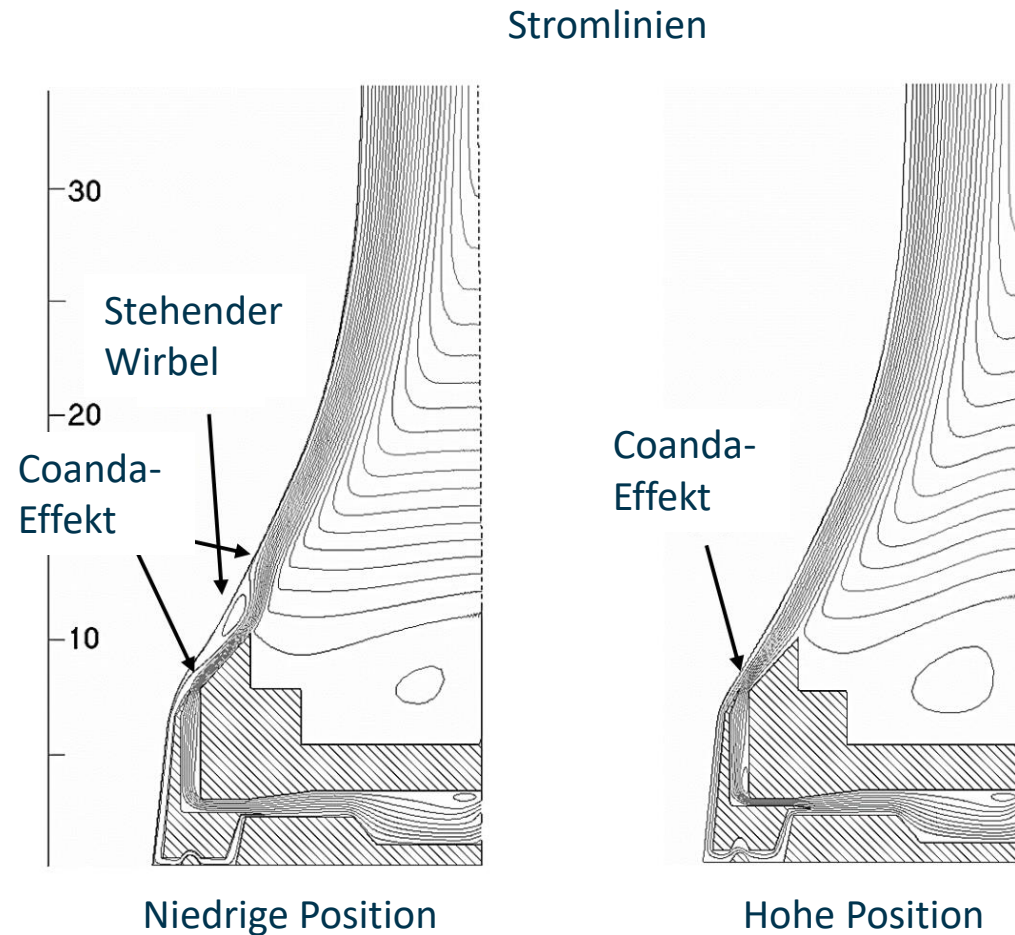


[SV00b]

Schlauchbildungszone, kleine Luftverwirbelungen oberhalb der Doppellippe außerhalb des Luftstrahls. Außerdem führen bereits kleinste Kühlluftvolumenströme zu einer deutlichen Ausbildung des Coanda-Effekts, sodass der Luftstrahl zunächst an der Kühlringgeometrie haftet und erst nach einem stehenden Wirbel aufgrund des zweiten Coanda-Effekts wieder auf die Folienblase prallt. Bei den Effekten der höheren Volumenströme auf den Coanda-Effekt ist kein signifikanter Unterschied zu den Simulationen mit kurzer Schlauchbildungszone zu sehen [SV00b]. Die Wärmestromdichten für die simulierten Volumenströme mit einer langen Schlauchbildungszone sind auf Bild 3.5 rechts zu sehen. Auch hier ist ein anfänglicher Peak proportional zum Kühlluftvolumenstrom mit einer rapiden Verringerung der Wärmestromdichte zu erkennen. Der zweite Peak ist bei allen Volumenströmen an der Stelle des zurückprallenden Luftstroms. Die Peaks des kleinen und mittleren Volumenstroms sind proportional zu diesem. Der Peak des hohen Volumenstroms ist bei einer gleichen Wärmestromdichte wie der des mittleren Volumenstroms aufgrund des größeren stehenden Wirbels aber deutlich breiter. Der Coanda-Effekt verändert also den charakteristischen Verlauf der Wärmestromdichte und des Wärmeübergangskoeffizienten [SV00b].

Auf Bild 3.6 links ist der Einfluss der Doppellippe zu sehen. Dieser Einfluss wurde lediglich mit einer kurzen Schlauchbildungszone simuliert. Der modellierte Doppellippenkühlring ermöglicht ein Verstellen der mittleren Geometrie zwischen den Luftströmen im laufenden Prozess, sodass zeitgleich der untere Kühlluftvolumenstrom vergrößert und der obere Volumenstrom verkleinert werden kann. In der Simulation wird die mittlere Geometrie um 2 mm erhöht. Auf der linken Seite fließt somit weniger Luft durch den unteren Teil der Doppellippe und entsprechend mehr durch den oberen Teil der Doppellippe als in der Konfiguration auf der rechten Seite. Der Volumenstrom, welcher durch den unteren Teil der Doppellippe strömt, wird durch den schmalen Eingang beschleunigt, sodass der statische Druck aufgrund des Venturi-Effekts sinkt. Dieser Druck ist bei beiden Einstellungen ähnlich und deutlich niedriger als der zum Erreichen des Blasendurchmessers nach der Schlauchbildungszone benötigte Innendruck der Blase. Dies führt zu einer Aufweitung und Stabilisierung der Schlauchbildungszone im Bereich der Doppellippe (s. Kap. 3.3) [SV99, SV00a]. Der Coanda-Effekt ist nur bei niedriger Einstellung der Doppellippe zu sehen, bei welcher der Großteil der Luft durch die obere Lippe strömt. Hier wird der Luftstrahl durch den Coanda-Effekt an der Kühlringgeometrie nach außen gerichtet und legt sich nach einem stehenden Wirbel aufgrund des zweiten Coanda-Effekts wieder auf die Folienblase. Bei hoher Einstellung der Doppellippe ist der stehende Wirbel nicht mehr zu sehen. Hier fließt durch die obere Lippe deutlich weniger Luft und der Luftstrahl haftet permanent an der Folienblase. Auch hier liegt die Kühlluftströmung bei beiden Konfigurationen bis zum höchsten simulierten Punkt an der Folienblase an [SV99, SV00a]. Auf Bild 3.6 rechts

Variation der Öffnungsweite der Doppellippe bei Verwendung einer HD-PE Blasengeometrie



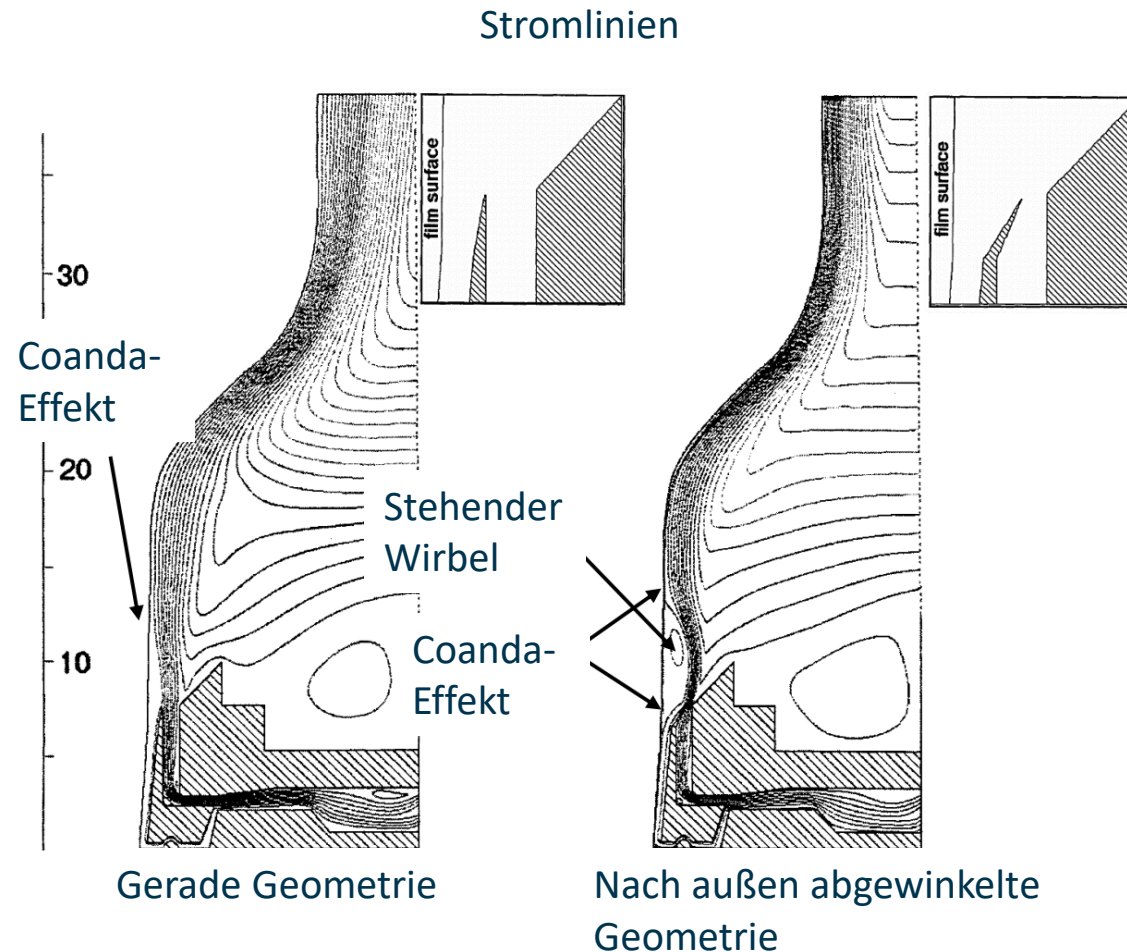
[SV00a]

ist die Wärmestromdichte beider Doppellippeneinstellungen zu sehen. Bei beiden Einstellungen ist ein anfänglicher Peak an dem Punkt des Austritts der Kühlluft der unteren Lippe zu sehen. Der Peak der hohen Einstellung ist höher, da hier ein größerer Volumenstrom aus der unteren Lippe austritt. Aufgrund der schnellen Erwärmung der Kühlluft der unteren Lippe sinkt die Wärmestromdichte schnell ab. Der zweite Peak ist bei der hohen Einstellung an der Stelle der zweiten Lippe. Bei niedriger Einstellung der Doppellippe mit stehendem Wirbel ist dieser Peak wesentlich breiter. Im Vergleich zur hohen Einstellung ist er überproportional größer und an der Stelle des zurückprallenden Kühlluftstroms. Somit ist zu erwarten, dass der Coanda-Effekt auch hier einen großen positiven Einfluss auf die Wärmestromdichte und den Wärmeübergangskoeffizienten hat. Allerdings führt auch hier der wiederanliegende Kühlluftstrom möglicherweise zu Blaseninstabilitäten [SV99, SV00a]. Eine weitere Simulation betrachtet eine Variation der Lippengeometrie. Hier wurde die mittlere Geometrie in einer nahezu senkrechten und einer leicht nach außen gerichteter Variation simuliert (Bild 3.7 links). Dieser Effekt wurde lediglich mit einer langen Schlauchbildungszone betrachtet. Hier ist zu sehen, dass mit der leicht nach außen gerichteten Variante durch den Coanda-Effekt ein größerer stehender Wirbel auftritt, da der Luftstrahl an der Geometrie nach außen abgelenkt wird, an der oberen Doppellippengeometrie haftet und erst nach dem stehenden Wirbel aufgrund des zweiten Coanda-Effekts wieder auf die Folienblase prallt und weiter an dieser entlangfließt. Bei der nahezu senkrechten Geometrievariante ist der stehende Wirbel wesentlich kleiner. Auch hier haftet bei beiden Varianten der Luftstrahl aufgrund des Coanda-Effekts nach dem stehenden Wirbel bis zum oberen Ende der Simulation an der Folienblase [SV00a]. Die Wärmestromdichte beider Lippengeometrien sind auf Bild 3.7 rechts zu sehen. Bei beiden Geometrien ist ein anfänglicher Peak zu sehen, welcher aufgrund gleicher Einstellungen die gleiche Höhe aufweist. Auch der schnell sinkende Verlauf aufgrund der schnellen Erwärmung der Kühlluft ist ähnlich. Der zweite Peak liegt bei gerader Geometrie etwas oberhalb der zweiten Lippe. Bei nach außen gerichteter Geometrie mit einem stehenden Wirbel liegt dieser Peak wesentlich höher und an der Stelle des wiederanlegenden Kühlluftstroms. Somit hat der Coanda-Effekt auch hier bei einer Änderung der Geometrie einen positiven Einfluss auf die Wärmestromdichte und den Wärmeübergangskoeffizienten. Allerdings führt auch hier der wiederanliegende Kühlluftstrom möglicherweise zu Blaseninstabilitäten [SV99, SV00a].

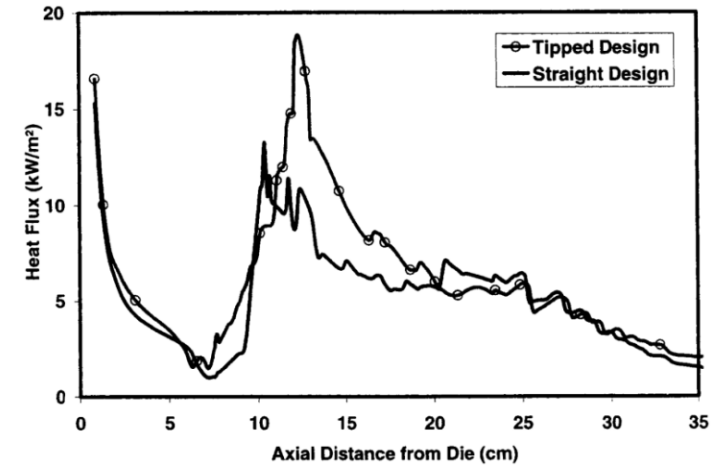
3.3.1 Simulation eines Kühlrings von *Abdelmaksoud, Abdelsalam und Awad*

Aufbauend auf den Simulationen von *Sidiropoulos* und *Vlachopoulos* wurden weitere Simulationen an der Mansoura University, Mansoura City, Ägypten, von *Abdelmaksoud, Abdelsalam* und *Awad* durchgeführt. Diese betrachten als ebenfalls starre Folienblasengeometrie lediglich eine kurze Schlauchbildungszone. Zunächst wurde eine typische Einfachlippe modelliert. Die Austrittsbreite dieser Einfachlippe wurde im originalen Design und mit einer Verdopplung der

Variation der Geometrie der Doppellippe bei Verwendung einer HD-PE Blasengeometrie



Wärmeübertragung

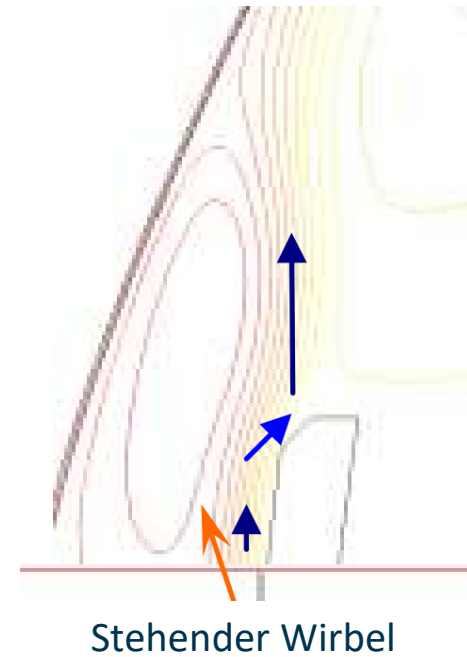
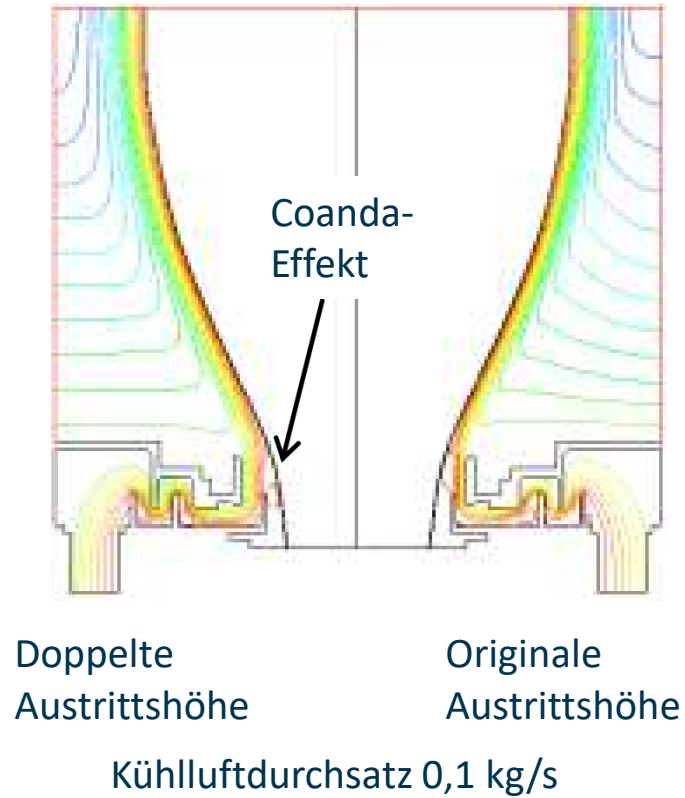


[SV00a]

Austrittsbreite des Kühlluftvolumenstroms, also dem Luftspalt zwischen Lippengeometrie und Folienblase, simuliert (siehe Bild 3.8). Das originale und das verbreiterte Design wurden im Hinblick auf die Stromlinien untersucht. Hier zeigt sich, dass der Coanda-Effekt mit einem stehenden Wirbel bei beiden Lippengeometrien bei unterschiedlichen Volumenströmen auftritt. Somit steigen sowohl die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Blaseninstabilität als auch die Dickenschwankung der Folie. Als eine weitere Modifikation des Designs wurde die Lippe um 5° nach außen geneigt, sodass unter dieser eine zusätzliche Luftzufuhr angebracht werden kann, um einen Doppellippenkühlring zu simulieren. Ohne zusätzliche Luftzufuhr ist auch bei der Simulation mit der modifizierten Lippe der Coanda-Effekt ausgeprägt und ein stehender Wirbel zu sehen. Eine Aufteilung der Volumenströme, sodass ein Drittel der Luft durch die untere Luftzufuhr strömt, führt nicht zu einer Auflösung des stehenden Wirbels. Erst eine Verringerung des Spaltes zwischen Doppellippe und Folienblase, also einer Verringerung des Durchmessers des Kühlrings, führt zu einer Vermeidung des Coanda-Effekts und somit einer Auflösung des Wirbelgebiets. Die Vermeidung des Coanda-Effekts und des daraus resultierenden Wirbelgebiets führen in diesen Simulationen, im Unterschied zu den Untersuchungen von *Sidiropoulos* und *Vlachopoulos*, zu einer Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten und somit zu einer Verbesserung der Kühlleistung der Blasfolienanlage und einer Erhöhung des Massedurchsatzes.

Die Simulationen von *Sidiropoulos* und *Vlachopoulos* sowie *Abdelmaksoud*, *Abdelsalam* und *Awad* zeigen, dass sich der Coanda-Effekt positiv und aber auch negativ auf die Kühlleistung und somit die Wärmeabfuhr in der Blasfolienextrusion auswirken kann. Weiterhin ergeben sich Abhängigkeiten von der Einstellung und der Geometrie des Kühlrings, wodurch eine prozessoptimierte Einstellung nicht trivial ist. Die vorgestellten Simulationen wurden nicht im Extrusionsprozess validiert, wodurch mögliche auftretende Abweichungen von den Strömungsuntersuchungen nicht untersucht werden konnten.

Simulationsergebnisse der Verteilung der Strömungslinien



[AAA10]

4 ZIEL UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN

Wie der Stand der Technik zeigt, spielt die Wärmeabfuhr im Extrusionsprozess durch die Kühlluftströmung eine wichtige Rolle und korreliert direkt mit dem maximal möglichen Massedurchsatz. Die Steigerung der Produktivität der Blasfolienanlage ist durch ein optimiertes Düsenlippendesign und durch eine richtige Einstellung des Kühlrings abhängig von der Blasenform möglich. Bisher erfolgt die Fertigung der Düsenlippen als auch die Einstellung der Doppellippenkühlringe auf Erfahrungswerten, sodass deren Optimum hinsichtlich Kühlleistung bisher nicht ausgeschöpft wurde. Insbesondere werden Strömungsphänomene wie der vorgestellte Venturi- und der Coanda-Effekt nicht vollumfänglich berücksichtigt. Weiterhin sind starre Systeme wie ein Doppellippenkühlring für einen großen Bereich an Produkten entwickelt worden. Jedoch wäre für die bestmögliche Kühlung in Abhängigkeit des Prozesses und des Materials eine Anpassung der Luftströmung vonnöten.

Das Ziel des Forschungsprojektes 21086 N war daher, die Massendurchsätze bei der Blasfolienextrusion durch eine Verbesserung etablierter Doppellippenkühlringe hinsichtlich der generierten Strömungsverhältnisse zu steigern. Hierbei wurde insbesondere der in Realversuchen nicht validierte Coanda-Effekt in die Kühlringauslegung integriert. Im ersten Schritt wurde eine Simulation entwickelt, die durch die Visualisierung der Kühlluftströmung eines Doppellippenkühlrings ermöglicht, die ideale Kühllippengeometrie eines Doppelkühlrings in Abhängigkeit von unterschiedlichen Prozessparametern vor der eigentlichen Extrusion durch gezielte Vermeidung oder Nutzung des Coanda-Effekts zu bestimmen. Im zweiten Schritt wurde das Simulationsmodell durch Nebelversuche validiert. In einem weiteren Schritt wurden in Extrusionsversuchen die Einflüsse der unterschiedlichen Düsensdesigns auf die Folieneigenschaften sowie auf den maximal erreichbaren Massedurchsatz untersucht. Da der Austausch einer Kühlringlippe mit Rüstzeiten verbunden ist, wurde im letzten Schritt weiterhin eine flexibel einstellbare Düsenlippe entwickelt und in Betrieb genommen werden, um die Effizienz einer Produktionslinie weiter steigern zu können.

5 VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN

Im Folgenden werden die verwendeten Materialien, die Anlagentechnik und alle eingesetzten Analysemethoden beschrieben, welche für die Untersuchung der verschiedenen Düsenlippengeometrien in der Blasfolienextrusion zum Einsatz kamen.

5.1 Materialien

Es wurden in dem Forschungsvorhaben ein PE-LD, ein PE-LLD und ein PE-HD mit einem MFR (Melt-Flow-Rate) im typischen Bereich der Blasfolienextrusion untersucht. Die Auswahl der Materialtype erfolgte aufgrund der Möglichkeit, die Untersuchungen für eine Kurzhalsfahrweise (PE-LD-Type, PE-LLD-Type) als auch für eine Langhalsfahrweise (PE-HD-Type) durchführen zu können.

