

SICHTBARMACHUNG UND VERMESSUNG EINES WANDSTRAHLS BEI DER BLASFOLIENHERSTELLUNG

C.Ruppel, T.Funke, F.Peters

Ruhr-Universität Bochum
Institut für Thermo- und Fluidodynamik IB
44780 Bochum

Einleitung

Die Blas- oder auch Schlauchfolienextrusion ist ein bedeutendes Verfahren zur Herstellung von Kunststofffolien. Zähflüssige Kunststoffschmelze mit einer Temperatur von ca. 200°C wird durch einen Ringspalt gepreßt und nach oben abgezogen. Hierdurch entsteht ein Schlauch, der gefaltet und über eine geeignete Vorrichtung aufgewickelt wird. Während des Abziehvorgangs wird der Schlauch von innen aufgeblasen, um so die gewünschte Foliendicke zu realisieren. Die Formgebung der Folie erfolgt bei diesem Verfahren im Bereich zwischen dem Austritt der Schmelze aus dem Ringspalt und der Frostlinie, welche die Stelle bezeichnet, an der die Temperatur der Blase auf die Erstarrungstemperatur des Kunststoffes (ca. 100°C) abgesunken ist. Dieser Bereich ist der verfahrenstechnisch bedeutendste, da hier die Eigenschaften der Folie festgelegt werden.

Um eine möglichst schnelle Abkühlung zu erreichen, wird die Folie auf der Außenseite mit einem Kühlluftstrom tangential angeblasen. Im Bereich des Schmelzenaustritts befindet sich eine Düse, welche den unteren Teil des Schlauches umhüllt. Die Kühlluft wird hier zunächst durch den entstehenden Ringspalt zwischen Blasenkontur und Innenkontur der Düse geführt und tritt am Düsenende (Oberkante der Düse) aus und somit in Wechselwirkung mit der ruhenden Umgebung. Die entstehende Strömung hat den Charakter eines Wandstrahls mit steilen Geschwindigkeits- und Temperaturgradienten an der Folie und asymptotischen Verläufen zur Umgebung hin. Der Bereich zwischen Schmelzenaustritt und Frostlinie wird durch die Kühlung auf eine Länge von ca. 200mm beschränkt.

Die mit dem Blasfolienverfahren hergestellten Kunststofffolien zeigen unerwünschte instationäre Dickenschwankungen. Da der Hersteller eine Mindestdicke der Folien garantieren muss ist er gezwungen, die mittlere Foliendicke im Produktionsvorgang unnötig hoch einzustellen. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht gilt es also diese Dickenschwankungen zu minimieren.

Vorherige Arbeiten [z.B. Ferron 1999] haben gezeigt, dass die instationären Dickenschwankungen auf unterschiedliche Abkühlgeschichten einzelner Folienelemente und damit speziell auf die Kühlluftströmung zurückzuführen sind. Unser Projekt befasst sich mit der Untersuchung der Kühlluftströmung und der Entstehungsursachen der unterschiedlichen lokalen Abkühlgeschichten. Neben anderen punktuellen Messverfahren (Hitzdraht, lokale Wand Schubspannungsmessungen) kamen auch zwei bildgebende Verfahren, Visualisierung und PIV, zum Einsatz, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden sollen.

Versuchsaufbau

Abb. 1 (links) zeigt den Versuchsstand, an dem die Untersuchungen durchgeführt wurden. Durch ein Rohr, an dessen Einlauf ein DFFM (Drag Force Flow Meter) [Ruppel und Peters 2004] zur Überwachung des Volumenstroms angebracht ist, wird Umgebungsluft über ein frequenzgesteuertes Gebläse angesaugt. Diese wird in den untenliegenden Verteilerring eingespeist und über sechs gleichmäßig über dem Umfang verteilte Schläuche in den oberliegenden Sammlerring weitergeleitet. Von hier strömt die Kühlluft radial zum Konturmodell hin, wird an diesem umgelenkt und strömt schließlich tangential zur Kontur nach oben.