Die Eigenschaften der verwendeten Materialien sind in Tabelle 5.1 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 NSF	Sabic	0,9 bei 190 °C und 2,16 kg
PE-HD	FO 4660	Sabic	0,7 bei 190 °C und 2,16 kg

Tabelle 5.1: Untersuchte Materialien im Forschungsvorhaben

5.2 Anlagentechnik

5.2.1 Extruder

Die verwendete Blasfolienextrusionsanlage besteht aus drei Einschneckenextrudern der Fa. Kuhne Anlagenbau GmbH, St. Augustin, vom Typ KFB 45/600. Die Extruderschnecken 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. Alle Extruder verwenden 3-Zonen-Schnecken mit Scher- und Mischelementen. Die Dosierung erfolgt über drei gravimetrische Dosiereinheiten der Fa. PlastControl GmbH, Remscheid [Lor16, Sch15, Gla18]. Für die Versuchsdurchführung wurden die beiden durchsatzstärkeren Extruder A und C verwendet.

5.2.2 Werkzeug

Von den Extrudern wird die Schmelze über eine kurze starre Schmelzeleitung in einen Radialwendelverteiler geführt. Der Austrittsdurchmesser des Radialwendelverteilers beträgt 80 mm. Die Düsenpaltbreite kann durch verschiedene Einsätze zwischen 0,7 mm und 1,5 mm variiert

werden. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Düsenpalt von 1,0 mm mit einer Bügelzonenlänge von 8 mm verwendet.

5.2.3 Außenluftkühlung

Der Wärmeentzug aus der Folienblase wird über einen Doppellippenkühlring realisiert. Die Luftströmung wird mit Hilfe eines Kühlaggregats der Fa. LAUDA Dr. R. Wobser GmbH & Co KG, Lauda-Königshofen heruntergekühlt. Die Temperatur am Austritt des Kühlaggregats kann an diesem eingestellt werden und wird über alle Realversuche so gewählt, dass die Zuluft im Doppellippenkühlring auf einem konstanten Wert von 20 °C gehalten wird. Der Aufbau des verwendeten Kühlrings ist in Bild 5.1 zu sehen. Hier wird die Luftströmung der sechs Zuführungen über ein Labyrinthsystem direkt dem unteren Teil der Doppellippe zugeführt. Die Zuführung des oberen Teils der Doppellippe wird durch 120 Löcher mit einem Durchmesser von 7 mm realisiert. Die untere und mittlere Platte haben einen Abstand von 3 mm zueinander und sind in ihrer Höhe nicht verstellbar, sodass das Verhältnis der Volumenströme über die Höhe der oberen Platte eingestellt werden kann. Diese ist durch ein umlaufendes Gewinde stufenlos zwischen 0 mm und 30 mm verstellbar. Die Geometrie des Kühlluftaustritts der mittleren und der oberen Platte können durch entsprechende Lippeneinsätze variiert werden.

5.2.4 Nebelmaschine

Zur Visualisierung der stationären Kühlluftströmung kam eine Nebelmaschine des Typs Flow-Marker der Firma Tintschl Bioenergie und Strömungstechnik AG, Erlangen, Deutschland, zum Einsatz. Dieser Nebelgenerator eignet sich ideal für die Strömungsvisualisierung mit langanhaltendem und thermisch inaktivem Nebel und beeinflusst damit nicht die eigentliche Kühlluftströmung, da die Nebeltemperatur mit der Austrittstemperatur der Kühlluft übereinstimmen.

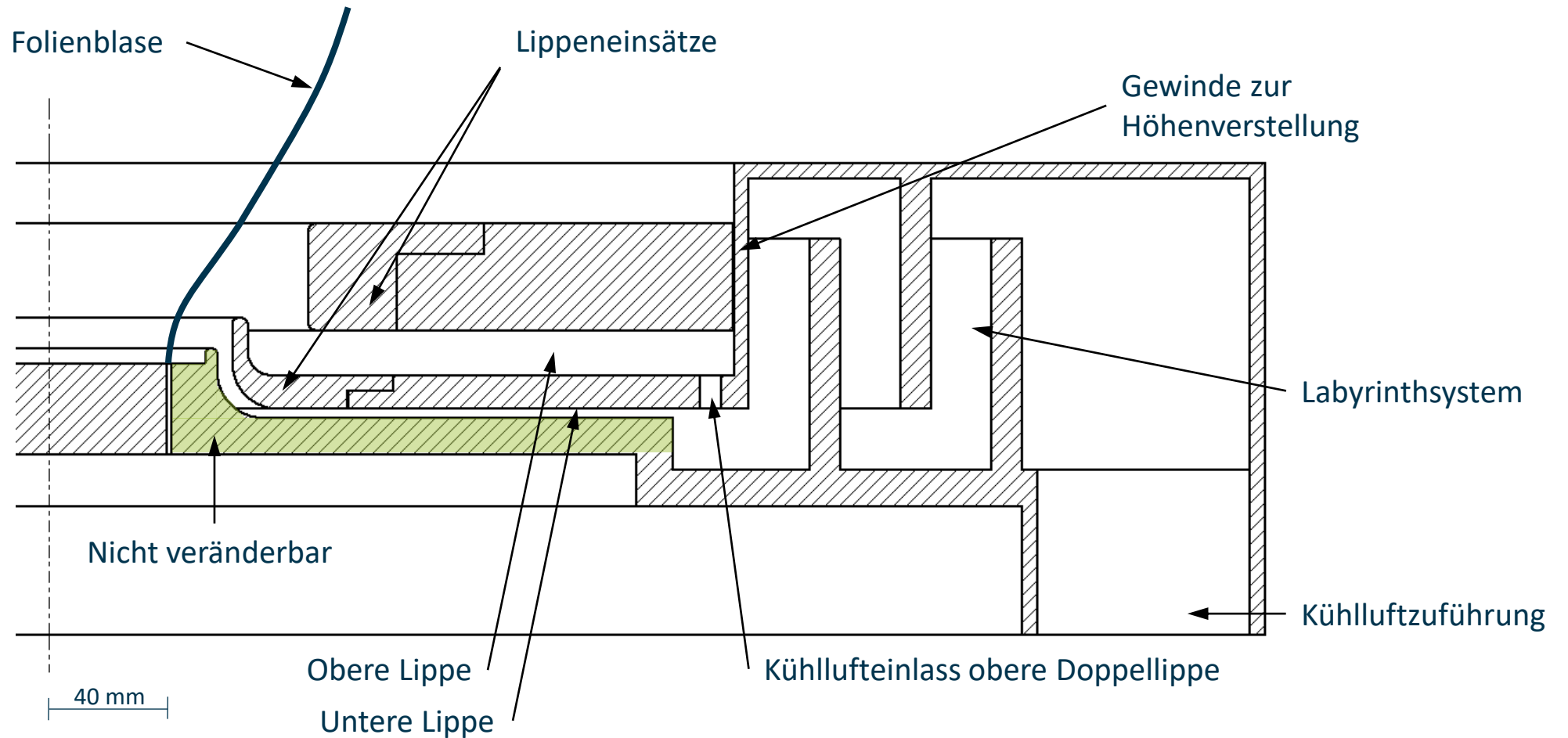
5.3 Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften

5.3.1 Bestimmung des Massedurchsatzes

Der Massedurchsatz ist ein wichtiges Kriterium für die Produktivität einer Blasfolienanlage. Aus dem Massedurchsatz kann direkt auf die Kühlleistung geschlossen werden, wobei eine höhere Kühlleistung mit einem höheren Durchsatz korreliert. Die Höhe der Frostlinie ist definiert als die Linie, auf deren Höhe die Kristallitbildung einsetzt und die Folie daher leicht trüb wird. Sie eignet sich daher zur Beurteilung der Kühlleistung.

Die Frostlinie wurde für alle Versuchspunkte, d. h. für verschiedene Düsenlippendesigns, auf gleicher Höhe gehalten, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Bei einer Düsenlippe, die für

Kühlring



eine verbesserten Kühlleistung sorgt, sinkt die Frostlinienhöhe bei sonst gleichen Prozessparametern. Um die Durchsätze direkt vergleichen zu können, muss der Durchsatz entsprechend erhöht werden, bis die vordefinierte Höhe der Frostgrenze wieder erreicht ist [HKF20].

Der Massedurchsatz wurde von Hand bestimmt. Zur Bestimmung des Massedurchsatzes wurde die extrudierte Folie über einen Zeitraum von 120 Sekunden entnommen und anschließend auf einer Waage der PCE Deutschland GmbH, Meschede gewogen.

5.3.2 Bestimmung der Foliendickenschwankung

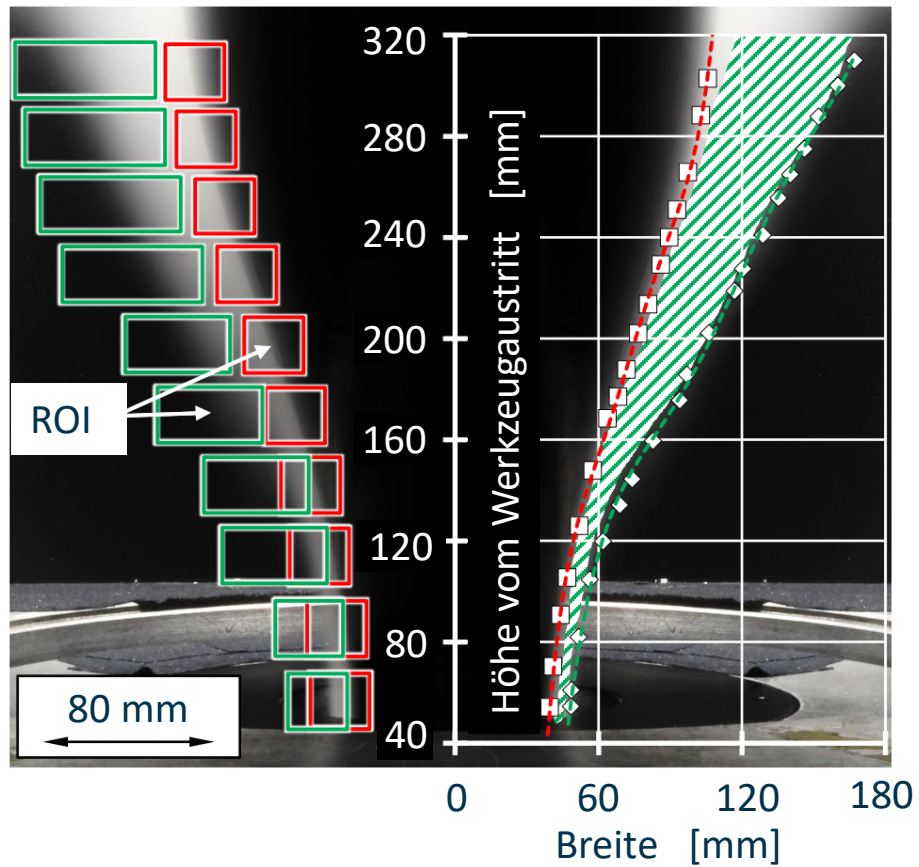
Die Messung der Foliendicke erfolgte mit einer analogen Dickenmessuhr der Fa. Käfer Messuhrenfabrik GmbH, Villing-Schwenningen. Die Messuhr hat eine Ablesegenauigkeit von 5 μm . Die Dickenmessung erfolgte an 20 Punkten über den Umfang der Blasfolie und wurde an drei Stellen in Extrusionsrichtung wiederholt.

5.3.3 Bestimmung der Breite der Kühlluftströmung

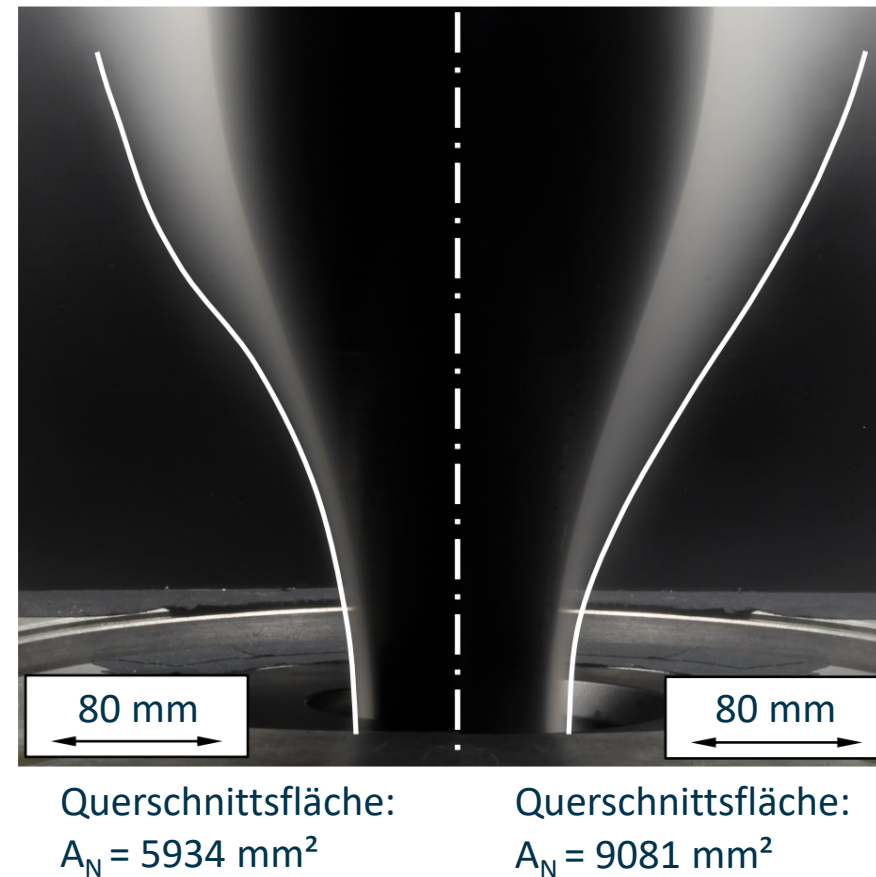
Zur Bestimmung der Breite der Kühlluftströmung wurde ein Versuchsstand mit der in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Nebelmaschine und einer selbst entwickelten Nebelführung aufgebaut. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in Kapitel 6.1. Zur Visualisierung der Kühlluftströmung wurde für 30 Sekunden Nebel eingebracht. Von jedem Versuchspunkt wurden zur Erfassung der Standardabweichung fünf Bilder in einem Abstand von fünf Sekunden mit voll ausgebildeter Strömung und gleichmäßiger Nebelkontur angefertigt. Die Breite der Kühlluftströmung ist dabei proportional zur Querschnittsfläche des Nebels auf einer Seite der Blase. Diese Vereinfachung ist aufgrund der Rotationssymmetrie der Kühlluftströmung zulässig. Die Querschnittsfläche des Nebels wird dabei über die Differenz der Integrale der Blasen- und Nebelkontur bestimmt. Diese Integrale werden zur Verbesserung der Robustheit lediglich in einem Bereich der Schlauchbildungszone von 40 bis 320 mm bestimmt, sodass der teilweise verminderte Kontrast der Nebelkontur im oberen Bereich der Blasengeometrie vernachlässigt werden kann. Diese Kurven bzw. Konturen werden mit Hilfe einer Reihe von Stützpunkten rekonstruiert, welche manuell mit einem am IKV entwickelten Tool auf Grundlage des Programms MATLAB der Fa. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA, identifiziert werden. In jedem Bild werden 10 Regions of Interest (ROI) für die Blasengeometrie und 10 ROI für die Nebelkontur festgelegt. In Bild 5.2 links ist diese Auswertemethode anhand einer Nebelströmung zu sehen. Auf der linken Seite sind die ROI für die Blasenkontur in rot und die ROI für die Nebelkontur in grün zu sehen. Für jede ROI werden durch manuelles Klicken auf die Kontur zwei Datensätze von Koordinatenpaaren erzeugt, die jeweils einen Bereich der Blasengeometrie oder der Nebelkontur darstellen. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurden diese vordefinierten

Quantitative Messmethode

Ermittlung der Querschnittsfläche



Vergleich verschiedener Nebenflächen



ROI vergrößert dargestellt, sodass die Stützpunkte mit einer hohen Genauigkeit detektiert werden können. Bei insgesamt 20 vordefinierten Bildbereichen ergeben sich somit 40 Bildpunkte, welche die Grundlage für die Polynomfittings bilden. *Spirgatis* schlägt ein Polynom fünften Grades für das Polynomfitting einer Blasenkontur vor, welches sich in diesem Fall auch als optimale Anpassung für die Nebelkontur herausstellt [Spi04]. In Bild 5.2 links sind die berechneten Polynome der Konturen des Nebels und der Blase zu sehen. Die schraffierte Fläche markiert die Differenz der Integrale in einem über alle Versuchspunkte festen Bereich von 40 mm bis 320 mm. Die Transformation der Pixelkoordinaten in metrische Einheiten erfolgt über eine Kalibrierungsskala, welche vor den Versuchen an Stelle der Blasengeometrie platziert wurde. Die Fläche ist bei gegebenem Volumenstrom aufgrund des Massenerhaltungsgesetzes proportional zur Geschwindigkeit der Kühlluft und somit proportional zum Wärmeübergangskoeffizient und zur Kühlleistung der Blasfolienanlage. Somit kann die Nebelquerschnittsfläche als Substitution der Breite der Kühlluftströmung eingesetzt werden und ist zusätzlich zur qualitativen Bewertung der Nebelpolynome ein quantitatives Merkmal der Kühlluftströmung zwischen den Versuchspunkten. In Bild 5.2 rechts sind beispielhaft zwei verschiedene Lippengeometrien zu sehen, welche zu einer eng anliegenden und einer weniger eng anliegenden Strömung führen.

5.3.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte der hergestellten Folienproben erfolgte mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick Z10 der Firma Zwick GmbH & Co KG, Ulm im Zugversuch. Die zu prüfenden Probekörper wurden nach DIN EN ISO 527-3 Typ 2 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 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 Schrumpfvorsuche erfolgte in Anlehnung an DIN 55543-4. Die Probekörper wurden aus der Folienbahn, gleichmäßig über der 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 Prüftemperatur für

die Schrumpfmessung befand sich oberhalb der Kristallitschmelztemperatur des jeweiligen Materials. Es wurden Folien aus PE-LD bei einer Temperatur des Silikonöls von 130 °C geprüft.

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

5.3.5 Bestimmung der optischen Eigenschaften

Für die Bestimmung der optischen Eigenschaften wurden Messungen mit einem Messgerät vom Typ haze-gloss 4601 der Fa. BYK-Gardner GmbH, Geretsried, durchgeführt, die unter anderem die Messung der Folienglanz und der Folientrübung ermöglicht. Die Messung erfolgte in Anlehnung an den Industriestandard ASTM D1003, indem je 3 Probenkörper pro Versuchspunkt mit den Abmessungen von 200 mm × 200 mm geprüft wurden.

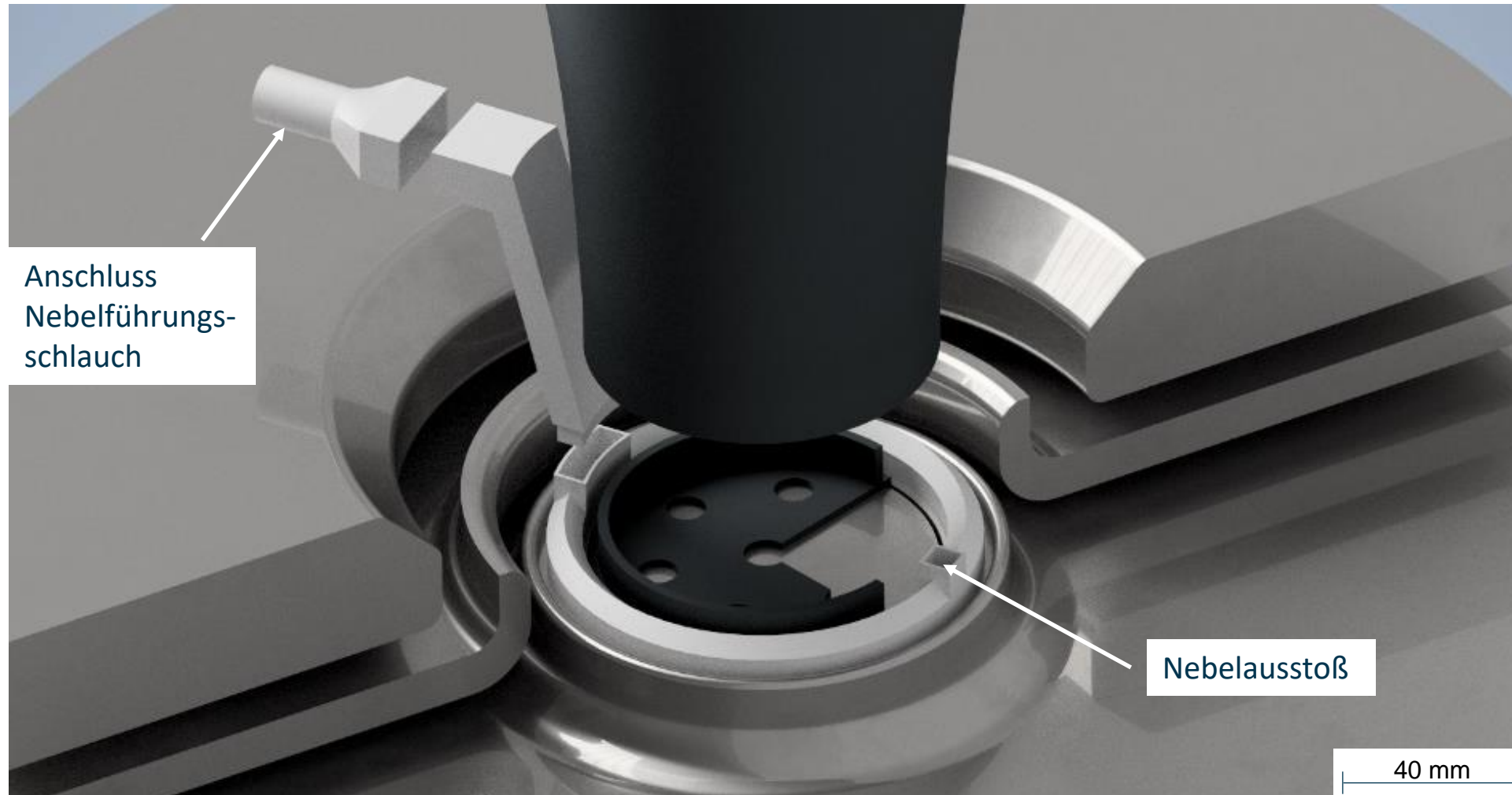
6 AUFBAU EINES VERSUCHSTANDS ZUR KÜHLLUFTVOLUMENSTROMVISUALISIERUNG

Die Konstruktion eines Versuchsstandes erfordert die Bereitstellung des Nebelfluids, eine Nebellanze zur Einleitung des Nebelfluids in die Kühlluftströmung der Blasfolienanlage sowie eine Einhausung zur Abschirmung von Umgebungseinflüssen. Für die Untersuchung vieler Prozesspunkte in kurzer Zeit wurden ebenfalls Folienblasen additiv gefertigt.