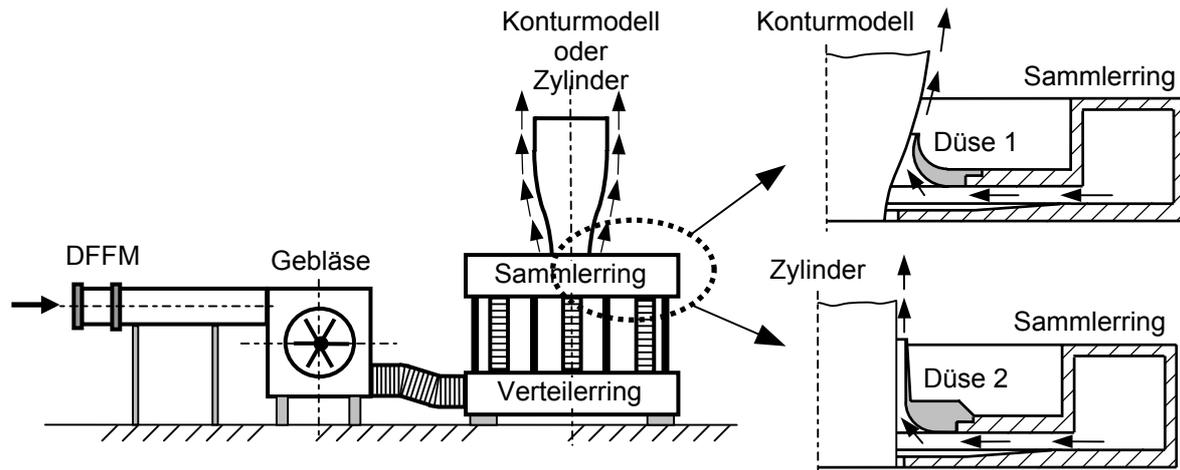


Abb. 1: Versuchsstand (links) und Detailschnitt durch den oberliegenden Sammlerring mit Düse und Konturmodell (rechts)

Abb.1 (rechts) zeigt detailliert die Kühlluftführung im oberen Sammlerring und der Düse sowie die konstruktive Ausführung in diesem Bereich. Für den ersten Teil der Messungen wurde ein Konturmodell verwendet, das einer realen Blase nachempfunden ist und durch innenliegende Heizspiralen definiert aufgeheizt werden kann. Da die reale Düse extreme Ablösung aufwies, wurde sie nicht weiter untersucht, sondern durch die optimierte Düse 1 ersetzt. Die Spaltweite am Düsenaustritt bei Düse 1 beträgt 5mm

Um den Einfluß unterschiedlicher Spaltweiten auf die Kühlluftströmung zu untersuchen, wurde das Konturmodell gegen Zylinder mit unterschiedlichen Durchmessern ($d_{Zyl}=135\text{mm}$; 144mm und 148mm) ausgetauscht. Die Düse 2 weist einen Innendurchmesser von 150mm auf, so daß sich Spaltweiten von 7,5; 3 und 1mm ergeben. Der untenliegende Verteiler- und der oberliegende Sammlerring entstammen einer industriellen Blasfolienanlage und sind eine Leihgabe der Fa. ETA Kunststofftechnologie GmbH.

Der Aufbau des Messsystems für die Visualisierungen und die PIV-Messungen ist in Abb. 2 dargestellt. Als Laser wird ein "Solo III PIV 15" Fa. "New Wave Research" mit einer maximalen Leistung von 50mJ verwendet. Der Laserstrahl wird durch einen beweglichen Lichtschnittarm geführt und durch ein System von Linsen zu einem Lichtschnitt aufgeweitet. Für die Aufnahmen wird eine CCD-Kamera vom Typ "Flowmaster 3S" der Fa. LaVision mit einer Auflösung von 1280x1024 Pixeln verwendet. Da es auf Grund der Geometrie des oberen Verteilerrings nicht möglich ist, die Kamera senkrecht zum Lichtschnitt zu positionieren, wird zusätzlich ein Spiegel verwendet, um normal in den Lichtschnitt zu blicken.

Lichtschnittoptik, Spiegel und Kamera sind auf einer verfahrbaren Traverse montiert, wodurch das Messsystem als ganzes verfahren werden kann, ohne die relative Lage der einzelnen Komponenten zueinander zu verändern. Zur Steuerung des Messsystems sowie Aufnahme und Auswertung der Bilder wird die Software DaVis 6.2 der Fa. LaVision verwendet.

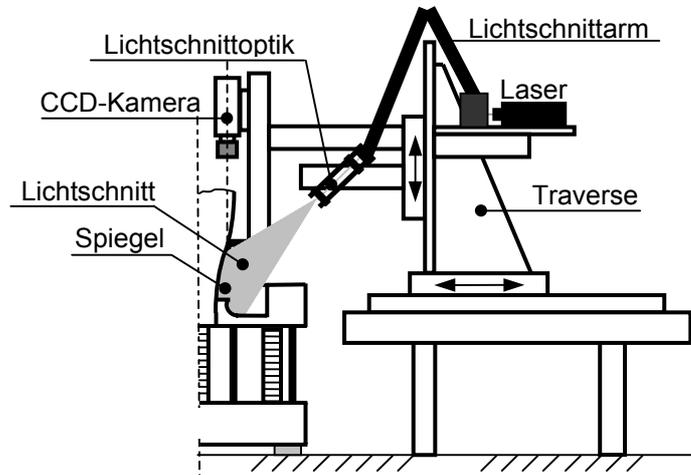


Abb. 2: Aufbau des Messsystems für die Visualisierungen und PIV-Messungen

Alternativ können dem Luftstrom am Einlauf Nebel für die Visualisierungen oder Tracerpartikel für die PIV-Messungen zugegeben werden. Zur Erzeugung des Nebels steht ein Nebelgenerator Typ "F 2010" der Fa. "SAFEX" zur Verfügung, der mit einem Nebelfluid auf Alkohol-Wasser-Basis arbeitet. Als Tracerpartikel für die PIV-Messungen werden "DEHS-Tröpfchen" mit einem mittleren Durchmesser von $5\mu\text{m}$ verwendet, die in einem Partikelgenerator (siehe Xiong 2000) erzeugt werden.

Versuchsdurchführung und Auswertung der PIV-Aufnahmen

PIV-Messungen und Visualisierungen wurden für unterschiedliche mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeiten zwischen 8 und 50m/s am unbeheizten und beheizten Konturmodell und an den Zylindern durchgeführt. Für die Messungen am beheizten Konturmodell wurde im Bereich des Ringspalts eine Temperatur von 200°C eingestellt. Mit zunehmendem Abstand zum Ringspalt sinkt die Temperatur bis auf 100°C an der imaginären Frostlinie des Modells.

Da der Bereich, der mit der CCD-Kamera aufgenommen werden kann, für die gewählten Einstellungen nur bei ca. $30 \times 37\text{mm}$ liegt, wurde das Messsystem mit der Traversierung bei konstanter Düsenaustrittsgeschwindigkeit mehrmals neu positioniert, um die Strömung bis zu einem Abstand von ca. 150mm über der Düse zu untersuchen. An jeder Position wurden für die PIV-Messungen jeweils 100 Doppelbilder aufgenommen. Zur Bestimmung der Geschwindigkeitsvektoren wurden Auswertefenster der Größe 16×16 Pixel mit einer Überlappung von 50% gewählt. Das Konturmodell bzw. der Zylinder und die Düse werden bei der Auswertung durch eine Maske ausgeblendet. Aus den 100 momentanen Geschwindigkeitsverteilungen wird eine mittlere Geschwindigkeitsverteilung berechnet. Um die zeitlichen Fluktuationen zu bestimmen, wird diese von den momentanen Geschwindigkeitsverteilungen abgezogen. Hierbei ergeben sich falsche Vektoren überall dort, wo die Vektorfelder der momentanen Geschwindigkeitsverteilung fehlende Vektoren aufweisen, die in einem zweiten Schritt auf geeignete Weise aus den Datensätzen gelöscht werden.

Messergebnisse Konturmodell

Zunächst sollen die Ergebnisse der PIV-Untersuchungen am unbeheizten Konturmodell vorgestellt werden. Abb. 3 zeigt für die mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit 42m/s exemplarisch eine momentane Geschwindigkeitsverteilung (links), das über 100 Bilder gemittelte Vektorfeld (Mitte) und die zugehörigen momentanen Fluktuationen (rechts) im Bereich bis ca 35mm über dem Düsenaustritt. Zur besseren Übersicht zeigt das mittlere Bild nur jeden vierten Vektor in Längsrichtung der Kontur.