6.1 Nebelführungskonzept zur Visualisierung der Kühlluftströmung

Der Nebel einer konventionellen Nebelmaschine ist ein Aerosol. Dies bedeutet, dass feinste Nebeltröpfchen in der Luft verteilt werden. Dies wird durch eine Öffnung unmittelbar vor dem Austritt des Nebelfluids gewährleistet, sodass durch die hohe Austrittsgeschwindigkeit des Nebelfluids die Luft durch diese Öffnung mitgezogen wird. Zur Unterstützung der Nebelströmung wird Druckluft eingesetzt. Die Nebelmaschine kann 30 % des maximal möglichen Ausstoßes als einen kontinuierlichen Nebelstrom bereitstellen. Da die ausgestoßene Nebelmenge bei einem niedrigeren Wert als 30 % unregelmäßig oszilliert, wird die Nebelmaschine über alle Versuche hinweg auf diesen Wert eingestellt. Um eine ausreichende Genauigkeit der Visualisierung der Kühlluftströmung zu gewährleisten, muss das Nebelfluid so in die Kühlluftströmung eingeführt werden, dass die Strömung nicht beeinflusst wird und möglichst der gesamte Bereich vom Düsenaustritt bis zur Frostlinienhöhe abgebildet werden kann. Dazu wurden verschiedene Nebelführungskonzepte wie zum Beispiel Nebellanzens mit senkrecht zur Strömungsrichtung austretenden Nebel und flexible Nebellanzens getestet. Das finale Nebelführungskonzept bestand aus einer Nebellanze, welche den Nebel parallel zur Extrusionsrichtung in Düsennähe ausstößt (Bild 6.1). Mit diesen Nebelkanälen um die Blasengeometrie kann außerdem die Nebelzuführung auf die gegenüberliegende Seite der Visualisierung und Analyse der Kühlluftströmung gelegt und eine ausreichend hohe Querschnittsfläche für den Nebeltransport bei gleichzeitig geringer Bauhöhe realisiert werden. Die drei additiv gefertigten Bauteile werden an den entsprechenden Verbindungsstellen geklebt und in den Nebelführungsschlauch gesteckt (Bild 6.1). Dieses Konzept zeichnet sich durch eine niedrige Beeinflussung der Kühlluftströmung und eine Visualisierung des gesamten Strömungsfeldes in der Schlauchbildungszone ab Düsenaustritt aus und wird daher im Folgenden verwendet. Für die realen Extrusionsversuche wurde diese Nebelführung aus lasergesintertem Aluminium gefertigt.

Nebellanze parallel zur Strömungsrichtung



6.2 Optische Vermessung und Fertigung verschiedener Blasgeometrien

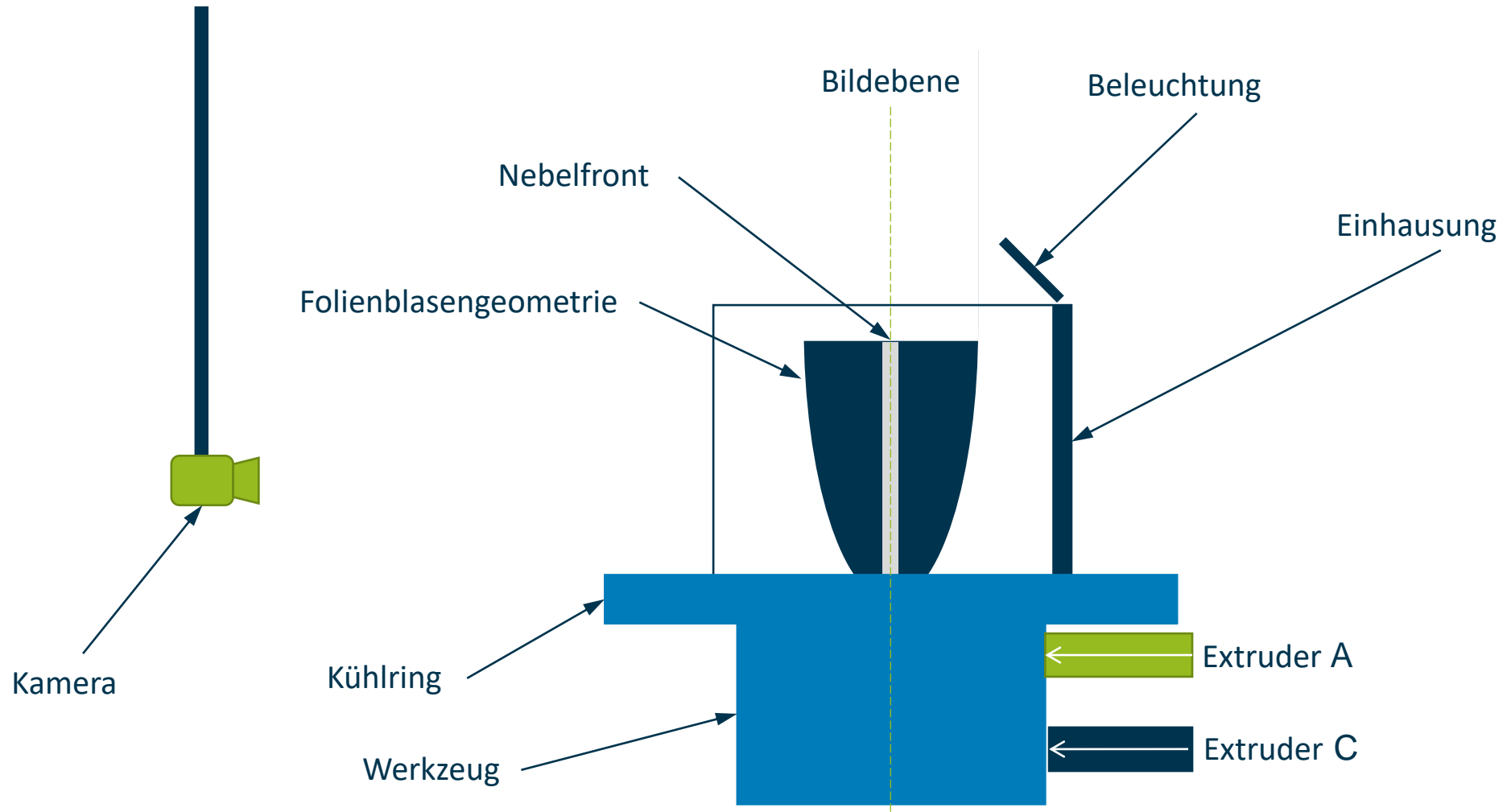
Im ersten Schritt wurden ähnlich der im Stand der Technik vorgestellten Simulationen starre Blasgeometrien bei unterschiedlichen Aufblasverhältnissen und fester Frostlinienhöhe gefertigt. Diese Höhe wird in der Praxis konstant gehalten und Kühlleistungssteigerungen werden in höheren Massedurchsätzen umgesetzt [CCO92].

Die Folienblase wurde im Realprozess mit einem PE-LLD und konstanten Parametern (Schmelzetemperatur: 190 °C; Gebläseleistung: 75 %, Frostlinienhöhe 360 mm) optisch vermessen und in Inventor Professional 2020 der Firma Autodesk GmbH, München, nachkonstruiert. Diese Geometrien wurden daraufhin mit einem FDM-Drucker (CR10, Creality, Shenzhen, China) additiv gefertigt. Für die Langhalsfahrweise eines PE-HD wurde im gleichen Vorgehen eine Blasengeometrie gefertigt.

6.3 Einhausung zur Abschirmung von Umgebungseinflüssen und zur Verbesserung der Bildverarbeitung

Zusätzlich musste der Einfluss von Luftströmungen aus der Umgebung minimiert werden. Diese Umgebungseinflüsse werden durch eine entsprechende Einhausung abgeschirmt (Bild 6.2). Die Größe der quadratischen Einhausung wurde so gewählt, dass die Grundfläche des Kühlrings maximal ausgenutzt wird, sodass die Beeinflussung der Kühlluftströmung durch Randeffekte an dieser Einhausung minimiert werden kann. Für eine möglichst genaue Visualisierung der Nebelkontur durch die digitale Bildverarbeitung ist ein hoher Kontrast zwischen Schlauchbildungszone, Nebelfläche und Hintergrund notwendig. Dazu wurde die Einhausung mattschwarz lackiert und an der Oberseite der Einhausung wurden zudem zwei Strahler montiert, welche den Nebel von hinten zur Erhöhung des Kontrasts anleuchten. Die Bildaufnahmen für die optische Auswertung wurden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera des Typs 700D der Firma Canon Deutschland GmbH, Krefeld, angefertigt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 6.2 zu sehen. Für reproduzierbare Bildaufnahmen wurde ein in die Bühne der Blasfolienanlage integriertes Kamerastativ benutzt.

Prinzipskizze des Messstandaufbaus zur Erfassung der Nebelfläche



7 AUFBAU UND VALIDIERUNG EINES SIMULATIONSMODELLS ZUR STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Zur simulativen Abbildung der Kühlluftströmung entlang der Schlauchbildungszone wurde eine Simulationsmodell aufgebaut. Mit diesem lassen sich die Strömungen sowohl in Abhängigkeit von unterschiedlichen Düsenlippengeometrien als auch Luftvolumenströmen darstellen. Als Simulationssoftware wurde die open-source Software OpenFoam (OpenFOAM Foundation, London, UK) verwendet. Es wurden echte Blasen geometrien in das Simulationsmodell überführt (siehe Bild 7.1).

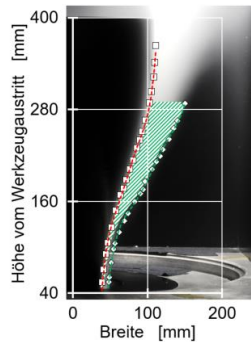
Zunächst werden die per Kamera erfassten ermittelten Geometrien von Blasenkontur und Doppellippenkühlring in eine geeignete Software implementiert und die vorhandenen Grenzflächen bestimmt. Eine Möglichkeit dazu bietet die freie Software Blender (Blender Foundation, Amsterdam, Niederlande), die auch in diesem Vorhaben verwendet wurde. Anschließend erfolgt die Vernetzung der Geometrien, d.h. die Geometrien werden in kleinere Elemente wie beispielsweise Quader oder Tetraeder zerlegt. Die Vernetzung selbst kann über OpenFOAM realisiert werden. Durch eine hohe Anzahl an Zellen nimmt die Vernetzung sowie die Berechnung viel Rechenzeit in Anspruch. Deshalb wird die Strömung als 2-D-axisymmetrisch angesehen, um eine minimale Zellenanzahl zu erreichen. Im Anschluss an die Vernetzung erfolgte die Definition der Randbedingungen. Die Luftströmung wird dabei ähnlich den Arbeiten von *Sidiropoulos et al.* als stationär angenommen. Unter der Bedingung, dass die Simulation die Strömungen eines Doppellippenkühlrings abbilden soll, ist es aufgrund des auftretenden Venturi-Effektes wichtig, die Strömung in der Simulation als kompressibel zu betrachten. Alle weiteren Randbedingungen zeigt Tabelle 7.1.

Randbedingung	Einheit	Wert	Begründung
Strömungsgeschwindigkeit normal zur Einlassfläche	[m/s]	0,175	Umrechnung aus Volumenstrom
Einlassdruck	[-]	zeroGradient	Simulationsparameter
Auslassdruck	[bar]	1	Umgebungsdruck
Auslassgeschwindigkeit	[-]	zeroGradient	Simulationsparameter
Kontaktbedingung Kühlring/Luft	[-]	noSlip	Wandhaftung
Kontaktbedingung Blase/Luft	[m/min]	8	Abzug der Blasfolienanlage
Dichte Luft	[kg/m ³]	1	Literaturwert
kinematische Viskosität Luft	[Pa·s]	10 ⁻⁵	Literaturwert

Tabelle 7.1: Randbedingungen und Stoffwerte der Simulationen

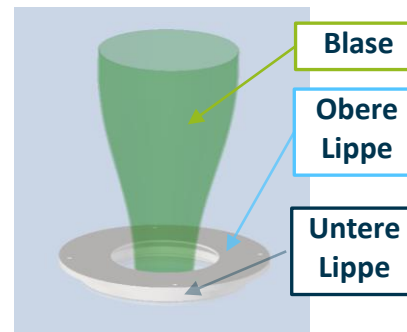
Überführung der Versuchsreihe in das Simulationsmodell

Versuchsaufbau



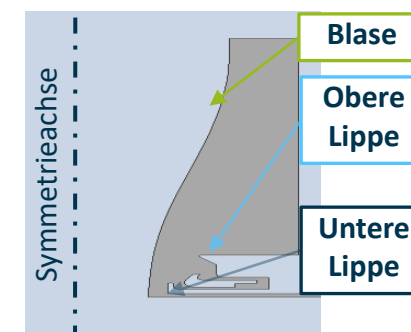
- Luftströmung wird mithilfe von Nebel sichtbar
- Geplottete Funktionen beschreiben den Strömungsverlauf

3-D CAD Modell



- Unterschiedliche Geometrien für beide werden konstruiert

2-D Simulationsraum Luftströmung



- Überführung in 2-D-Modell (axisymmetrisch)
- Luftströmungsparameter sind frei anpassbar

Im Lösungsprozess findet die tatsächliche CFD-Simulation in Form numerischer Berechnungen des strömungsmechanischen Problems statt. Mit dem Ziel der Visualisierung der Strömungslinien und nicht der Abbildung des Abkühlverhaltens entlang der Schlauchbildungszone ist es ausreichend, die Strömung als isotherm zu betrachten. Diese wird eindeutig beschrieben, wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt der Drucksalar und der Geschwindigkeitsvektor bekannt sind. Daher werden sowohl die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 7.1) als auch die Impulsgleichung (Gleichung 7.2) gelöst.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{Gl. 7.1})$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{norm} - p_{norm} = 0 \quad (\text{Gl. 7.2})$$

Dabei ist \mathbf{u} der Geschwindigkeitsvektor, $\boldsymbol{\tau}_{norm}$ die normierte Schubspannung und p_{norm} der normierte Druck.

Zur Berechnung der Strömung wurde das k-epsilon Turbulenzmodell verwendet. Das Turbulenzmodell k-epsilon ist das am häufigsten verwendete Modell in der Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Simulation mittlerer Strömungseigenschaften für turbulente Strömungsbedingungen. Es handelt sich um ein Zwei-Gleichungs-Modell, das eine allgemeine Beschreibung der Turbulenz mithilfe von zwei Transportgleichungen liefert. Die erste transportierte Variable des Modells ist die turbulente kinetische Energie (k) und wird durch folgende Gleichung beschrieben [LS73]:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \epsilon \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Die zweite transportierte Variable ist die Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie (ϵ). Berechnet wird diese mit folgender Gleichung [LS73]:

$$\frac{D}{Dt}(\rho \epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} \left(P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (\text{Gl. 7.4})$$

Für die Kopplung der zwei Gleichungen wird die kinematische Viskosität benötigt.

$$\vartheta = \frac{C_{mu} * k^2}{\epsilon} \quad (\text{Gl. 7.5})$$

Mit den Formelzeichen:

D_ϵ effektive Diffusivität für ϵ ,

D_k	effektive Diffusivität für k ,
ε	turbulente kinetische Energiedissipationsrate,
k	turbulente kinetische Energie,
P	turbulente kinetische Energieproduktionsrate,
Δp	Druckdifferenz,
$C_1, C_2, C_3, C_{\mu}, \sigma_\varepsilon$	Modell-Koeffizienten.

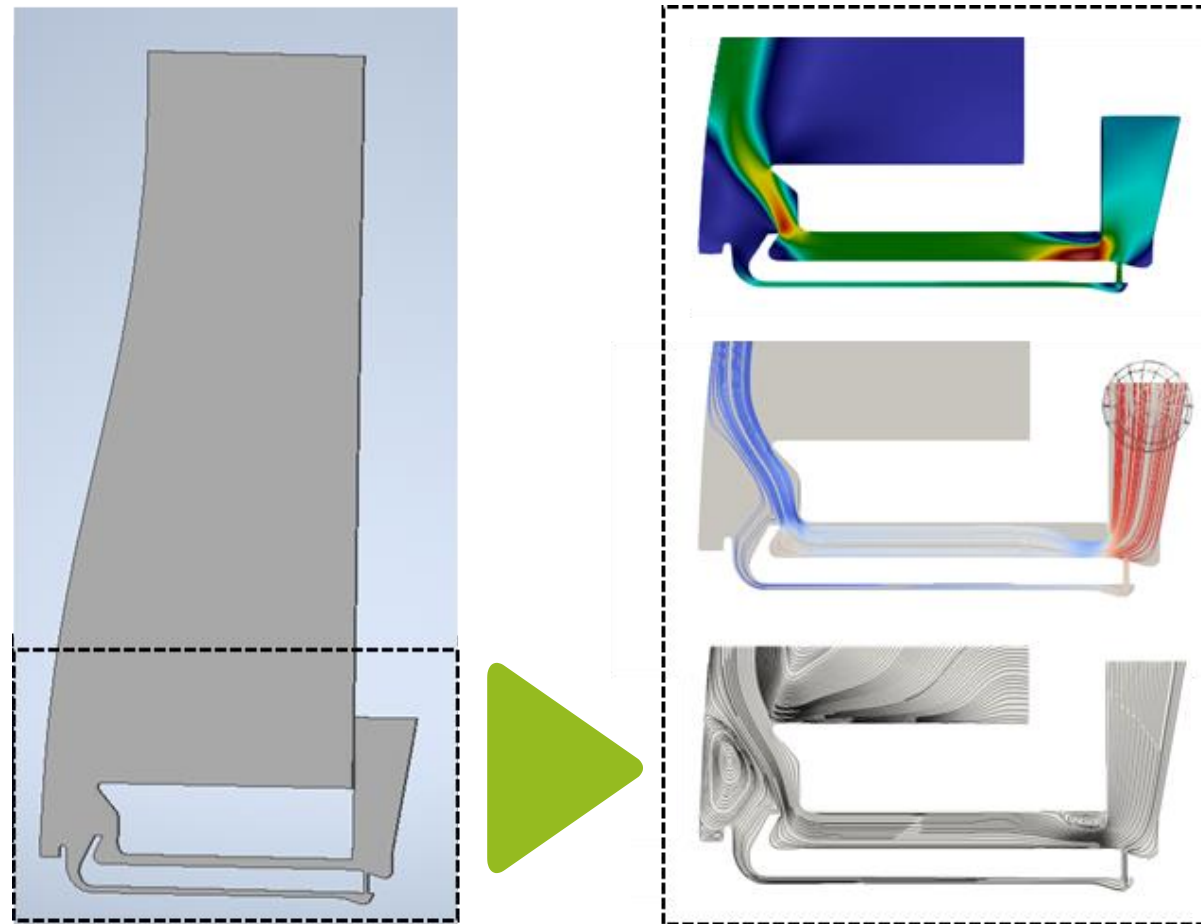
Für das Turbulenzmodell wurden die Parameter $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $C_3 = 0$, $C_{\mu} = 0,09$ und $\sigma_\varepsilon = 0,76923$ nach [LS73] angenommen.

Um die oben genannten Gleichungen zu diskretisieren, wird die Finite-Volumen Methode angewendet. Dazu wird der SIMPLE-Algorithmus (Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations-Algorithmus) nach *Patankar* und *Spalding* [PS71] in der konsistenten Variante SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent) nach *Van Doormal* and *Raithby* verwendet, um die Gleichungssysteme iterativ mit dem Solver (rhoSimpleFoam) zu lösen [DR84].

Der letzte Teilschritt, der Postprozessor, beinhaltet die Auswertung und Visualisierung der Simulationsergebnisse. Dazu wurde die quelloffene Software Paraview (Sandia National Laboratories, New Mexico, USA; Kitware Inc, New York, USA; Los Alamos National Laboratory, Indiana, USA) verwendet. Die Stromlinien werden daraufhin in mathematische Funktionen überführt, welche es erlauben, die simulierten Stromlinien als einen Funktionsgraphen zu plotten (siehe Kapitel 5.3.3). Zur Validierung dieser Strömungslinien wurden praktische Versuche durchgeführt.

Nach der erfolgreichen Implementierung der Simulationsumgebung wurden erste Strömungssimulation durchgeführt. In einem ersten Schritt galt es herauszufinden, welche Darstellung die Kühlluftströmung am geeignetsten visualisiert und gleichzeitig einen guten Abgleich mit realen Nebelversuchen erlaubt. In Bild 7.2 sind daher Simulationsergebnisse mit drei verschiedenen Darstellungsfiltren für den unteren Bereich der Schlauchbildungszone inklusive des Doppellippenkühlrings dargestellt. Das obere Bild zeigt die Gesamtkühlluftströmung, inklusive der lokal vorherrschenden Kühlluftgeschwindigkeiten (farblich markiert). Im mittleren Bild ist die Methode des „Particle Tracking“ angewendet, welches die Gesamtkühlluft auf einzelne Strömungslinien aufteilt. Diese Darstellung erlaubt eine genauere Visualisierung der Kühlluftströmung, da insbesondere Bereiche, in welchen eine Kompression stattfindet oder Totzonen herrschen, sichtbar gemacht werden können. Das untere Bild wird neben der Darstellung der Gesamtkühlluftströmung um die Strömungslinien der Umgebungsluft erweitert. Für die weiteren Versuche wird die mittlere Darstellung mit einer Erweiterung der Totzonengebiete kombiniert.

Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Darstellungsfilttern



Die Simulationsergebnisse werden für die Auswertung bis zu einer bestimmten konstanten "Integration-Time" analysiert, wodurch sehr lange verweilende Partikel nicht weiter betrachtet werden.

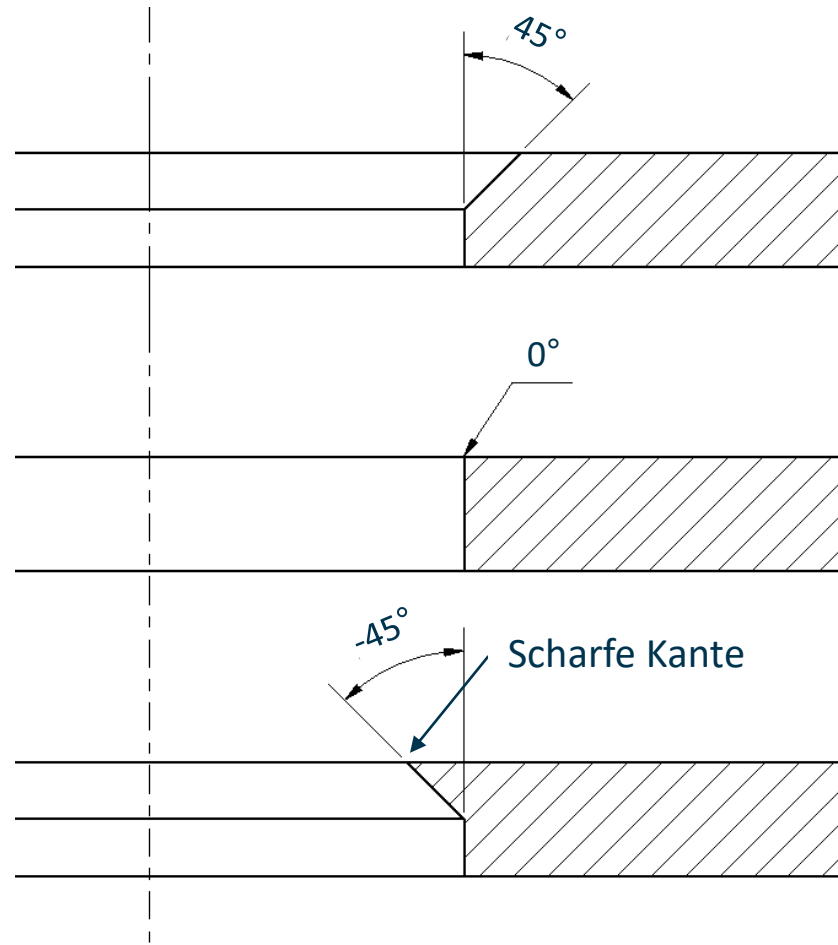
In den ersten Simulationen wurde die Folienblase als feststehende Wand angenommen. Auf Wunsch des projektbegleitenden Ausschusses wurde diese Annahme noch einmal angepasst, sodass eine Abzugsgeschwindigkeit der Folienblase vorgegeben werden kann, um den realen Prozess mit einer höheren Genauigkeit simulieren zu können. Die Abzugsgeschwindigkeit wurde für alle Simulationen mit 8 m/s konstant gehalten. Für die Bewertung des Einflusses der Lippengeometrie auf die Ausbildung der Kühlluftströmung und Verbesserung der Wärmeabfuhr wurden verschiedene Lippendesigns simulativ untersucht. Bei dem verwendeten Doppel-lippenkühlring ist die Geometrie, welche den unteren Luftstrom nach unten abschließt, nicht änderbar (siehe Kap. 5.2.3), sodass die Geometrie zwischen den Luftströmen als untere Lippe und die Geometrie oberhalb des oberen Luftstroms als obere Lippe bezeichnet wird. Die Auswahl der Lippengeometrien erfolgte unter Berücksichtigung des Coanda-Effekts sowie den von anderen Forschergruppen durchgeführten Simulationen, in denen ein stehender Wirbel zu sehen ist (siehe Kap. 3.4.1 und 3.4.2). Die verwendeten Lippengeometrien für die obere Lippe sind als Prinzipskizze auf Bild 7.3 links zu sehen. Für diese Lippe werden die drei Austrittswinkel -45° , 0° und $+45^\circ$ (negative Winkel zeigen zur Blase hin) ausgewählt. Die verwendeten Lippengeometrien für die untere Lippe sind als Prinzipskizze auf Bild 7.3 rechts zu sehen. Für diese Lippe werden die drei Austrittswinkel -30° , 0° und 30° (negative Winkel zeigen auch hier zur Blase hin) ausgewählt.

Die Simulationsergebnisse wurden wie bereits beschrieben visualisiert. In einem zweiten Schritt wurden die Kühlluftvisualisierung als Bilder visualisiert verglichen und mit Hilfe des in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Matlab-Tools die auftretende Strömungsfläche berechnet, sodass Fotos der Nebelversuche sowie Simulationsergebnisse gleichbehandelt werden. Die ermittelten Strömungsflächen in Abhängigkeit der Lippengeometrie sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

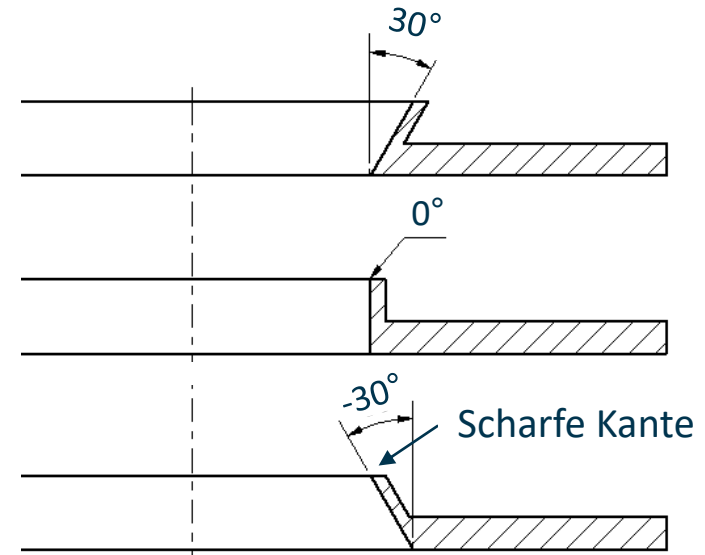
Lippengeometrie		Strömungsfläche [mm ²]
oben	unten	
0	0	5876
45	0	6105
0	30	5623
45	30	6069
0	-30	6791
-45	0	5592
-45	-30	6779

Tabelle 7.2: Strömungsflächen bei Einsatz unterschiedlicher Lippengeometrien

Prinzipskizzen der oberen und unteren Lippengeometrie



Obere Lippe



Untere Lippe

In Bild 7.4 sind als beispielhafter Vergleich die Simulationsergebnisse der Lippenkombination (-45/0) mit der geringsten Strömungsfläche und der Lippenkombination (0/-30) mit der größten Strömungsfläche dargestellt.

Die praktischen Versuche zur Überprüfung der Simulation wurden mit der starren additiv gefertigten Schlauchbildungzone in Kurzhalsfahrweise durchgeführt. In dieser Versuchsreihe wurden die Strömungslinien der Kühlluft in Abhängigkeit verschiedener Lippengeometrien untersucht. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 7.3 ersichtlich. Der Vorteil einer starren Blasengeometrie liegt im schnellen Anfahren der unterschiedlichen Versuchspunkte. Im realen Extrusionsprozess führt jede Änderung eines Parameters zu einer Veränderung der Blasengeometrie, sodass durch die starre Geometrie in gleicher Zeit wesentlich mehr Versuchspunkte überprüft werden können.

Versuchsbedingung	Einheit	Wert
Typus der additiv gefertigten Folienblase	[-]	Kurzhalsfahrweise
BUR der additiv gefertigten Folienblase	[-]	2,8
Gebläseleistung	[%]	75
Öffnungsweite Doppellippe	[mm]	15
Geometrie obere Lippe	[°]	0 / 45 / -45
Geometrie untere Lippe	[°]	0 / 30 / -30

Tabelle 7.3: Versuchsparameter der Validierungsversuche unter Nebelinsatz

Die optische Aufnahme erfolgt über das in die Blasfolienanlage integrierte Kamerastativ und die bereits vorgestellte digitale Spiegelreflexkamera. Die Analyse der Querschnittsfläche erfolgt mit Hilfe des in Kap. 5.3.3 vorgestellten Matlab Tools.

Bild 7.5 zeigt zwei Bilder, wobei auch hier wieder jeweils das linke Bild gespiegelt ist. Diese Bilder bilden die gleichen Lippengeometrien wie die Simulationen in Bild 7.4 ab. In den gezeigten Bildern sowie auf allen anderen in diesem Versuchsplan angefertigten Bildern ist zu erkennen, dass der erste Coanda-Effekt, welcher in den Simulationen anderer Forschergruppen zu einem von der Blase weg gerichteten Kühlluftstrom unmittelbar oberhalb des Doppellippenkühlrings führt, an der betrachteten Anlage mit dem gefertigten Nebelversuchsstand nicht beobachtet werden kann. Zu erwarten wäre ein Anlegen des Nebels an die Lippe durch den ersten Coanda Effekt und damit entstehenden Wirbel im unteren Bereich. Dieser Wirbel sollte daraufhin die Strömung von der Blase ablenken und durch den zweiten Coanda-Effekt wieder zur Blase leiten. Die Nebelversuche zeigen diese Effekte nicht und können daher auf eine nicht

Simulationsergebnisse zweier Lippengeometriekombinationen

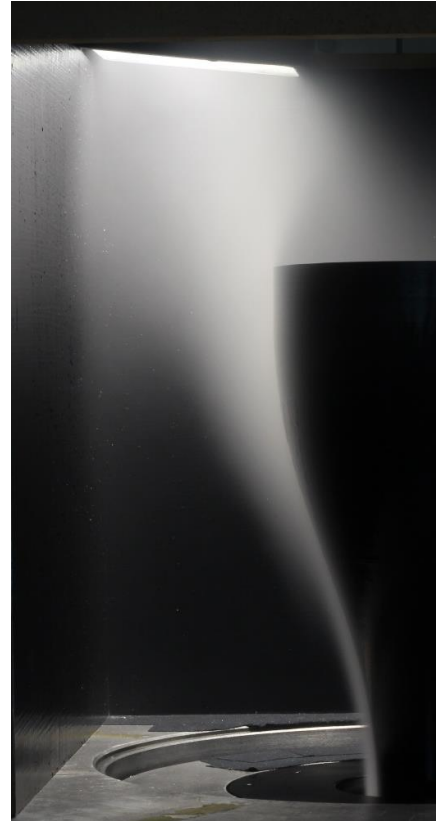


Obere Lippe : -45°
Untere Lippe : 0°
Strömungsfläche : 5592 mm^2

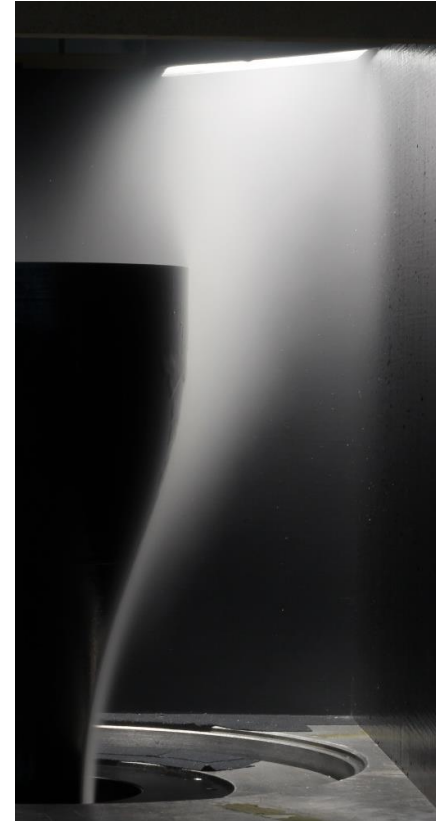


Obere Lippe : 0°
Untere Lippe : -30°
Strömungsfläche : 6791 mm^2

Nebelergebnisse zweier Lippengeometriekombinationen



Obere Lippe : -45°
Untere Lippe : 0°
Strömungsfläche : 6195 mm^2



Obere Lippe : 0°
Untere Lippe : -30°
Strömungsfläche : 7559 mm^2

optimale Eignung der Nebelversuche hinweisen. Dies ist möglicherweise auch auf die unzureichende Detailgenauigkeit der Nebelmethode zurückzuführen.

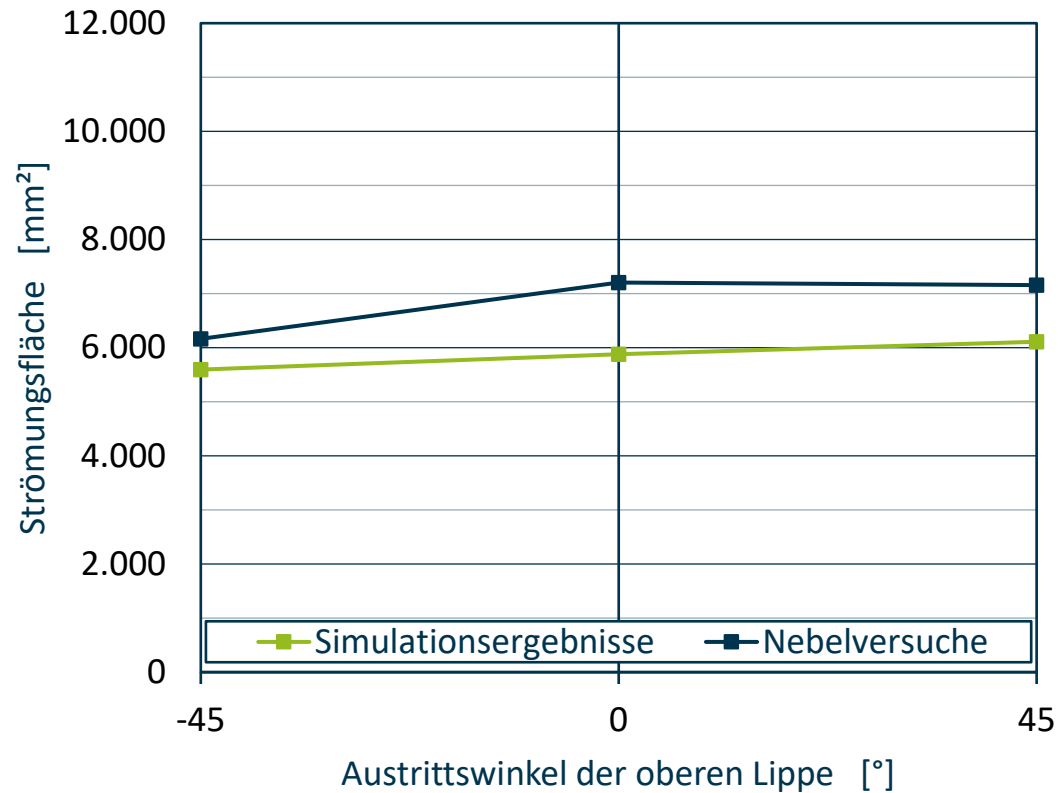
Daher können die Simulationen anderer Forschergruppen an dieser Stelle weder bestätigt noch verworfen werden. Der Coanda-Effekt führt hingegen in den im Vorhaben durchgeführten Versuchen zu einem Haften der Kühlluftströmung an der Folienblase. Alle Kühlluftströmungen sehen qualitativ sehr ähnlich aus, sie unterscheiden sich lediglich in Ihrer Breite, sodass der qualitative Verlauf der Nebelkontur aufgrund des fehlenden stehenden Wirbels kein Qualitätsmerkmal der Kühlluftströmung darstellt und daher nicht weiter betrachtet wird.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Validierungsuntersuchungen zeigt, dass die Simulation eine Visualisierung der Kühlluftströmung abbilden kann und die Simulationen die Realität zumindest in Bezug auf die Nebelflächen in Ansätzen abbilden kann. In Bild 7.6 sind die Nebelflächen der Simulationsergebnisse in grün und die Validierungsergebnisse über die Lippengeometrien aufgetragen. Die Ergebnisse der oberen Lippe zeigen nur geringe Abweichungen. Bei den Effekten der unteren Lippe auf die Strömungsflächen ergeben sich leichte Unterschiede, die einerseits auf die benutzte Nebelmethode zurückzuführen sind. Nach dem Austreten des Nebels aus der additiv gefertigten Nebellanze wird dieser durch die Rauheit des Materials und dadurch ergebenen Turbulenzen schnell diffus, wodurch sich Ungenauigkeiten in der Erfassung ergeben. Andererseits ergeben sich durch die getroffenen Randbedingungen der Simulationsumgebung sowie des Turbulenzmodells weitere Abweichungen. Weiterhin wird in den Simulationen der Einfluss der Umgebungsluft auf die Strömung nicht berücksichtigt, welche in den Nebelversuchen stark interferiert.

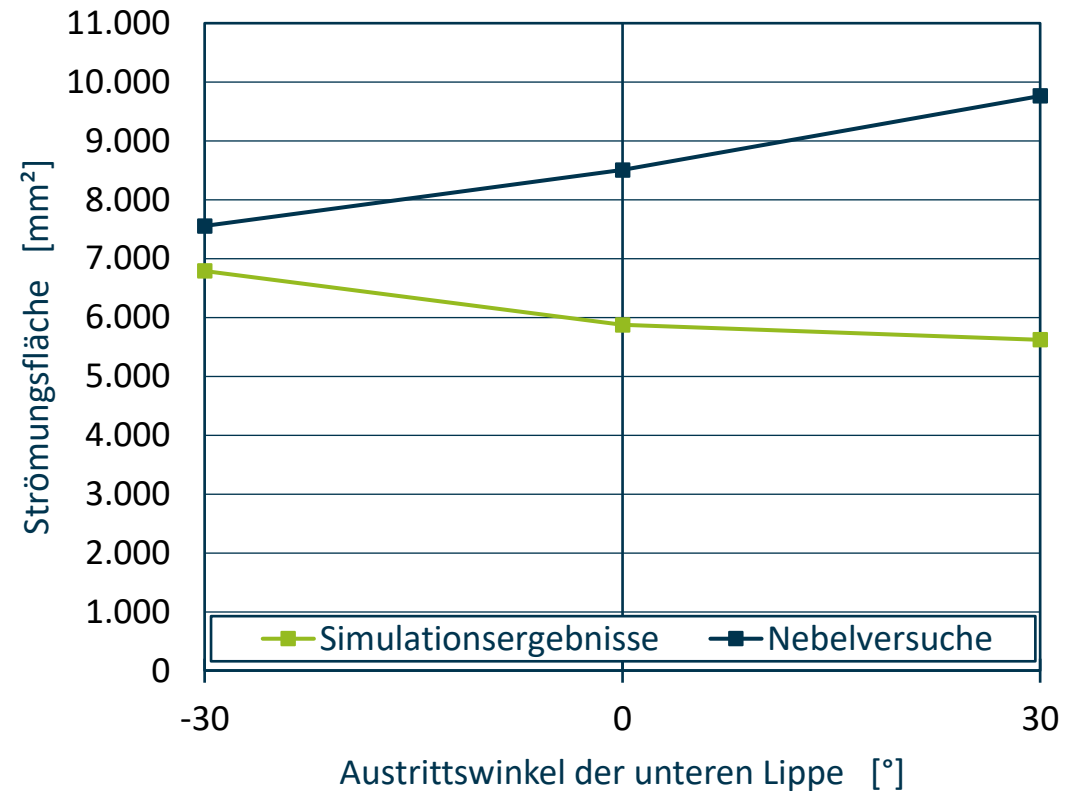
Der Einfluss der oberen Lippengeometrie ist auf Bild 7.6 links zu sehen. Die untere Lippe entspricht der 0° Geometrie und verändert sich nicht. Die Ergebnisse der Simulationen und der Nebelversuche zeigen die gleichen Tendenzen. Bei zur Blase hingewandter Geometrie (-45°) wird die Kühlluftströmung an die Blase herangedrückt. An der scharfen Hinterkante der Lippengeometrie reißt die Strömung vermutlich ab und die Kühlluftströmung legt sich aufgrund des Coanda-Effekts an die Blasengeometrie an. Bei von der Blase weg gerichteter Geometrie ($+45^\circ$) ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt, da der Abstand zwischen Blasengeometrie und Lippengeometrie größer und eine scharfe Hinterkante nicht vorhanden ist. Daher ist die Kühlluftströmung breiter als bei zur Blase hingewandter Geometrie. Die Lippengeometrie 0° erreicht bei den Simulationsergebnissen einen mittleren Wert und bei den Nebelversuchen den höchsten Wert. Dies könnte auf die fehlende Führung der Kühlluft im oberen Bereich zurückzuführen sein.

Der Einfluss der unteren Lippengeometrie ist auf Bild 7.6 rechts zu sehen. Die obere Lippe entspricht der 0° Geometrie und verändert sich nicht. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Nebelversuchen ergibt sich bei der unteren Lippengeometrie eine unterschiedliche

Vergleich der Strömungsfläche aus den Nebelversuchen und der Simulationen



Obere Lippe konstant bei 0°



Untere Lippe konstant bei 0°

Tendenz. In Simulation und Experiment sorgt die zur Blase hingerrichtete Geometrie für ein „Herandrücken“ der Kühlluftströmung an die Blase. Durch die scharfe Hinterkante der Lippengeometrie bei -30° reißt die Strömung vermutlich ab und die Kühlluftströmung legt sich aufgrund des Coanda-Effekts an die Blasengeometrie an.

Bei den Nebelversuchen und der von der Blase weg gerichteter Geometrie $+30^\circ$ ist dieser Effekt nicht so stark ausgeprägt und die Kühlluftströmung ist breiter als die Strömung der zur Blase hingerrichteten Geometrie. Bei den Simulationsergebnissen ergibt sich für die von der Blase weg gerichtete Geometrie eine deutlich schmalere Kühlluftströmung. Hierbei legt sich die Strömung erst an die Lippe und richtet sich nach außen. Die Abrisskante sowie der entstehenden Wirbel im unteren Bereich, welcher in den Simulationsergebnissen zu erkennen ist, führt die Strömung dazu, sich eng an die Blase zu legen. Damit wird eine hohe Strömungsgeschwindigkeit mit hohem Wärmeabfuhr erreicht. Das entspricht den Simulationsergebnissen nach *Sidiropoulos und Vlachopoulos*, bei denen aus dem stehenden Wirbel eine Steigerung des konvektiven Wärmeentzugs aufgrund einer Verdichtung der Strömungslinien nach dem Zurückprallen erzeugt wird (siehe Kapitel 3). Die auftretenden Unterschiede wurden in den nachfolgenden Kapiteln mittels „echter“ Blase weiter überprüft und ebenfalls mit den auftretenden optischen sowie mechanischen Eigenschaften der hergestellten Folien verglichen.

Die Simulation ermöglicht eine Visualisierung der Kühlluftströmung und zeigt auch das Auftreten des Coanda-Effektes und die Bildung eines stehenden Wirbels. Durch weitere Anpassungen, zu denen die Feinheit des Rechengitters, das benutzte Turbulenzmodell und das im Postprozess verwendete „ParticleTracking“ zählen, könnte die Genauigkeit weiter gesteigert werden. Die benutzte Validierungsmethode zur Bewertung der Simulationengenauigkeit zeigt ihre Schwächen in der detailgenauen Auflösung der Strömungslinien, wodurch die mögliche Entstehung von Wirbeln nicht untersucht werden kann. Die Ermittlung der entstehenden Nebelflächen ermöglicht eine Abschätzung der Kühlleistung benötigt jedoch weitere Anpassungen, um eine genauere Übereinstimmung mit den Simulationen ziehen zu können.

8 UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER AUF DIE NEBELFLÄCHE MIT ADDITIV GEFERTIGTER FOLIENBLASE

Nach Überprüfung des Simulationsmodells wurde mit der Methode der „additiv gefertigten“ Blase eine Variation der Prozessparameter BUR und Gebläseleistung bei einer PE-LLD Blase und einer PE-HD untersucht. Hierfür wurde auf Basis der Ergebnisse der vorherigen Nebelversuche zwei Lippengeometrien ausgewählt. Dabei handelt es sich um die Kombination (-45/-30), welche im Experiment die geringste Nebelfläche erzeugt hat und die Kombination (45/30) mit der größten Nebelfläche. Das Aufblasverhältnis, die Gebläseleistung sowie die Geometrie-kombination der Doppellippe zweistufig variiert. Zur optimalen Abbildung der Effekte auf die Nebelfläche wurde dieser Versuchsplan vollfaktoriell durchgeführt. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 8.1 zu erkennen.