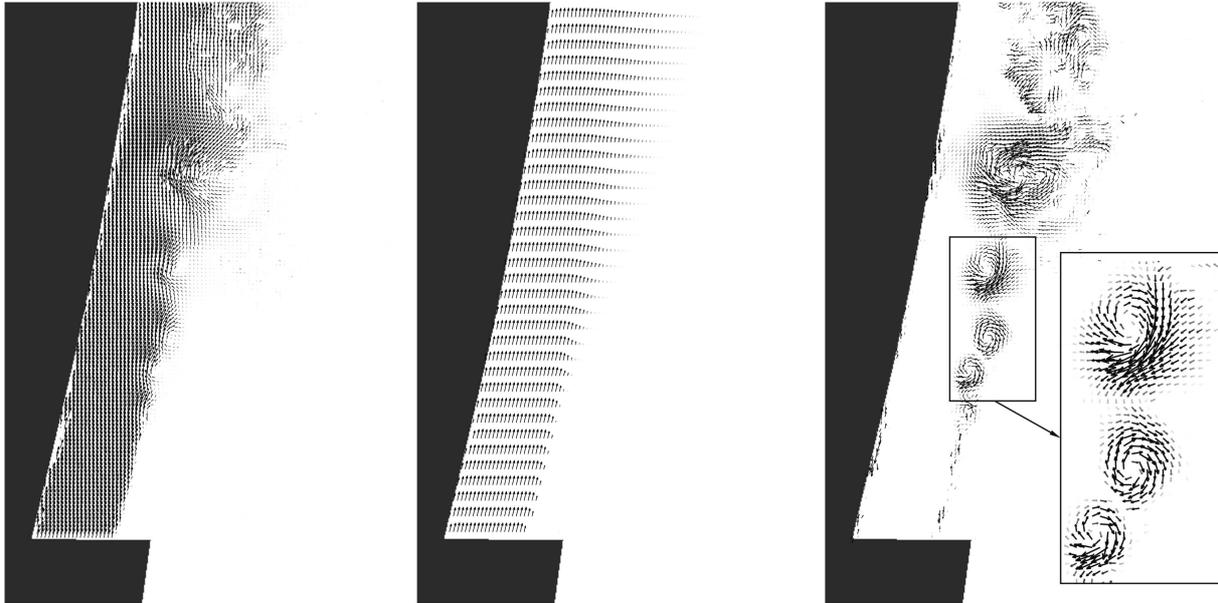


Abb. 3: Momentanes Geschwindigkeitsfeld (links), gemitteltes Geschwindigkeitsfeld (Mitte) und Vektorfeld der zeitlichen Fluktuationen (rechts) im Bereich des Düsenaustritts. Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit 42m/s. Unbeheiztes Konturmodell.

Obwohl sich die einzelnen momentanen Vektorfelder stark unterscheiden, ergibt die Mittelung über 100 Einzelbilder ein stetiges Geschwindigkeitsfeld. Am Düsenaustritt liegt zunächst ein von der Geometrie der Düse geprägtes kastenförmiges Geschwindigkeitsprofil vor, mit starken Geschwindigkeitsgradienten sowohl zur Wand als auch zur ruhenden Umgebung. Mit zunehmendem Abstand zum Düsenaustritt nimmt der Übergang zur Umgebung einen asymptotischen Verlauf an und es bildet sich ein Geschwindigkeitsmaximum in der Kernströmung aus. Die Differenz zwischen momentanem und mittlerem Geschwindigkeitsfeld zeigt, dass große Fluktuationen in der Scherschicht zwischen Düsenströmung und Umgebung entstehen. Kurz hinter der Düse liegen nur geringe Fluktuationen vor, mit zunehmendem Abstand zeigen sich aber Wirbel in der Scherschicht. Diese wachsen an und platzen schließlich auf. Die PIV-Messungen am beheizten Konturmodell zeigen qualitativ die gleichen Ergebnisse.

Weitere wesentliche Aussagen gehen aus den Visualisierungen hervor. Abb. 4 zeigt links zwei Aufnahmen am unbeheizten Konturmodell für die mittleren Düsenaustrittsgeschwindigkeiten von 16 und 24m/s und rechts entsprechende Aufnahmen am beheizten Konturmodell. Die Bilder zeigen wieder den Bereich bis ca. 35mm über dem Düsenaustritt.

Die Visualisierungen sind sehr anschaulich und bestätigen die Ergebnisse der PIV-Messungen. Die Struktur der Strömung lässt sich in drei Bereiche unterteilen: Kurz hinter dem Düsenaustritt verläuft sie zunächst parallel zur Wand und grenzt sich klar gegen die

ruhende Umgebung ab. Im zweiten Bereich wird Fluid aus der Umgebung in die Strömung eingesogen. Hierdurch werden die in der Scherschicht entstehenden Wirbel sichtbar. Die Wirbel wachsen mit weiter zunehmendem Abstand an und platzen schließlich im dritten Bereich auf. Hier kommt es nun zu einer intensiven Vermischung zwischen Düsenströmung und Umgebungsluft. Der Vergleich der Visualisierungen am beheizten und unbeheizten Konturmodell zeigt entsprechend den PIV-Messungen keine nennenswerten Unterschiede in Bezug auf die Strömungsstruktur der Scherschicht.