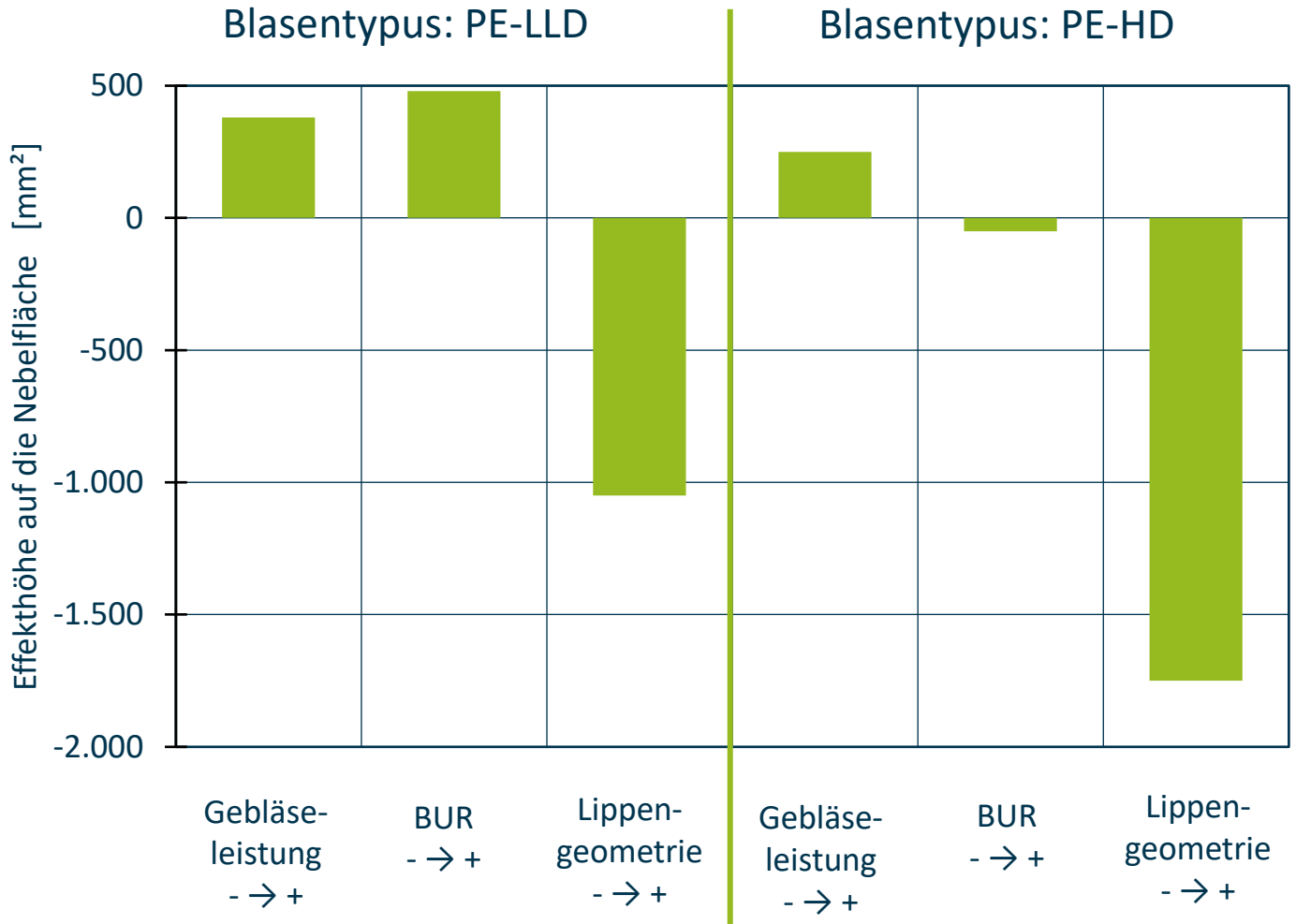
Einflussgrößen	Einheit	Art	Variation	
			PE-LLD	PE-HD
Typus der additiv gefertigten Folienblase	[-]	Steuergröße	PE-LLD	PE-HD
BUR der additiv gefertigten Folienblase	[-]	Steuergröße	2,4	3,2
Gebläseleistung	[%]	Steuergröße	50	100
Geometrie-kombination der Doppellippe	[°]	Steuergröße	-45/-30	45/30

Tabelle 8.1: Versuchsparameter der Untersuchung hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Prozessparameter mit additiv gefertigter Folienblase

Die Effektdiagramme (Bild 8.1) zeigen den Einfluss der Prozessparameter auf die Nebelfläche. Der Effekt beschreibt die Steigerung der Nebelfläche bei Erhöhung des Prozessparameters um einen Normschritt, also beispielsweise der Gebläseleistung von 50 % auf 75.

Die Erhöhung der Gebläseleistung hat sowohl unter Verwendung eines PE-LLD-Typus (Bild 8.1/links) als auch eines PE-HD-Typus (Bild 8.1/rechts) keine signifikante Auswirkung auf die Nebelfläche. Dies widerspricht den Simulationen von *Sidiropoulos und Vlachopoulos*, welche bei einer Erhöhung des Volumenstroms eine Verstärkung des Coanda-Effekts und somit eine Vergrößerung des Strömungsfeldes und des stehenden Wirbels vorhersagen. In diesem Versuchsstand ist dieser stehende Wirbel allerdings nicht zu sehen (siehe Kap. 7). Eine Erhöhung der Gebläseleistung wird im Realprozess allerdings zu einer höheren Strömungsgeschwindigkeit führen, die auch einen höheren Massedurchsatz ermöglicht. Wird die Blasengeometrie bei Verwendung eines PE-LLD-Typus (Bild 8.1/links) vergrößert, so erhöht sich die Nebelfläche signifikant, da die Kühlluftströmung durch das größere Aufblasverhältnis im betrachteten Bereich von 40 mm bis 320 mm ab Werkzeugaustritt eine längere Wegstrecke entlang der Blasenkontur zurücklegen muss. Unter Verwendung eines PE-HD-Typus (Bild 8.1/rechts) führt die Variation zu keiner signifikanten Änderung, da die Blasengeometrie

Effekte auf die Nebelfläche bei einer PE-LLD und einer PE-HD Blasengeometrie



hier erst im obersten Fünftel des betrachteten Bereichs (ab 260 mm) variiert wird. Für den Prozess mit „echter“ Blase ist jedoch zu beachten, dass eine Steigerung des Aufblasverhältnisses die zur Wärmeabgabe zur Verfügung stehende Fläche vergrößert, sodass eine Steigerung des Wärmeentzugs und damit des Massedurchsatzes zu erwarten ist. Die Änderung der Lippengeometrie zu von der Blase weg zeigenden Formen zeigt die erwartete Vergrößerung der Nebelfläche, welche schon in den Validierungsversuchen beobachten werden konnte.

9 UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER UND DER DÜSENLIPPENGEOMETRIE AUF DIE NEBELFLÄCHE SOWIE OPTISCHEN UND MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN

In einem ersten Schritt wurden für die Ermittlung einer Datenbasis und Bestätigung bestehender Literatureffekte Untersuchungen des Einflusses der Prozessparameter auf die Nebelfläche bei laufendem Prozess und „echter“ Folienblase und die daraus resultierenden Folieneigenschaften durchgeführt. Im zweiten Schritt wurde daraufhin der Einsatz verschiedener Düsenlippengeometrien auf die Änderung der Kühlleistung und Folieneigenschaften untersucht. Mit diesen Untersuchungen wurden verschiedene Anströmbedingungen der Folienblase bewertet.

9.1 Einfluss der Prozessparameter

Für die Versuchsdurchführung wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Variationsstufen und Zentralpunkt verwendet. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 9.1 aufgelistet.

Einflussgrößen	Einheit	Art	Variation	
Material	[-]	Steuergröße	PE-LD	
BUR	[-]	Steuergröße	2,4	2,8
Gebläseleistung	[%]	Steuergröße	50	75
Schmelzetemperatur	[°C]	Steuergröße	180	200

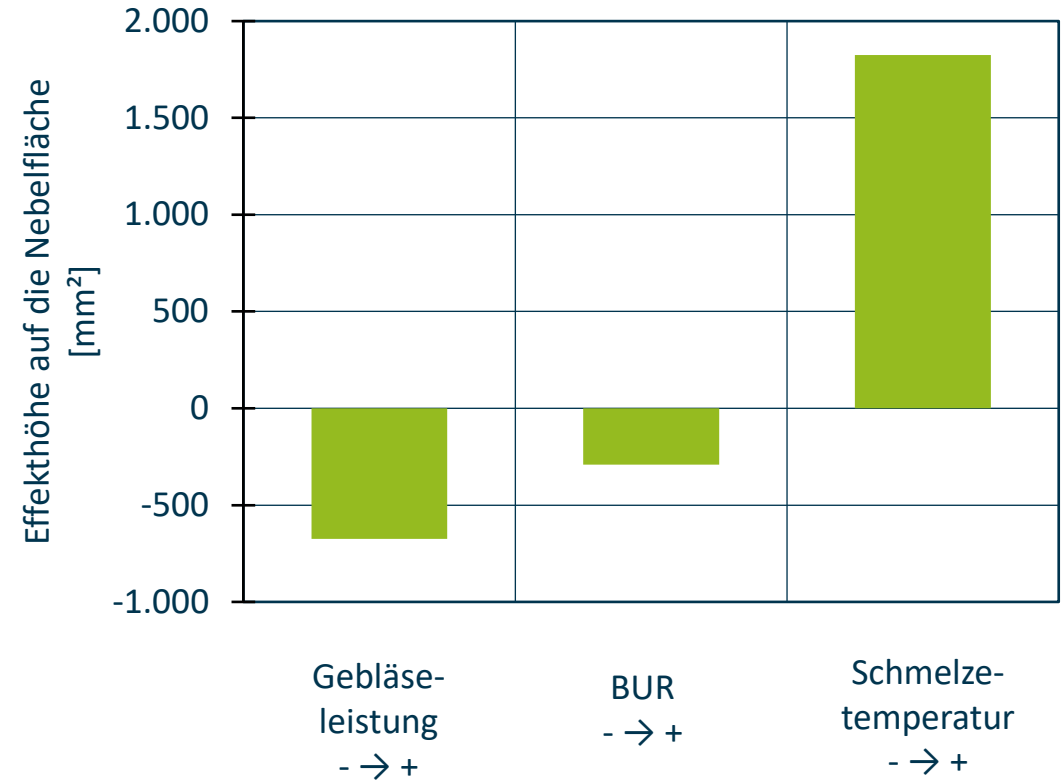
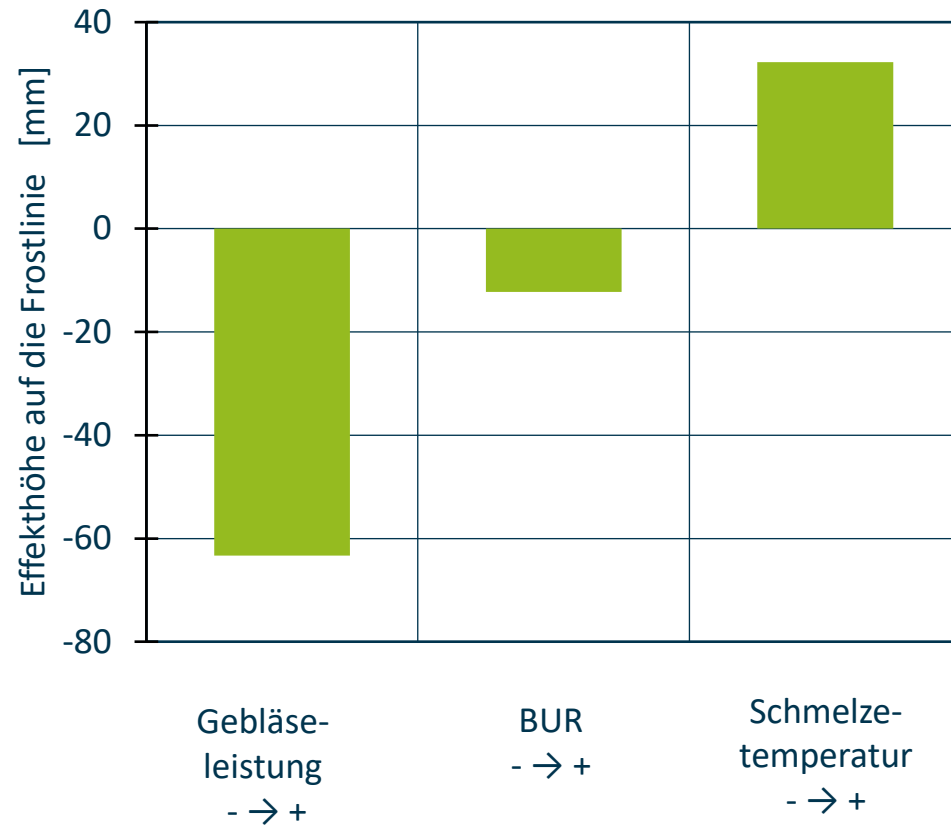
Tabelle 9.1: Versuchsparameter der Untersuchung hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Prozessparameter im Extrusionsversuch

Als Zielgrößen wurden neben der Frostlinienhöhe und der Nebelfläche (welche die Höhe der Kühlleistung charakterisieren) in dieser Versuchsreihe auch die optischen und mechanischen Eigenschaften der Folie in Abhängigkeit von den Prozessparametern analysiert. Als Lippengeometrie wurde dabei ausschließlich die bereits im vorherigen Kapitel verwendete Geometrie (-45/-30) verwendet. Das Ziel dieser Versuchsreihe besteht in der Bestätigung schon in der Literatur bekannter Effekte unter Einsatz der Nebelmethode. Somit kann diese weiter validiert werden und mögliche Abweichungen erkannt werden.

Im Folgenden werden nur die Effekte mit einem signifikanten Einfluss vorgestellt. Die Analyse der Bruchspannung und des E-Moduls mit Hilfe des Zugversuchs und der Dickenschwankung der extrudierten Folie ergaben bei der Variation der Prozessparameter keine signifikante Ergebnisse. Somit besteht bei dieser Variation kein Einfluss auf die Bruchspannung, das E-Modul sowie die Dickenschwankung.

Die Effektdiagramme in Bild 9.1 zeigen die Einflüsse der Prozessparameter Gebläseleistung, BUR und Schmelzetemperatur auf die Frostlinie (links) und die Nebelfläche (rechts). Die Er-

Effekte auf die Frostlinie und der Nebelfläche bei Variation der Prozessparameter



gebnisse zeigen, dass die Nebelquerschnittsfläche als Substitution der Breite der Kühlluftströmung eingesetzt werden kann und eine geringe Nebelfläche auf eine günstige Kühlung weist. Diese führt wiederum zu einer geringeren Frostlinie bzw. höheren Massedurchsatz. Die Ergebnisse der Analyse der mechanischen Eigenschaften bezüglich Längsschrumpf und Bruchdehnung in Längsrichtung sind in Bild 9.2 dargestellt. Die Bruchdehnung (9.2 links) nimmt durch eine Steigerung der Gebläseleistung und dadurch schneller einfrierenden Orientierung leicht ab. Dies ist ebenfalls durch den höheren Längsschrumpf (9.2 rechts) gekennzeichnet. Durch eine Steigerung des BUR und der Schmelzetemperatur wird die Bruchdehnung erhöht und der Längsschrumpf reduziert. Dies ist ebenfalls auf die geringeren Orientierungen durch die horizontale Verstreckung bei höheren BUR und der höheren Frostlinie bei höherer Schmelzetemperatur zurückzuführen. Neben den mechanischen Eigenschaften ist auch die Optik von großer Bedeutung, das zugehörige Effektdiagramm ist in Bild 9.3 dargestellt. Die Effekte auf die Trübung der Folie (Bild 9.3 links) ergibt bei Steigerung des BUR einen geringen negativen Effekt, der auf die größere Kühlfläche der Folie und somit höhere Wärmeabfuhr zurückzuführen ist. Bei einer Erhöhung der Gebläseleistung erhöht sich der Massedurchsatz, wodurch die Scherbelastung in der Schmelze erhöht wird und sich in einer höheren Trübung widerspiegelt [Krau21]. Derselbe Effekt liegt bei einer geringeren Schmelzetemperatur vor. Die Schmelzetemperatur zeigt keinen Einfluss auf den Glanz (siehe Bild 9.3). Die Erhöhung der Gebläseleistung und somit schnelle Wärmeabfuhr wirkt sich negativ auf den Folienglanz aus. Ein positiver Effekt wird durch die Steigerung des BUR erreicht, was im Zusammenhang mit der stärkeren Verstreckung der Folie im schmelzeförmigen Zustand steht.

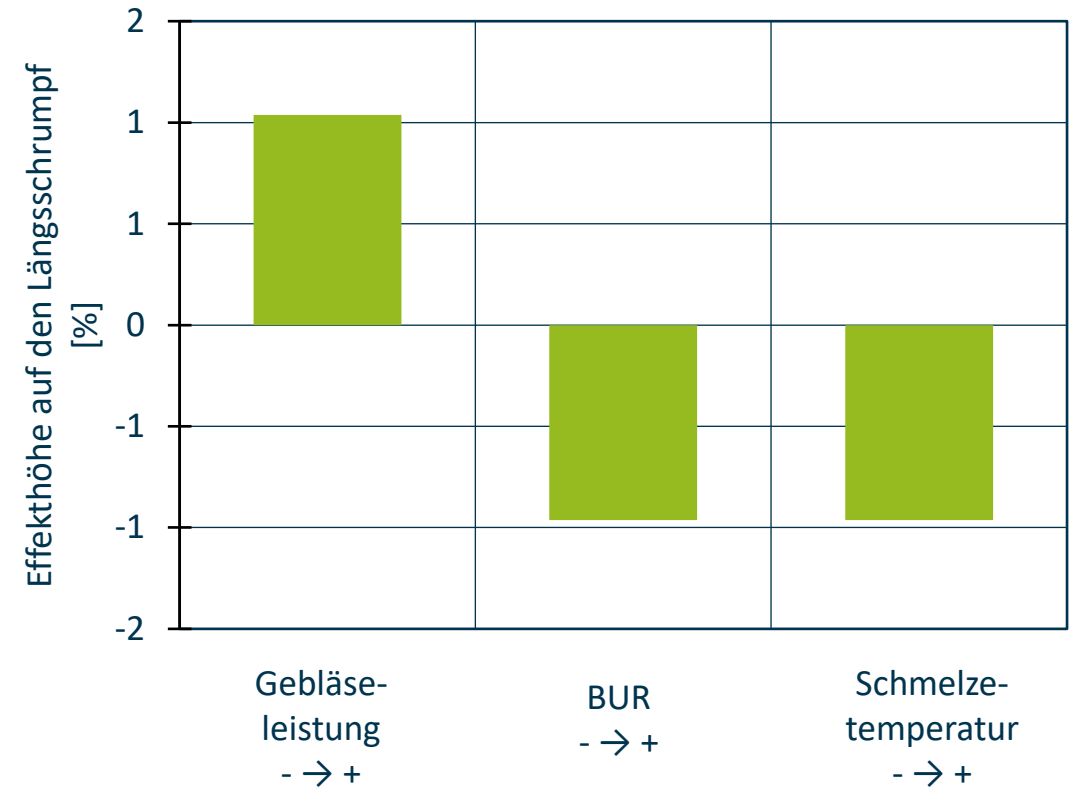
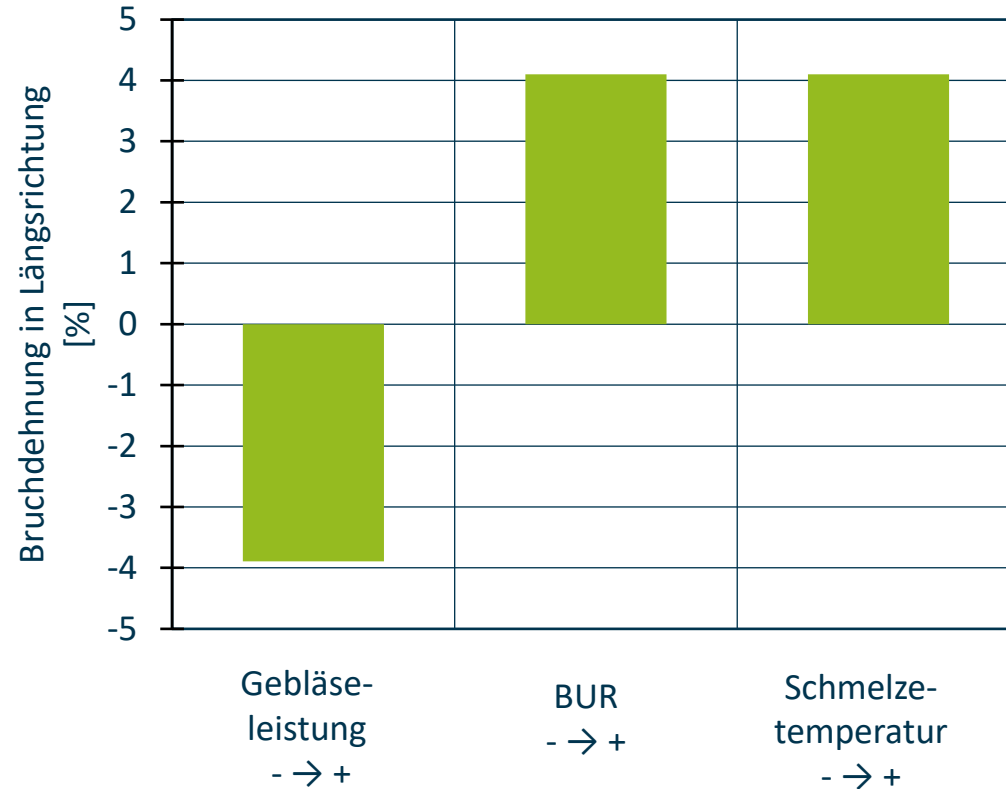
9.2 Einfluss der Düsenlippengeometrie

Die Düsenlippengeometrie nimmt einen großen Einfluss auf die Folieneigenschaften sowie auf die Kühlleistung des Doppellippenkühlrings. Für eine ideale Kühlung der Folienblase ist diese Untersuchung essenziell. Für die Versuchsdurchführung wurde ebenfalls für jede Düsenlippenkombination ein vollfaktorierter Versuchsplan mit zwei Variationsstufen und Zentralpunkt verwendet. Die Versuchsparameter wurden dabei konstant zu den vorherigen Untersuchungen (Tabelle 9.1) gehalten. Die in den Simulationen genutzten Lippenkombinationen wurden in reduzierter Anzahl für die Versuche mit laufendem Extrusionsprozess verwendet. Um mittels Versuchsplan Effekte der Lippengeometrie nachweisen zu können, werden die untere und obere Lippe untersucht. Es ergaben sich drei Geometriekombinationen, die in Tabelle 9.2 dargestellt sind.

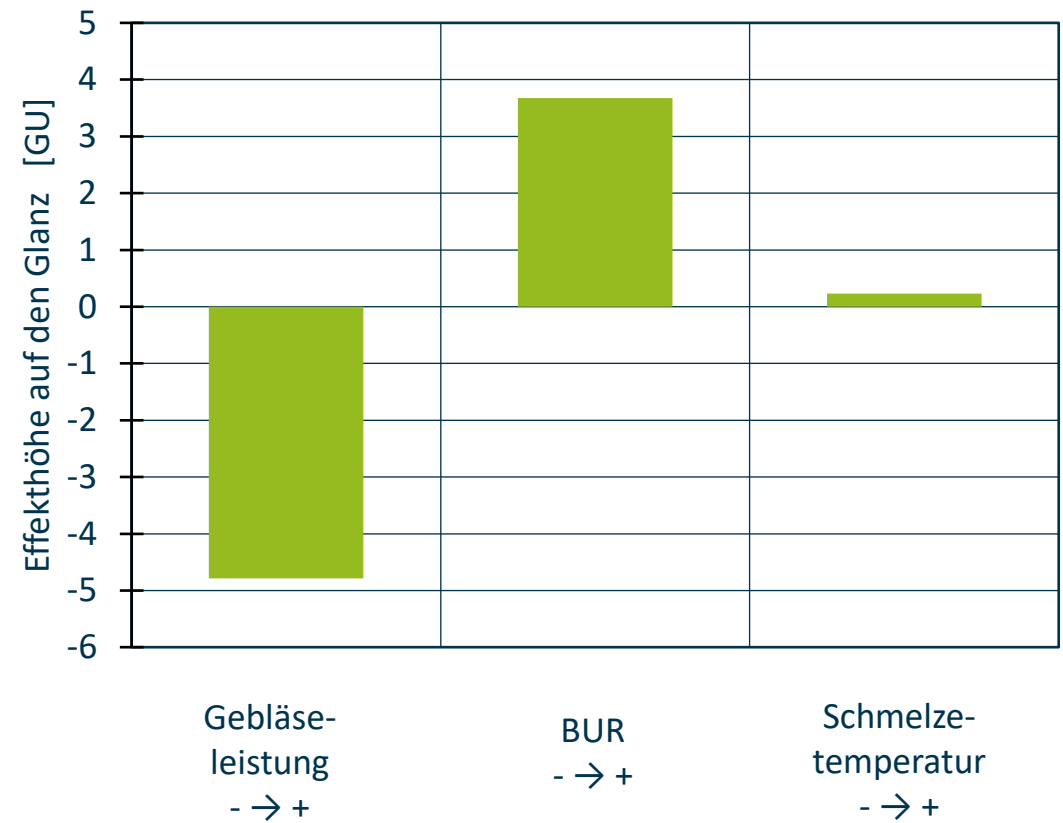
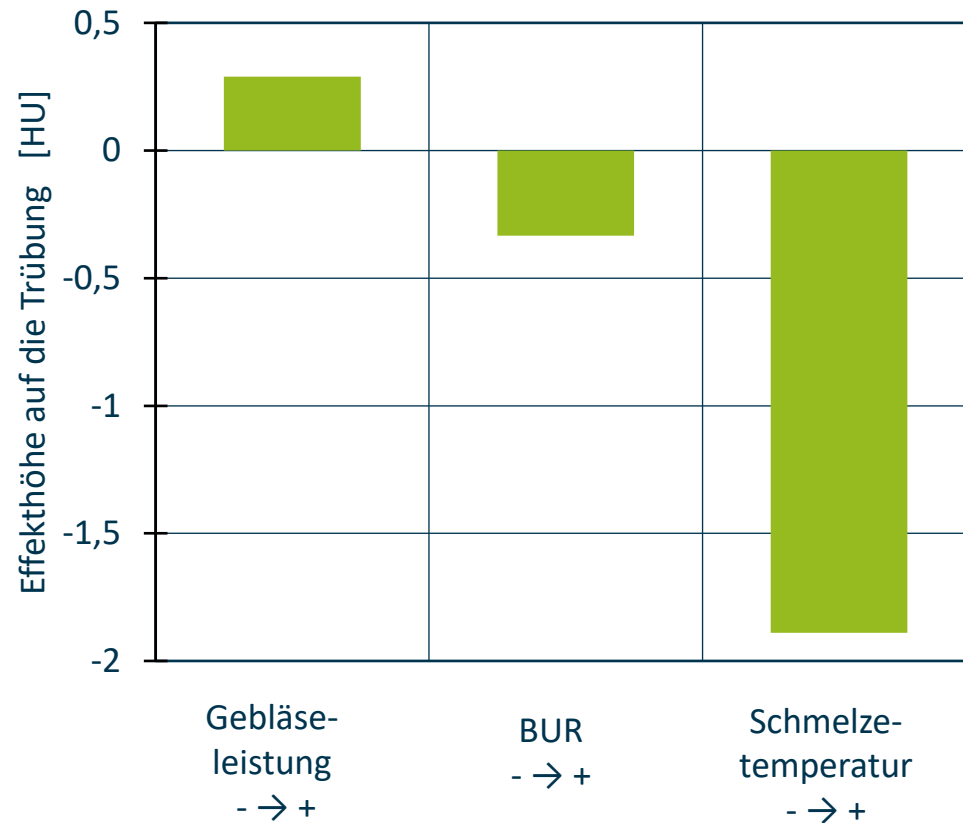
Lippengeometriekombinationen [°]		
A	B	C
45/30	0/0	-45/-30

Tabelle 9.2: Lippengeometriekombinationen der Untersuchung im Extrusionsversuch

Effekte auf die Bruchdehnung und den Längsschrumpf bei Variation der Prozessparameter



Effekte auf die Trübung und den Glanz bei Variation der Prozessparameter



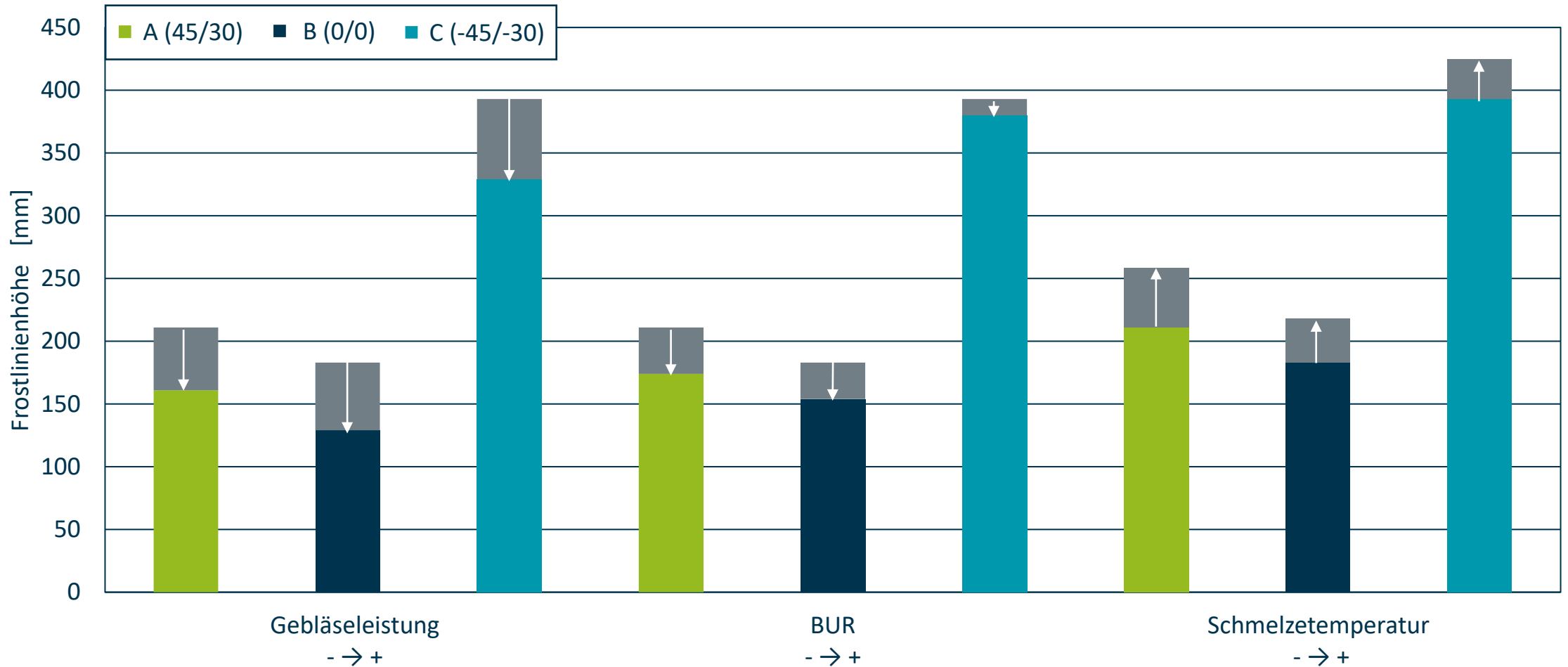
Die Analyse der Bruchspannung und des E-Moduls mit Hilfe des Zugversuchs und der Dicken-schwankung der extrudierten Folie ergaben bei der Variation der Lippengeometrie erneut keine signifikanten Ergebnisse.

In einem weiteren Schritt wurde die Änderung der Frostlinienhöhe bei Variation der drei Lip-pengeometrien sowie der Prozessparameter untersucht (siehe Bild 9.4). Die Prozessparameter entsprechen den Erwartungen aus Kapitel 8, dass eine Erhöhung der Gebläseleistung und des BUR die Kühlleistung erhöht. Eine Steigerung der Schmelztemperatur wirkt sich negativ auf die Frostlinie aus, da mehr Zeit benötigt wird, um die Folie bis zur Kristallschmelztemperatur zu kühlen. Bei der Betrachtung des Einflusses der unterschiedlichen Lippengeometrie ist die unterschiedliche Effekthöhe der Geometrien A-C bei Variation der Prozessparameter auffällig. Die zur Blase gerichtete Lippengeometrie (-45/-30) ermöglicht bei Erhöhung der Gebläselei-tung eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den anderen Lippengeometrien, indem die Frostlinie mehr als 15% sinkt. Dies bestätigt die Ergebnisse der Versuche mit additiv gefertigter Folienblase. Beim Prozessparameter BUR zeigen sich gegenläufige Effekte, die durch die sich ändernde Blasengeometrie begründet ist. Bei erhöhtem BUR ist der Blasendurchmesser größer und die nach außen gerichteten Lippengeometrien erweisen sich dabei als vorteilhaft, weil dies eine konturnahe Anströmung erfolgt und die Kühlluft sich parallel an die Folienblase anlegen kann. Der Unterschied der verschiedenen Lippengeometrien bei Variation der Schmelztempe-ratur sind marginal.

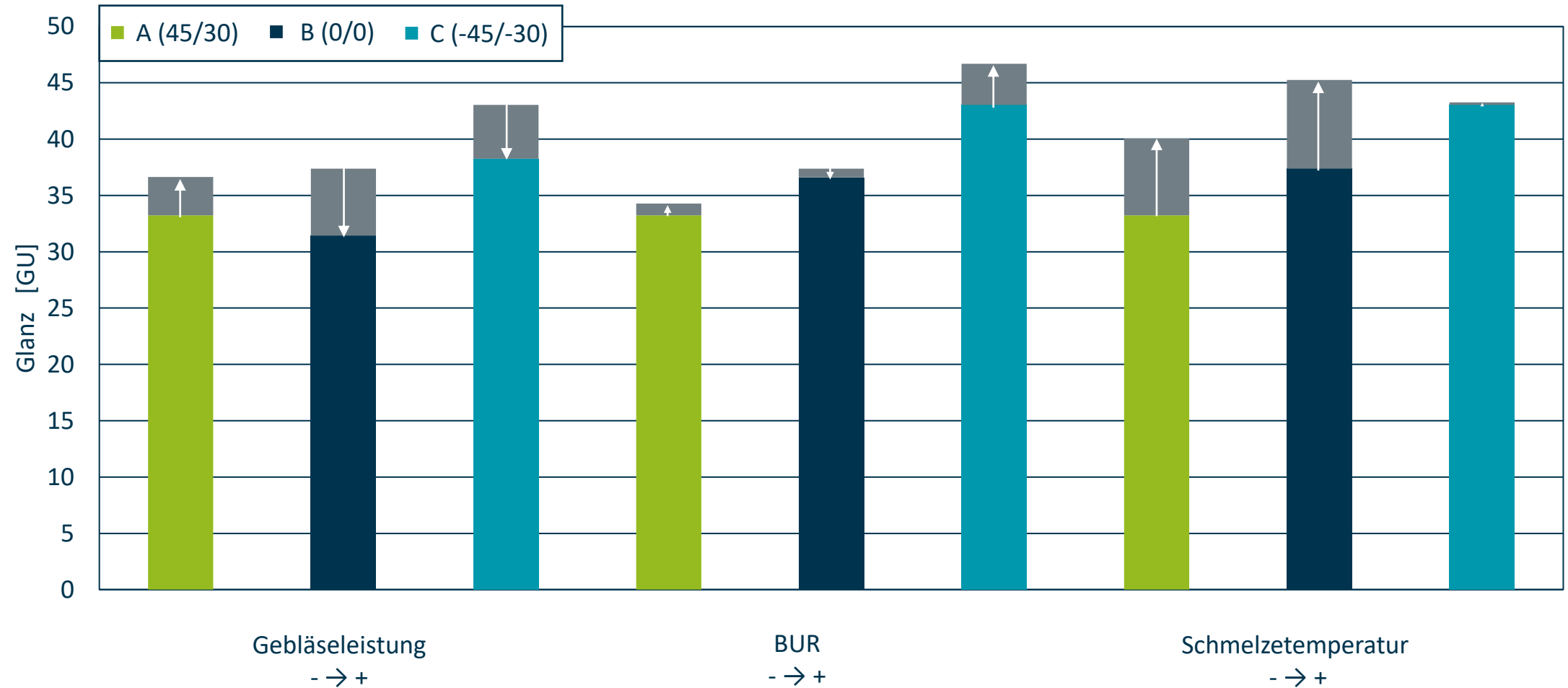
Der Einfluss der Lippengeometrien auf die mechanischen sowie optischen Eigenschaften zeigt wie bereits erwähnt keine signifikanten Effekte. Im Bild 9.5 ist die Änderung des Glanzes für die verschiedenen Lippengeometrien A, B und C dargestellt. Es lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. Durch Änderung der Lippengeometrien lässt sich die Frostlinie reduzieren. Dies lässt auf eine verbesserte Kühlung schließen. Die eingesetzte Nebelmethode zur Bestim-mung der Nebelfläche zeigt erneut die Schwächen in der detailgenauen Auflösung der Strö-mungslinien, wodurch die mögliche Entstehung von Wirbeln beziehungsweise des Coanda-Ef-fekts nicht untersucht werden kann.

In der Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter auf die Nebelfläche sowie optische und mechanischen Eigenschaften sind die erwarteten Effekte bestätigt worden. Jedoch ergab sich durch die Änderung der Lippengeometrie kein weiterer Einfluss auf die optischen sowie mechanischen Eigenschaften der hergestellten Blasfolie.

Effekte auf die Frostlinie bei Variation der Lippengeometrie



Effekte auf den Glanz bei Variation der Lippengeometrie



10 UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER UND DER DÜSENLIPPENGEOMETRIE AUF DEN MAXIMALEN MASSEDURCHSATZ

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Kühlluftströmung in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter und Lippengeometrien untersucht wurde, wird nun der Einfluss der Prozessparameter sowie Lippengeometrien auf den Massedurchsatz betrachtet. Hierfür werden Versuche mit „echter“ Blase durchgeführt und die Steigerung des Massedurchsatzes bei einer konstanten Frostlinienhöhe untersucht. Diese Untersuchung teilt sich in zwei Versuchsreihen auf, indem im ersten Schritt der Einfluss verschiedener Prozessparameter bei zwei Materialien auf den Massedurchsatz untersucht wurde. Hierbei wurden zwei Lippengeometriekombinationen auf Basis der vorherigen Untersuchungen festgelegt. Im zweiten Schritt wurde weiterhin der Einfluss verschiedener Lippengeometrien auf den Massedurchsatz ermittelt. Zur Ermittlung des Massedurchsatzes wird die Frostlinie bei PE-LLD auf konstant 360 mm, bei PE-HD auf 620 mm und bei PE-LD auf 250 mm gehalten. Sowohl der Massedurchsatz als auch die Abzugsgeschwindigkeit werden so angepasst, dass die resultierende Folie eine Dicke von 120 μm aufweist. Die konstanten Versuchsparameter sind in Tabelle 10.1 dargestellt.

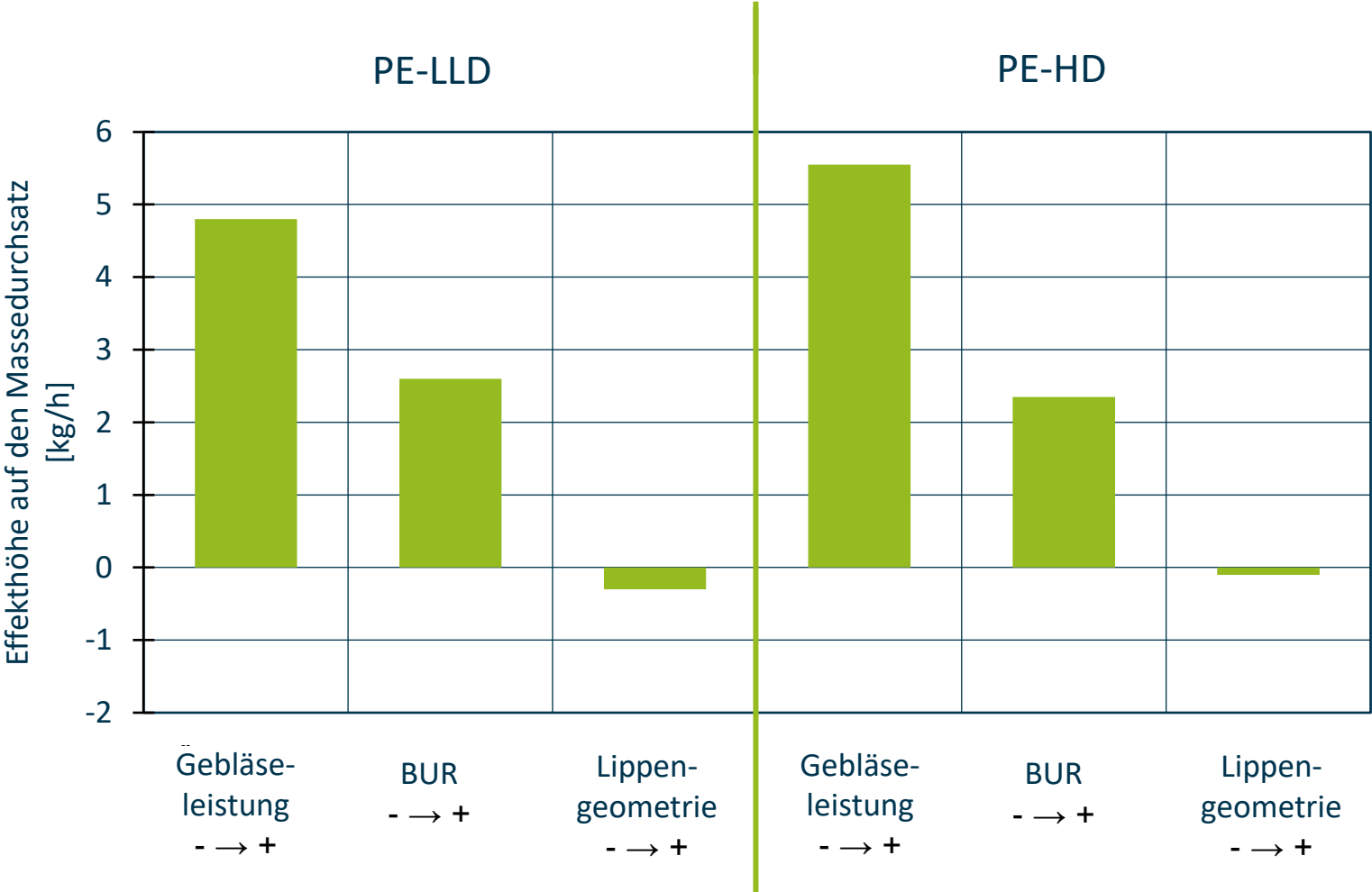
Einflussgrößen	Einheit	Art	Ausprägung
Temperatur Kühlluft	[°C]	Steuergröße	18
Massetemperatur	[°C]	Steuergröße	LDPE: 200 LLDPE: 200 HDPE: 210
Frostlinienhöhe	[mm]	Steuergröße	LDPE: 250 LLDPE: 360 HDPE: 620
Foliendicke	[μm]	Steuergröße	120 μm

Tabelle 10.1: Konstante Versuchsparameter der beiden Versuchsreihen

10.1 Einfluss der Prozessparameter auf den Massedurchsatz

Die Effektdiagramme zeigen die Einflüsse und Wechselwirkungen der Prozessparameter auf den Massedurchsatz bei PE-LLD (Bild 10.1/links) und PE-HD (Bild 10.1/rechts). Die Versuchsvariationen sind in Tabelle 10.2 ersichtlich. Die durchschnittlichen Massedurchsätze liegen hier bei 19,0 kg (PE-LLD) und 31,1 kg (PE-HD). Die Gebläseleistung hat bei beiden Materialien einen signifikant positiven Einfluss auf den Massedurchsatz, da mit der Erhöhung der Gebläseleistung die Strömungsgeschwindigkeit und damit der Wärmeübergangskoeffizient steigt. Dies führt zu einer Erhöhung des Massedurchsatzes. Auch das Aufblasverhältnisses hat bei beiden Materialien einen signifikant positiven Einfluss auf den Massedurchsatz, da eine Erhöhung des Aufblasverhältnisses zu einer Erhöhung der wärmeabgebenden Fläche führt.

Effekte auf den Massedurchsatz bei PE-LLD und PE-HD



Dies wiederum führt zu einer Erhöhung des Massedurchsatzes. Der Wechsel der Kühlringlippen-Geometrie von (45°/30°) zu (-45°/-30°) zeigt weder bei PE-LLD noch bei PE-HD einen Effekt. Dies widerspricht den Erkenntnissen aus den Nebelversuchen, eine kleinere Nebelfläche sollte zu einem höheren Wärmeübergangskoeffizienten führen.