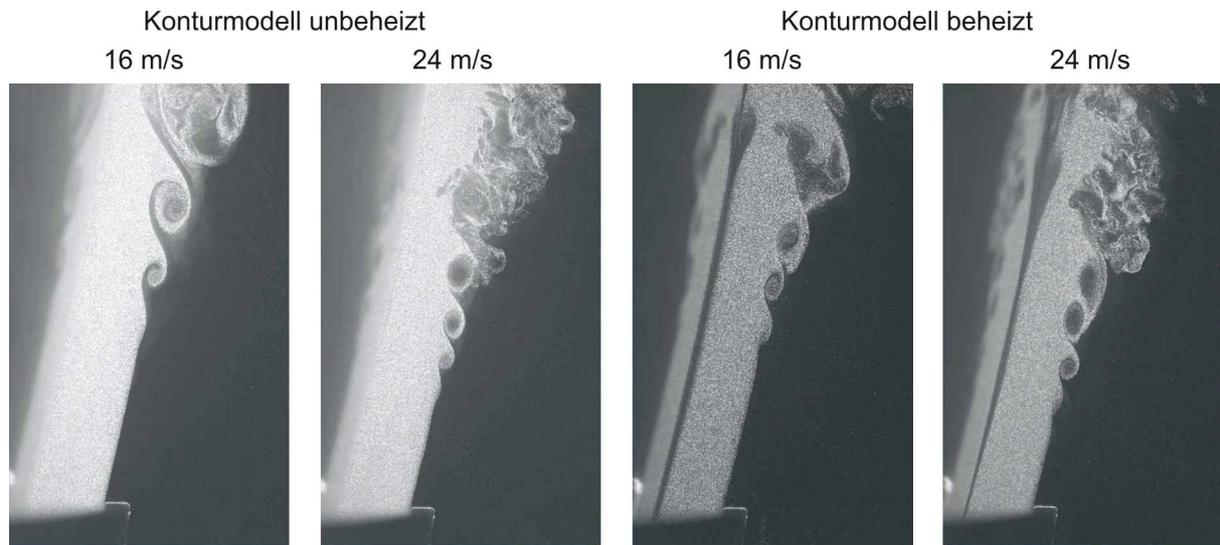


Abb. 4: Visualisierung der Kühlluftströmung am unbeheizten (links) und beheizten (rechts) Konturmodell. Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit 16 und 24m/s.

In Hinblick auf die eigentliche Fragestellung, warum verschiedene Folienelemente unterschiedliche Abkühlgeschichten haben, ergeben die Visualisierungen am beheizten Konturmodell neue wichtige Erkenntnisse. Diese Aufnahmen zeigen eine wandnahe Schicht ohne Partikel. Hier verdampfen die Nebeltröpfchen, wodurch sie die thermische Grenzschicht sichtbar machen. Nach dem Düsenaustritt verläuft diese Schicht zunächst wandnah und wird auch durch die in der Scherschicht entstehenden Wirbel nicht gestört. Die thermische Grenzschicht bleibt ungestört und der Wärmeübergang ist stationär. Sobald die Wirbel aufplatzen zeigt die thermische Grenzschicht Ausbeulungen. Die aufplatzenden Wirbel schlagen bis zur Wand durch. Der Wärmeübergang und damit die Abkühlung der Folie wird instationär und die verschiedenen Folienelemente erfahren unterschiedliche Abkühlgeschichten.

Um geeignete Maßnahmen zur Vermeidung des instationären Wärmeübergangs treffen zu können muss zunächst untersucht werden, wie und in welcher Form die Struktur der Kühlluftströmung beeinflusst werden kann. Das erste Ergebnis hierzu liefert bereits der Vergleich zwischen den Aufnahmen für unterschiedliche Düsenaustrittsgeschwindigkeiten in Abb 4. Man sieht, dass mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit das Aufplatzen der Wirbel näher an den Düsenaustritt heranrückt.

Als nächste Einflussgröße wurde die Spaltweite zwischen Düse und Kontur untersucht. Die Ergebnisse hierzu sollen im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

Messergebnisse Zylinder

Um variabel zu sein, wurde das Konturmodell gegen die Basisgeometrie „Zylinder“ mit unterschiedlichen Durchmessern und Düse 2 mit dem Innendurchmesser 150mm ausgetauscht (vergleiche Abb. 1). Abb. 5 zeigt Visualisierungen an den Zylindern für die mittleren Düsenaustrittsgeschwindigkeiten 8 und 42m/s. Dargestellt sind die Aufnahmen für die Bereiche Düsenaustritt bis ca. 35mm über dem Düsenaustritt (unten) und 30mm bis 65mm über dem Düsenaustritt (oben).