Einflussgrößen	Einheit	Art	Variation	
Material	[-]	Steuergröße	PE-LLD	PE-HD
BUR	[-]	Steuergröße	2,4	3,2
Gebläseleistung	[%]	Steuergröße	50	100
Geometrikombination der Doppellippe	[°]	Steuergröße	-45/-30	45/30

Tabelle 10.2: Versuchsparameter der Untersuchung des Prozessparametereinflusses

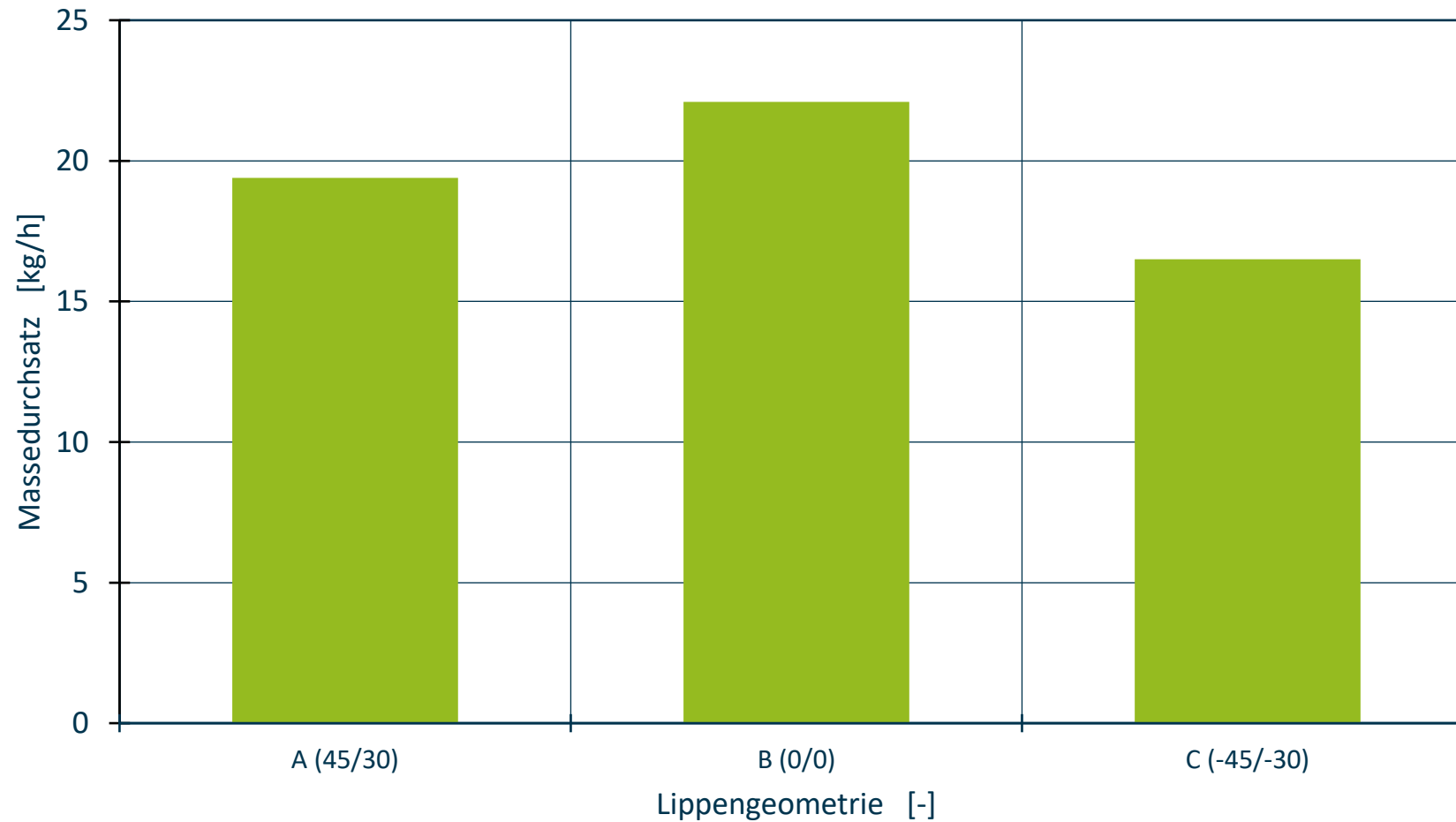
10.2 Einfluss der Lippengeometrie auf den Massedurchsatz

Zur Überprüfung dieses Widerspruchs und zur weiteren Analyse des Einflusses der Lippengeometrie auf den Massedurchsatz wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt (siehe Tabelle 10.3). Hierbei wurden die Geometrikombinationen A-C (siehe Kapitel 9) eingesetzt. Die erreichten Massedurchsätze sind in Bild 10.2 abgebildet. Bei den Ergebnissen ist der Massedurchsatz bei der Geometrie (45/30) deutlich höher als der Massedurchsatz bei der Geometrie (-45/-30) und entspricht den Erkenntnissen der Nebelfläche - jedoch in umgekehrter Richtung. Dies ist auf das BUR von 2,8 zurückzuführen, bei dem eine nach außen gerichtete Lippengeometrie deutlich bessere Werte erzielt (siehe Kapitel 9.2). Generell lässt sich feststellen, dass die Wärmeabfuhr bei Einsatz verschiedener Lippengeometrie stark anhängig von den Prozessbedingungen wie der Gebläseleistung und der Form der Schlauchbildungszone ist. Diese Abhängigkeit ist auch in Bild 10.3 zu erkennen. Der Massedurchsatz verhält sich im Bezug zur Blasenform bzw. BUR nicht linear, sodass starre Lippengeometrie spezifisch für einen Prozesspunkt sind. Um diese Herausforderung zu lösen, ist die Entwicklung einer flexibel einstellbaren Düsenlippe zielführend.

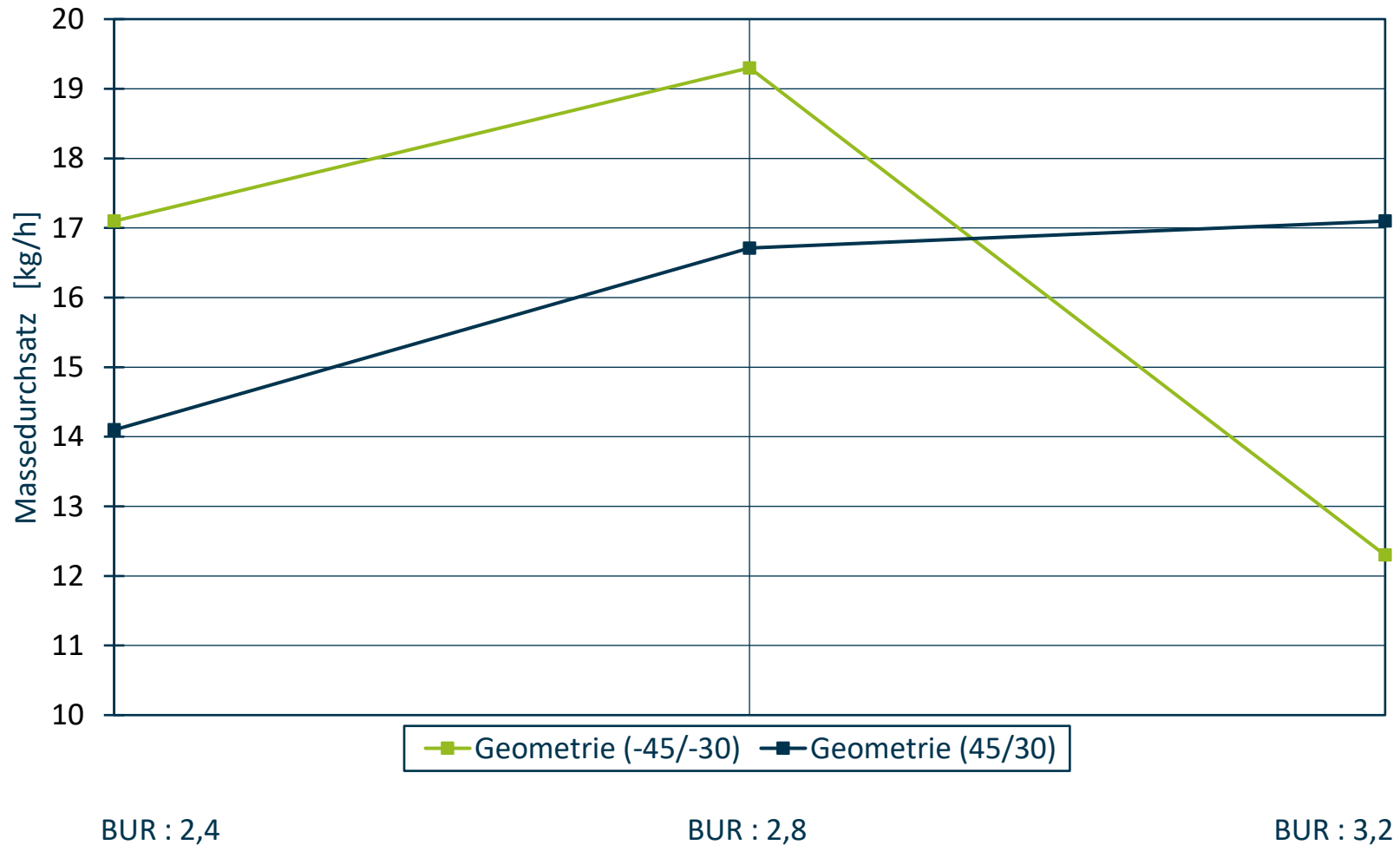
Einflussgrößen	Einheit	Art	Ausprägung/Variation		
Material	[-]	Steuergröße	PE-LD		
Gebläseleistung	[%]	Steuergröße	75		
BUR	[-]	Steuergröße	2,8		
Geometrikombination der Doppellippe	[°]	Steuergröße	A	B	C

Tabelle 10.3: Versuchsparameter der Untersuchung des Lippengeometrieinflusses

Einfluss der Lippengeometrie auf den Massedurchsatz



Einfluss der Blasenform in Kombination mit der Lippengeometrie auf den Massedurchsatz



11 ENTWICKLUNG EINER FLEXIBEL EINSTELLBAREN DÜSENLIPE

Zur Steigerung der Kühlleistung in der Blasfolienextrusion haben sich Doppellippenkühlringe mit fixer Geometrie etabliert. Diese starren Systeme wurden für einen großen Bereich an Produkten entwickelt. Jedoch wäre für die bestmögliche Kühlung in Abhängigkeit des Prozesses und des Materials ein Anpassen der Luftströmung vonnöten.

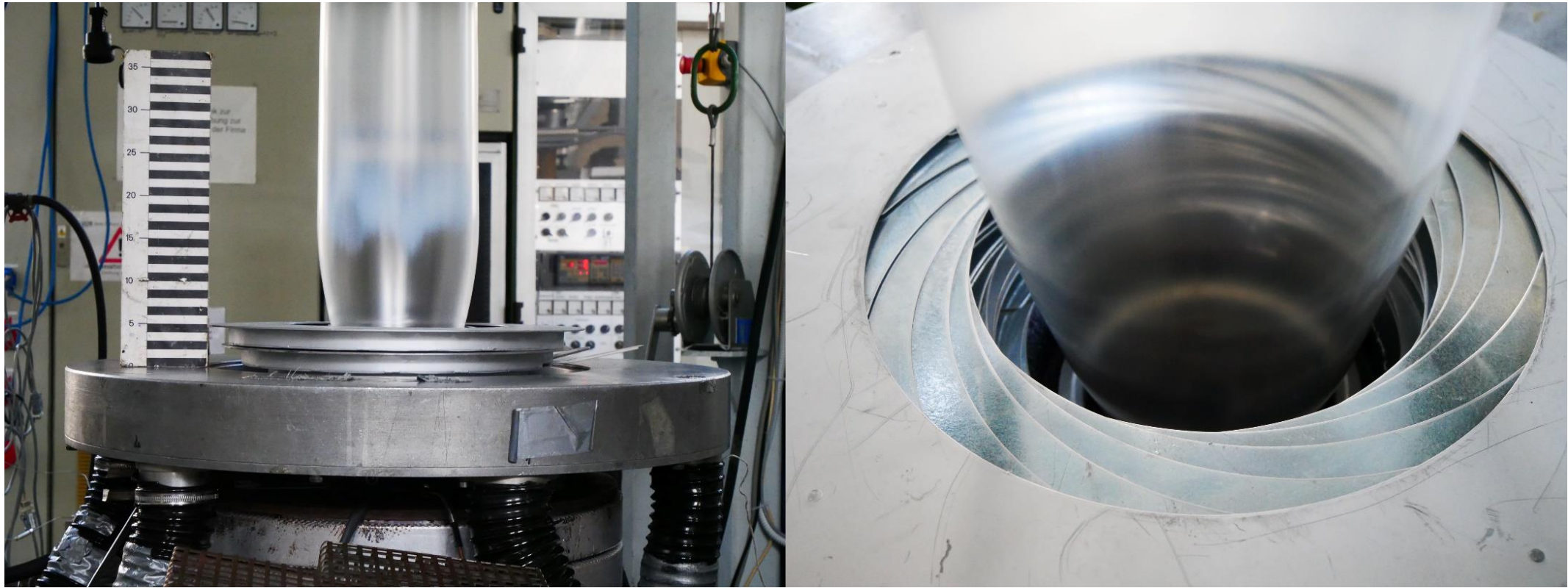
Daher wurde in Forschungsvorhaben auf Basis der Erkenntnisse aus den Simulationen und den Extrusionsversuchen eine flexibel verstellbare obere Düsenlippe entwickelt. Mit dieser können in Abhängigkeit unterschiedlicher Blasgeometrien bei laufendem Prozess der Anstellwinkel für eine optimale Kühlung gezielt angepasst werden.

11.1 Konzepterarbeitung einer flexibel einstellbaren Düsenlippe

Die Entwicklung einer flexibel einstellbaren Düsenlippe benötigt besondere Berücksichtigung in Bezug auf die notwendige Rundheit des Systems. Durch eine unrunde Lippe ergeben sich, aufgrund von unterschiedlichen Kühlluftströmungen, Dickenschwankungen im Folienprofil. In dem erarbeiteten Konzept wurde auf die Erfahrungen des IGF-Forschungshabens 20100 N hinsichtlich des Einsatzes von Irisblenden zurückgegriffen. Irisblenden finden normalerweise ihre Anwendung in der Lüftungs- und Klimabranche zur Führung und Regulierung von Luftströmungen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität in der Verstellung des Öffnungsdurchmessers und durch ihre sehr hohe Rundheit aus. Durch ein Öffnen oder Schließen der Irisblenden wird die Geometrie der Luftführung verändert.

Die flexibel einstellbare Düsenlippe wird aus drei übereinander angeordneten Irisblenden gebildet. In der ersten Konzept- und Erprobungsphase wurden die Irisblenden von einer flexiblen luftführenden Membran ummantelt. 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 und streifenweise mit Überlappung in der Düsenlippe verspannt. Mit einer mechanischen Verstellung der Irisblenden wird eine schnelle Anpassung der luftführenden Membran während des laufenden Betriebs erreicht. In den ersten Versuchen ergaben sich erhöhte Dickenschwankungen, welche baulich bedingt durch eine Faltenbildung der Membran nicht verhindert werden konnte. Weiterhin führte die sehr nahe Anordnung der einzelnen Irisblenden in Kombination mit der Steifigkeit der luftführenden Membran dazu, dass sich die flexibel einstellbare Düsenlippe nur bedingt auf die Folienblase anpassen ließ. In der zweiten Konzeptphase wurden die Irisblenden ohne luftführende Membran erprobt. Hierdurch wurde eine deutlich bessere Anpassung an die Kontur der Folienblase erreicht. In Bild 11.1 lassen sich der Aufbau und die Integration der flexiblen einstellbaren Düsenlippe an der Blasfolienanlage erkennen.

Blasfolienanlage mit eingebauter flexibel einstellbaren Düsenlippe



11.2 Untersuchungen zur Massedurchsatzsteigerung durch Einsatz der flexibel einstellbaren Düsenlippe

In einem weiteren Schritt wurden daraufhin ausgewählte Versuchspunkte experimentell angefahren, um die Kühlleistung und damit den möglichen Massedurchsatz durch gezieltes Verstellen der flexiblen Düsenlippe während des laufenden Extrusionsprozesses zu erhöhen. Die Extrusionsversuche wurden unter den im Kapitel 10.2 beschriebenen Prozessbedingungen durchgeführt, wobei die Höhe der Frostlinie konstant auf 200 mm gehalten wurde. In Vorversuchen wurden verschiedene Einstellung der Irisblenden getestet und für die Massedurchsatzsteigerung drei Einstellungen ausgewählt. Die entsprechenden Durchmesser der Einstellung „leicht geschlossen“ und „stark geschlossen“ sind in Tabelle 11.1 aufgelistet. Die Einstellung „leicht geschlossen“ wurde als eine lineare Steigerung der Öffnungsweite gewählt. Im Gegensatz dazu wurde die Einstellung „stark geschlossen“ anhand der sich verändernden Folienkontur ausgewählt. Durch den auftretenden Venturi-Effekt im unteren Bereich der Folienblase weitet sich die Folie auf. Die Öffnungsweite der obersten Irisblende wurde größer als die der vorherigen Irisblende gewählt. Hiermit sollte gezielt am Ende der flexiblen Düsenlippe die Luftströmung mittels Coanda-Effekt an die Folienblase angelegt werden.

Einstellung der Irisblenden	Öffnungsweite der Irisblenden [mm]		
	Untere Irisblende	Mittlere Irisblende	Obere Irisblende
Leicht geschlossen	160	180	200
Stark geschlossen	120	150	140

Tabelle 11.1: Öffnungsweite der Irisblenden bei verschiedenen Einstellungen

In der offenen Einstellung der Irisblenden wurde ein Massedurchsatz von 18 kg/h erreicht. Bei einer ungünstigen Einstellung und der daraus resultierenden Verschlechterung des Kühlluftstroms betrug der maximale Massendurchsatz 15,3 kg/h. In einer idealen Konfiguration wurde der Massendurchsatz um etwa 10 % auf 20,1 kg/h gesteigert (siehe Tabelle 11.2).

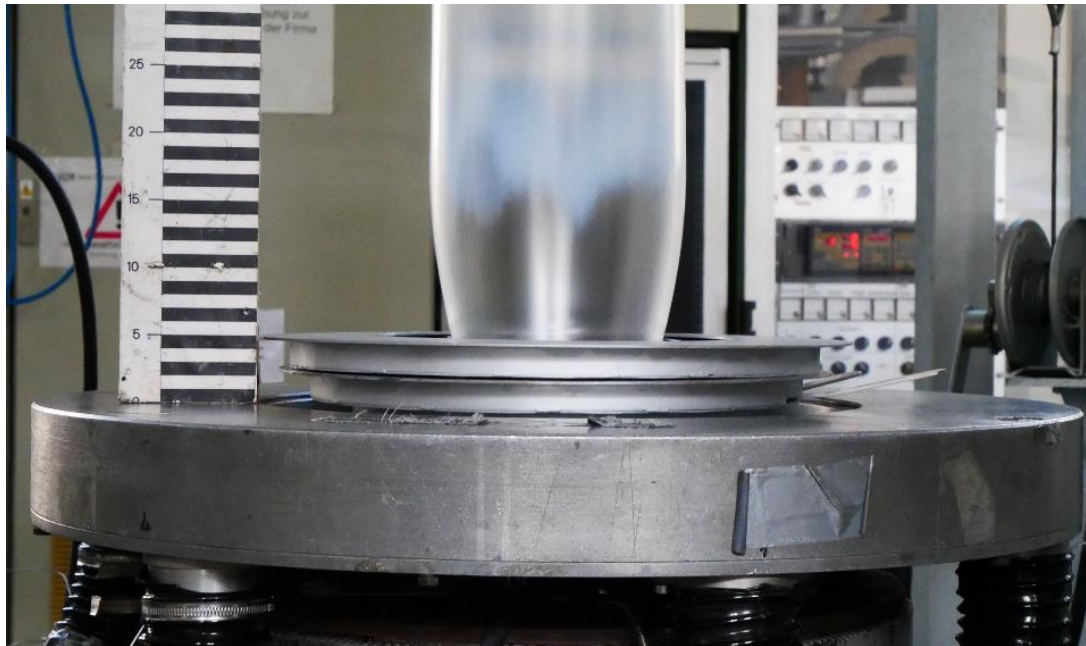
Massedurchsatzsteigerung durch flexibel einstellbare Düsenlippe		
Versuchspunkt	Einstellung der Irisblenden	Erreichter Massedurchsatz
Referenz	Offen	18 kg/h
Schlecht	Leicht geschlossen	15,3 kg/h
Gut	Stark geschlossen	20,1 kg/h

Tabelle 11.2: Erzielte Ergebnisse durch Einsatz einer flexiblen einstellbaren Düsenlippe

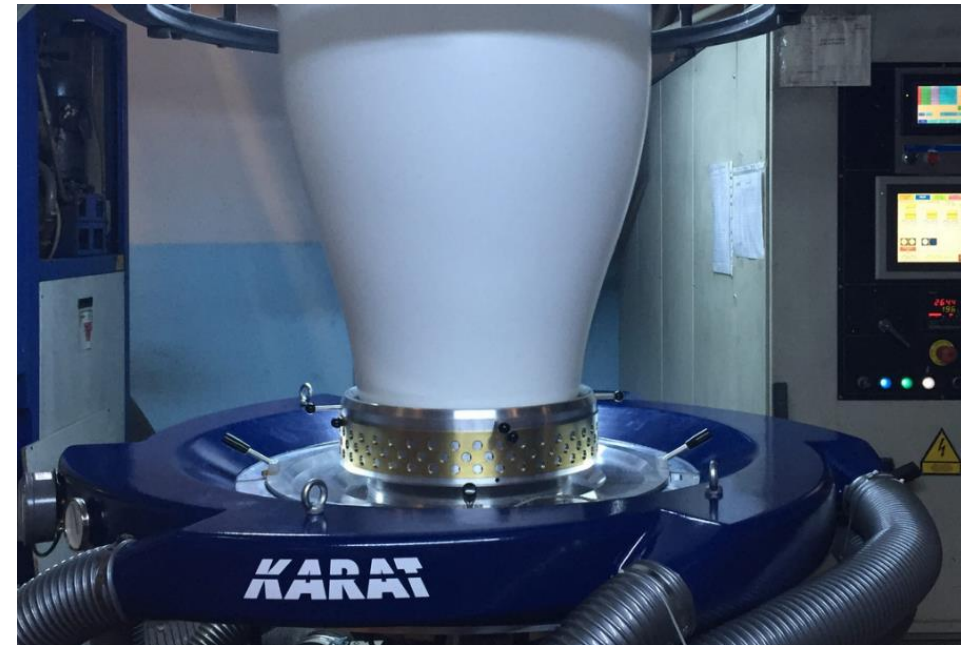
Es zeigt sich also, dass die flexibel einstellbare Düsenlippe während des Prozesses verstellt werden kann, um die Strömungsverhältnisse an die unterschiedlichen Blasengeometrien anzupassen, so dass immer die bestmöglichen Kühlbedingungen zur Verfügung stehen. Die Auswahl einer prozessangepassten Düsenlippengeometrie ist eine weitere Steigerung von bis zu 3 kg/h möglich. Durch Einsatz der entwickelten flexibel einstellbaren Düsenlippe ist eine zusätzliche Erhöhung des Massedurchsatz von etwa 2 kg/h erreicht worden. Dabei bildet die flexible Düsenlippe keine klassische Düsenlippe, sondern ist in Hinblick auf die Größe der Techniksanlage und den verwendeten Doppellippenkühlring des IKV eher einer Luftführungseinheit zuzuordnen. Dies ist auf die benötigte Bauhöhe der Irisblenden zurückzuführen, welche aus ihrer Mechanik der kreisrunden Verstellung resultiert. Im Vergleich zum Stand der Technik eines auf dem Markt verfügbaren Doppellippenkühlrings beispielsweise der Firma Kdesign GmbH, Königswinter (siehe Bild 11.2) lassen sich einige Unterschiede hinsichtlich Bauform und -höhe erkennen. Die Höhe des Kühlrings mit eingebauter flexibel einstellbaren Düsenlippe des IKV entspricht der Höhe eines konventionellen Kühlrings. Derzeit auf dem Markt erhältliche Kühlringe führen die Kühlluft deutlich länger, lassen sich jedoch nicht im Durchmesser auf die Folienblase anpassen. Bei einer Übertragung der flexibel einstellbaren Düsenlippe auf den Industriemaßstab bleibt die Bauhöhe der Irisblenden weitestgehend konstant, sodass die Größe der flexibel einstellbaren Düsenlippe im Vergleich zur Maschinengröße deutlich geringer ausfällt und einer klassischen Düsenlippe entspricht. Insgesamt konnte eine flexibel einstellbare Düsenlippe nach der im Antrag vorgestellten Methode erfolgreich entwickelt werden und ermöglicht eine konturnahe Anpassung der Kühlluftströmung.

Vergleich flexible Düsenlippe mit konventionellem Kühlring

Flexible Düsenlippe des IKV



Doppellippenkühlring der Firma Kdesign GmbH



[NN22]

12 FAZIT UND AUSBLICK

Ziel des Forschungsprojektes 21086 N war, die Massendurchsätze bei der Blasfolienextrusion durch eine Verbesserung etablierter Doppellippenkühlringe hinsichtlich der generierten Strömungsverhältnisse zu steigern. Zuletzt wurde auch insbesondere der Einfluss der Prozessparameter auf die Wärmeabfuhr und die optischen und mechanischen Eigenschaften untersucht. Es wurde eine Simulation entwickelt, die durch die Visualisierung der Kühlluftströmung eines Doppellippenkühlrings ermöglicht, die ideale Kühllippengeometrie eines Doppelkühlrings in Abhängigkeit von unterschiedlichen Prozessparametern vor der eigentlichen Extrusion durch gezielte Vermeidung des Coanda-Effekts zu bestimmen. Durch Validierungsversuche an einer additiv gefertigten Blase wurde die Genauigkeit der Simulationen überprüft. In einem weiteren Schritt wurden durch Nebelversuche und in Extrusionsversuchen die Einflüsse der unterschiedlichen Düsendesigns auf die Folieneigenschaften sowie auf den maximal erreichbaren Massedurchsatz untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Prozessparameter Gebläseleistung, BUR sowie Masstemperatur einen deutlich größeren Einfluss auf die Kühlleistung im Vergleich zur Lippengeometrie haben. Die Untersuchungen hinsichtlich einer idealen Lippengeometrie ergaben, dass eine parallel zur Extrusionsachse oder leicht zur Blase hingerrichtete Geometrie die besten Ergebnisse bezüglich einer Massestromsteigerung und Konstanz der Folieneigenschaften liefern.

Da der Austausch einer Kühlringlippe mit Rüstzeiten verbunden ist und starre Systeme wie ein Doppellippenkühlring für einen großen Bereich an Produkten entwickelt werden, bei denen eine für die bestmögliche Kühlung in Abhängigkeit des Prozesses und des Materials ein Anpassung der Luftströmung vonnöten wäre, wurde weiterhin eine flexible, einstellbare Düsenlippe entwickelt und in Betrieb genommen werden, um die Effizienz einer Produktionslinie weiter zu steigern. Die flexibel einstellbare Düsenlippe wird aus drei übereinander angeordneten Irisblenden gebildet und ermöglicht eine gezielte Anpassung des Anstellwinkels bei laufendem Prozess in Abhängigkeit unterschiedlicher für eine optimale Kühlung. Die konturnahe Führung der Kühlluft mit der flexiblen Düsenlippe erzielte eine Massedurchsatzsteigerung von 10%.

Durch die Ergebnisse können die kmU der Blasfolienbranche ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern, indem sie durch Anpassung ihrer Kühlringe oder den Einsatz einer flexiblen einstellbaren Düsenlippe ihren Massedurchsatz steigern können. In zukünftigen Forschungsprojekten könnten weitere simulative Untersuchungen Kühlluftströmungen durchgeführt werden. Hier ist vor allem die automatische simulative Optimierung der Düsenlippengeometrie interessant, in der als Zielgröße eine möglichst geringe Strömungsfläche der Kühlluftströmung vorgegeben wird. Diese Simulationen sind sehr rechenaufwändig, können jedoch einige neue Erkenntnisse über

die ideale Lippengeometrie liefern. Weiterhin ist die Übertragung des generierten Prozesswissen auf Blasfolienanlagen im Industriemaßstab interessant, um einerseits die deutlich größeren Strömungskanäle und Volumenströme zu untersuchen und andererseits weitere Doppellippenkühlringe mit einem unterschiedlichen Aufbau zu simulieren.

13 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

13.1 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.

13.2 Durchgeführte Transfermaßnahmen des Vorhabens:

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Während der Laufzeit
<i>Während der Projektlaufzeit haben drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses stattgefunden (31.08.2020 - Teilnehmer: 16 / 03.11.2021 - Teilnehmer: 11, 30.05.2022 - Teilnehmer: 14). 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	Während der Laufzeit Jährlich im November
<i>Innerhalb der Laufzeit des Forschungsprojektes haben zwei Sitzungen der Fachbeiratsgruppen des IKV stattgefunden (8.11.2020 und 07-08.11.2021). Bei der FBG 2020 wurde das Forschungsvorhaben den Fachbeiratsgruppen „Extrusion“ (Teilnehmer: 32) in Form eines Vortrages vorgestellt. Bei der FBG 2021 (Teilnehmer: 23) wurde das Projekt mit Industrievertretern diskutiert.</i>	
Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Während der Laufzeit
<i>Innerhalb des Projektzeitraumes konnte durch den Austausch mit verschiedenen Unternehmen aus der Folienindustrie bei der jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppe Extrusion (2020,2021) des IKV in Aachen sowie bei dem im September 2020 stattgefundenen 30. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik (08.-11-09.2020) des IKV, viele Fragen, Anregungen und Ergebnisse ausgiebig diskutiert werden.</i>	

Maßnahme: Akademische Lehre / Personaltransfer	Während der Laufzeit
<p><i>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. Die erarbeiteten Erkenntnisse flossen zusätzlich in Lehrveranstaltungen, wie beispielsweise die Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II“ und „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung II“ ein und wurden auch auf diesem Wege Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure.</i></p> <p><u>Masterarbeit</u></p> <p>VOSSEL, T.: <i>Visualisierung und Analyse der Kühlluftströmung in der Blasfolienextrusion unter Berücksichtigung des Coanda-Effekts</i>. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus</p>	
Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen	Während der Laufzeit
<p><i>Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind auf nationalen Fachtagungen und Konferenzen durch Vorträge und Posterpräsentationen vorgestellt worden.</i></p>	
Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	Zwischenergebnisse nach einem Jahr und Abschlussveröffentlichung nach Projektende
<p><i>Durch Publikationen in Fachzeitschriften wurden die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden in Form von Veröffentlichungen in nationalen Fachzeitschriften einem breiten Publikum vorgestellt:</i></p> <p>HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.; VOSSEL, T.: Optimization of double-lip cooling rings in blown film extrusion considering the Coanda-effect. <i>Conference Proceedings At ANTEC '21</i>, Denver, Colorado, USA, 2021</p> <p>HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.; REUL, M; STIEGLITZ, M.: Simulation als Tool zur Steigerung der Effizienz einer Blasfolienanlage?! <i>Extrusion 27</i> (2021) 6. S. 24-27</p> <p>HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; SCHÖN, M.: Der Nebel zeigt den Weg. <i>Plastverarbeiter 73</i> (2022) S.22-25 (Abschlussveröffentlichung)</p>	
Maßnahme: Hinweise in der Fachpresse	Während der Laufzeit
<p><i>Über die IKV eigene Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit wurde das Projekt in Form von Pressemitteilungen und Fachartikeln einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Derzeit</i></p>	

<i>umfasst der Verteiler über 40 Fachzeitschriften im Bereich der Kunststofftechnik und des Maschinenbaus.</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>Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitete Wissen fließt in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Im Berichtszeitraum wurden zahlreiche bi- und multilaterale Gespräche geführt.</i>	

13.3 Geplante Maßnahmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens:

Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden auch nach Abschluss des Forschungsvorhabens mit Firmen der Folienindustrie diskutiert. Dabei werden Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis des Vorhabens gehören, gezielt angesprochen.</i>	
Maßnahme: Multiplikatoren	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die flexibel einstellbare Düsenlippe im Labormaßstab untersucht, da sich jedoch Doppellippenkühlringe mit fixer Geometrie bereits in</i>	

<i>der Industrie etabliert haben, ist die Möglichkeit eines Transfers der entwickelten Technologie in die Industrie als hoch einzustufen.</i>	
Maßnahme: Akademische Lehre/Personaltransfer	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Nach Abschluss der Forschungsvorhabens werden die erzielten Ergebnisse in die Ausbildung junger Ingenieure wie beispielsweise die Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II“ und „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung II“ übernommen, sodass die Studenten das erarbeitete Wissen später als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen können.</i>	
Maßnahme: Dissertation	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Es besteht für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstelle die Möglichkeit zur Promotion auf dem beantragten Forschungsthema.</i>	

13.4 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.

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

14.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Am Ende des Forschungsprojekts werden interessierte Unternehmen durch den Abschlussbericht, Veröffentlichungen und Präsentationen ausführlich über die Ergebnisse informiert, so dass sie die gewonnenen Erkenntnisse in ihre eigenen Entwicklungsprozesse einfließen lassen können. Es ist auch möglich, das entwickelte Simulationsmodell in Form von Industrieprojekten am IKV zu testen. Das breite Spektrum potenzieller Anwendungen und Produkte in einer Vielzahl von Sektoren, die Durchführbarkeit und die kosteneffizienten Simulationstests legen nahe, dass das Modell innerhalb der nächsten fünf Jahre nach Abschluss des Projekts auf konkrete Produkte angewendet werden kann.

14.2 Wirtschaftlicher Nutzen

In Zeiten immer kürzerer Innovationszyklen und geringerer Chargengrößen ist es für den Verarbeiter von großer Bedeutung, möglichst zeit- und materialeffizient zu arbeiten. Durch die Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Düsenlippengeometrien und Prozessparameter 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 zum einen Massedurchsatzsteigerungen von typischerweise 10 % ergaben und zum anderen der Einfluss auf die mechanischen und optischen Eigenschaften bewertet werden konnte. Der Einfluss auf die mechanischen und optischen Eigenschaften stellte sich dabei als marginal heraus.

Vor allem kleine und mittlere Unternehmen (kmU) verfügen oft nicht über die Mittel, zu untersuchen, wie Strömungen sich in Kühlringen verhalten. So kann eine optimale Auslegung nur schwer gewährleistet werden. Mit den Simulations- und Versuchsergebnissen des Forschungsvorhabens wird die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU nachhaltig gesteigert. Die erzielten Forschungsergebnisse können in der gesamten Blasfolienextrusionsbranche zur Prozessoptimierung genutzt werden. Neben den kmU-lastigen Extrusionsbetrieben profitiert auch der durch kmU geprägte Werkzeugbau, der die Erkenntnisse im Bereich Düsenlippengeometrie umsetzen und vertreiben kann. Somit können die Ergebnisse branchenübergreifend von einer großen Anzahl von kmU genutzt werden.

15 ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

15.1 Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal

- **Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal gemäß Einzelansatz A.1 des Einzelfinanzierungsplans:**
- 2020: 6,5 PM
- 2021: 7 PM
- 2022: 3,75 PM

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.

- **Einsatz von Geräten gemäß Einzelansatz B des Einzelfinanzierungsplans:**

Im Vorhaben wurden folgende Geräte beschafft: Nebelmaschine inkl. Nebellanze

Die im Bewilligungsbescheid zum Forschungsvorhaben vorgesehenen Investitionsausgaben zur Beschaffung der Nebelmaschine inkl. Nebellanze (Gerätebeschaffung) konnten wie geplant genutzt werden. Für die Visualisierung der Kühlluftströmung im Bereich der Schlauchbildungszone wurde diese Nebelmaschine eingesetzt. Die beschaffte Nebelmaschine mit einer Nebellanze ist speziell auf den Luftvolumenstrom des Kühlrings abgestimmt und ermöglichte die konstante Bereitstellung eines konstanten Nebelvolumens sowie das Erreichen einer notwendigen Austrittstemperatur des Nebels im Bereich von 15-25 °C. Das Gerät war in der Form noch nicht am IKV vorhanden und waren für eine erfolgreiche Bearbeitung des Projektes notwendig. Das Gerät wurde von der Firma Tintschl BioEnergie und Strömungstechnik AG beschafft.

- **Einsatz von Leistungen Dritter gemäß Einzelansatz B des Einzelfinanzierungsplans:**

Für dieses Vorhaben wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

15.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Ziel des Forschungsprojektes war die Massendurchsätze bei der Blasfolienextrusion durch eine Verbesserung etablierter Doppellippenkühlringe hinsichtlich der generierten Strömungsverhältnisse zu steigern.

Daher wurde eine Simulation mit der Software OpenFOAM entwickelt, die durch die Visualisierung der Kühlluftströmung eines Doppellippenkühlrings ermöglicht, Kühllippengeometrien

eines Doppelkühlrings in Abhängigkeit von unterschiedlichen Prozessparametern zu untersuchen. Durch Untersuchungen an einer additiv gefertigten Blase konnten die Simulationen bewertet werden und weitere Erkenntnisse bezüglich der Beeinflussung einzelner Prozessparameter auf die Wärmeabfuhr gewonnen werden. In einem weiteren Schritt wurden in Extrusionsversuchen die Einflüsse der unterschiedlichen Düsendesigns auf die Folieneigenschaften sowie auf den maximal erreichbaren Massedurchsatz untersucht. Da der Austausch einer Kühlringlippe mit Rüstzeiten verbunden ist, wurde weiterhin eine flexible, einstellbare Düsenlippe entwickelt und in Betrieb genommen, um die Effizienz einer Produktionslinie weiter zu steigern.

Es konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die zukünftige Kühlringauslegungen und die Prozessführung verbessern können. Eine Übertragung auf andere Anwendungsgebiete der Kunststofftechnik ist in jedem Fall möglich.

Die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die geleistete Arbeit und der Einsatz der Ressourcen angemessen und notwendig waren

16 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

16.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BUR	Blow-up- ratio (Aufblasverhältnis)
IBC	Internal bubble cooling
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
MFR	Melt Flow Rate
CFD	Luftführungseinheit
PE-LD	Low density Polyethylen
PE-LLD	Linear low density Polyethylen
PE-HD	High density Polyethylen
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
TUR	Take-up ratio (Abzugsverhältnis)
FDM	Fused Deposition Modeling
ROI	Region of Interest
SIMPLE	Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent
KmU	Kleine und mittelständische Unternehmen

16.2 Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient
Bi	[-]	Biot-Zahl
c_p	[J/K]	Spezifische Wärmekapazität
d	[mm]	Dicke
E	[J·m ⁻³]	Spezifische Energie
A	[m ³]	Fläche
L	[m]	Länge
L_0	[m]	Anfangslänge
Nu	[-]	Nusselt-Zahl
u	[m/s]	Geschwindigkeit der Kühlluft
p	[bar]	Statischer Druck
Pr	[-]	Prandl-Zahl

\dot{Q}	[W/s]	Wärmestrom
Re	[-]	Reynolds-Zahl
S	[%]	Schrumpf
T	[°C]	Temperatur
ΔT	[°C]	Temperaturdifferenz
v	[m/s]	Geschwindigkeit
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
η	[Pa·s]	Viskosität
λ	[W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[W/(m ² ·K ⁴)]	<i>Stefan-Boltzmann-Konstante</i>
ε	[-]	Emissionsgrad
C ₁	[-]	Modell-Koeffizient
C ₂	[-]	Modell-Koeffizient
C ₃	[-]	Modell-Koeffizient
C _{mu}	[-]	Modell-Koeffizient
D _{ϵ}	[-]	Effektive Diffusivität für ϵ
D _k	[-]	Effektive Diffusivität für k
ε	[m ² s ⁻³]	Turbulente kinetische Energiedissipationsrate
k	[m ² s ⁻²]	Turbulente kinetische Energie
P	[m ² s ⁻³]	Turbulente kinetische Energieproduktionsrate
Δp	[bar]	Druckdifferenz

17 LITERATUR

- [AAA10] ABDELMAKSoud, M.; ABDELslAM, K.M.; AWAD, M.M.: A numerical investigation of external cooling on a blown film. *Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications (ThETA) 3rd International Conference*. Kairo, Ägypten, 2010
- [Ast78] AST, W.: *Kühlen von Schlauchfolien*. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1978
- [Bus10] BUSSMANN, M.: *Ein kalibrierbares integratives Modell zur Beschreibung des Schlauchbildungsprozesses in der Blasfolienproduktion*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2010
- [Can19] CANTOR, K.: *Blown Film Extrusion 3rd Edition*. München: Hanser Publishers, 2019
- [CCO92] CAMPBELL, G.A.; CAO, B. OBOT, N.T.: Aerodynamics in the blown film process. *Polymer Engineering and Science* 32 (1992)
- [CS13] CHELIKANI, S.; SPARROW, E.M.: *Numerical Simulations of Plane-wall Coanda Effects for Control of Fiber Trajectories in the Melt-blown Process*. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52 (2013) 33, S. 11639-11645
- [Gla18] GLADBACH, P.: *Prototypenentwicklung eines adaptiven Luftkühlrings zur Massedurchsatzsteigerung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2018 – Betreuer: L. Kraus
- [Grü20] GRÜBER, D.: *Prozessuntersuchung und Modellbildung zur Regelung eines adaptiven Luftführungssystems für eine gesteigerte Effizienz in der Blasfolienproduktion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2020 – 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)
- [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.
- [HM17] HOPMANN, C.; MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Berlin: Carl Hanser Verlag, 2017
- [HSF06] HENNES, J.; SKORA, S.; FRIEDEL, E.: Innen wie außen. *Kunststoffe* 96 (2006) 11, S. 4-5
- [Jan15] JANAS, M. L.: *Eine neuartige numerische Methode zur Optimierung und Intensivierung der Blasfolienkühlung*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2015
- [JFW13] JANAS, M.; FEHLBERG, L.; WORTBERG, J.: Numerical and experimental investigation of a counter flow cooling system for the blown film extrusion. *Proceedings of the 29th International Conference of the Polymer Processing Society*. Nürnberg, 2013
- [KDC83] KAWAMURA, S.; DIO, M.; CHIBA, J.: *DE 3243884 A1: Verfahren zu Herstellung einer schlauchförmigen Folie*. Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, 09.06.1983

- [Kra21] KRAUS, L.: *Entwicklung einer flexiblen Luftführungseinheit zur Steigerung der Kühlleistung von Blasfolienextrusionsanlagen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2021 – ISBN: 978-3-95886-418-4
- [Let08] LETTOWSKY, C.: Steigerung des Durchsatzes durch innovative Ansätze zur Schlauchkühlung bei der Blasfolienextrusion. *IKV-Fachtagung Folienextrusion: Rohstoffe, Verarbeitung, Anwendungen*, Aachen, 2008
- [Lor16] LORENZ, N.: *Untersuchung der Kühlwirkung einer Kontaktkühlung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2016 – Betreuer: M. Hennigs
- [LS73] LAUNDER, B.; SPALDING, D.: The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3 (1974) 2, S. 269-289
- [MP75] MENGES, G.; PREDÖHL, W.O.: Certain aspects of film blowing of low-density polyethylene. *Polymer Engineering & Science* 15 (1975) 5, S. 394-399
- [NN08] N.N.: EP1982819A2: *Verfahren und Vorrichtung zur Kühlung eines Folien-schlauchs bei der Blasfolienherstellung*. Patentschrift, Europäisches Patentamt, 17.04.2008
- [NN09] N.N.: *Der Gegenstromkühlring, neue Dimension in der Folienkühlung*. Firmenschrift, Kdesign GmbH, Königswinter, 2009
- [NN22] N.N.: *Kühlfluringsystem KARAT*. URL: <https://kdesign-web.de/kuehllufringsysteme/>, 20.10.2022
- [OS10] OVERBECK, J; SCHIPPERS, S.: *Vielschichtig aus der Krise*. *Kunststoffe* 100 (2010), S. 58-64
- [Ove09] OVERBECK, J.: Folien im Fokus. *Kunststoffe* 99 (2009) 1, S. 38-40
- [Pla84] PLANETA, M.: US4479766: *Apparatus for the production of plastic film*. Patentschrift, United States Patent and Trademark Office, 30.04.1984
- [PP70a] PEARSON, J.R.A.; PETRIE, C.J.S.: A fluid-mechanical analysis of the film-blowing process. *Plastics & Polymers* 38 (1970) 134, S. 85-94
- [PP70b] PEARSON, J.R.A.; PETRIE, C.J.S.: The flow of tubular film: Formal mathematical representation. *Journal Fluid Mechanics* 40 (1970) 1, S. 1-19
- [PP70c] PEARSON, J.R.A.; PETRIE, C.J.S.: The flow of tubular film: Interpretation of the model and discussion of solutions. *Journal Fluid Mechanics* 42 (1970) 3, S. 609-625
- [PS71] PATANKAR, S., SPALDING, D.: A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. Heat Mass Transfer* 10 (1971) 15, S. 1789-1806
- [Rah10] RAHM, W.: *Blasfolienextrusion. Extrusion thermoplastischer Kunststoffe*. Düsseldorf, 2010
- [Rei15] REINHARDT, N.: *Literaturrecherche zu Luftkühlverfahren in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2015 – Betreuer: M. Hennigs
- [Sch15] SCHÜTZ, K.: *Untersuchung der Kühlwirkung einer Kontaktkühlung in der Blasfolienextrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2015 – Betreuer: M. Hennigs
- [Sch18] SCHRÖDER, W.: *Fluidmechanik*. RWTH Aachen Aerodynamisches Institut und Lehrstuhl für Strömungslehre, Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen, 2018
- [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
- [SWV99] SIDIROPOULOS, V.; WOOD, P.E.; VLACHOPOULOS, J.: The Aerodynamics of Cooling of Blown Film Bubbles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 18 (1999) 6, S. 529-538
- [WB07] WORTBERG, J; BUSSMANN, M.: *Vielseitige Verpackung*. Essener Unikate (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
- [Zim08] ZIMMERMANN, R.: *EP 1982819 A2: Verfahren und Vorrichtung zur Kühlung eines Folienschlauchs bei der Blasfolienherstellung*. Patentschrift, European Patent Office, 22.10.2008
- [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

18 ANHANG

18.1 Liste der Veröffentlichungen

HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.; VOSSEL, T.: Optimization of double-lip cooling rings in blown film extrusion considering the Coanda-effect. *Conference Proceedings At AN-TEC '21*, Denver, Colorado, USA, 2021

HOPMANN, CH.; KRAUS, L.; FACKLAM, M.; REUL, M; STIEGLITZ, M.: Simulation als Tool zur Steigerung der Effizienz einer Blasfolienanlage?! *Extrusion* 27 (2021) 6. S. 24-27

HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; SCHÖN, M.: Der Nebel zeigt den Weg. *Plastverarbeiter* 73 (2022) S.22-25 (Abschlussveröffentlichung)

18.2 Liste der studentischen Arbeiten

VOSSEL, T.: *Visualisierung und Analyse der Kühlluftströmung in der Blasfolienextrusion unter Berücksichtigung des Coanda-Effekts*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020 – Betreuer: L. Kraus

Diese Arbeit befasste sich mit der Produktivitätssteigerung hinsichtlich des Massedurchsatzes in der Blasfolienextrusion. Dazu muss der konvektive Wärmeentzug aus der extrudierten Folienblase erhöht werden. Der Coanda-Effekt führt unter Verwendung eines Doppellippenkühlrings unter bestimmten Umständen zu einem Anhaften der Kühlluftströmung an der Kühlringgeometrie. So wird die Kühlluft zuerst nach außen hin und dann über einen stehenden Wirbel wieder zur Blase geführt, wodurch der Wärmeentzug verschlechtert wird.

Das Ziel dieser Arbeit war daher der Nachweis der Existenz des Coanda-Effekts und dessen Abhängigkeit von Prozessparametern und Düsendesign. Bei erfolgreichem Nachweis des Coanda-Effekts und bei Wechselwirkungen zwischen Parametern und Design kann die Strömung bei einer Veränderung der Prozessparameter durch das Düsendesign optimiert werden. Somit kann das Potential der Kühlleistung eines Doppellippenkühlrings zu jeder Zeit maximal ausgeschöpft werden.

In dieser Arbeit wurde daher ein Versuchsstand zur Visualisierung und Analyse der Kühlluftströmung einer Blasfolienanlage unter Berücksichtigung des Coanda-Effekts zur Optimierung der Strömungsverhältnisse konstruiert. Die ermittelten Erkenntnisse aus dem Versuchsstand wurden in Realversuchen validiert, sodass Massedurchsatzsteigerungen bei angepasster Prozessführung ermöglicht wurden.