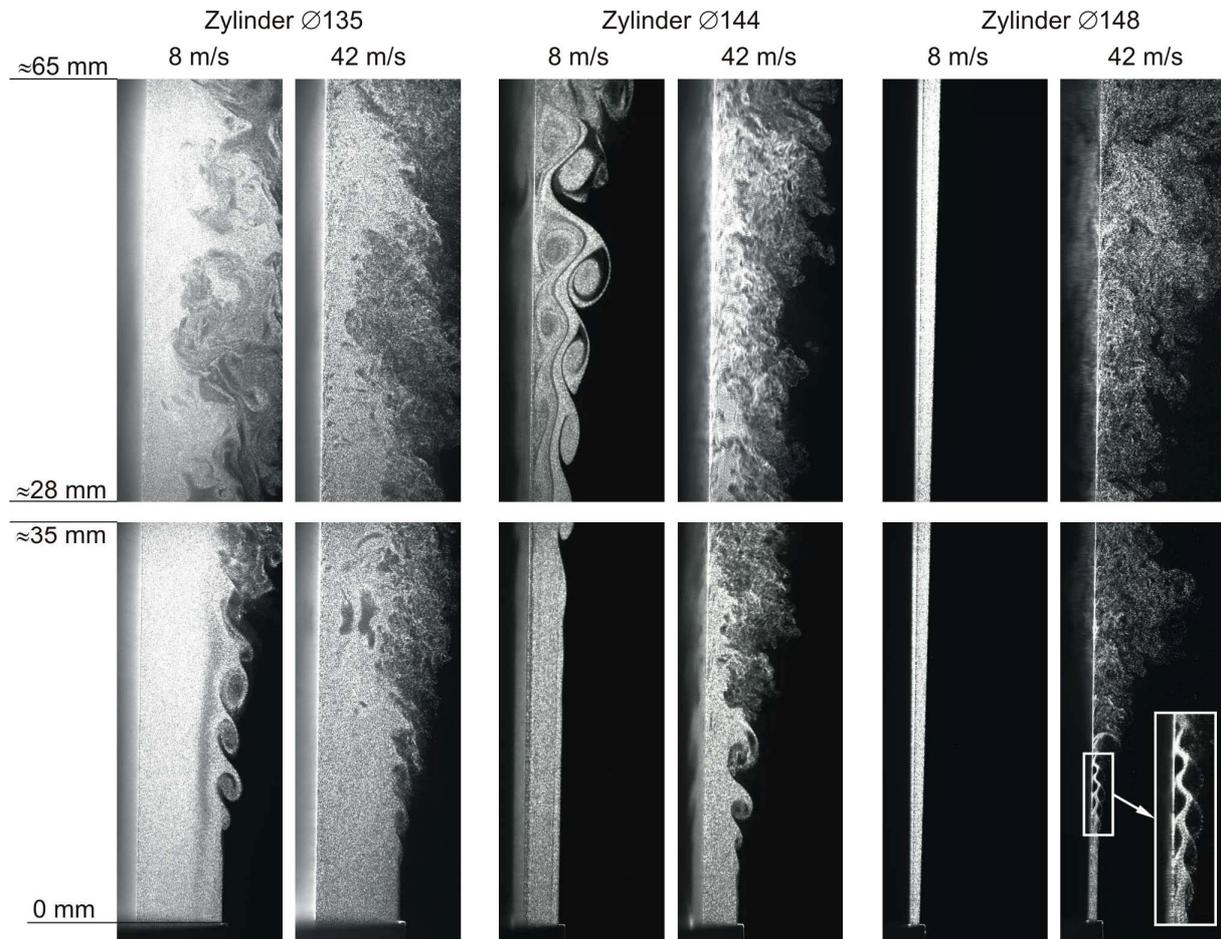


Abb. 5: Visualisierung der Kühlluftströmung an Zylindern mit den Durchmessern 135mm (links); 144mm (Mitte) und 148mm (rechts). Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit 8 und 42m/s. 0 bis 35mm über dem Düsenaustritt (unten) und 30 bis 65mm über dem Düsenaustritt (oben)

Auch die Visualisierungen an den Zylindern zeigen deutlich die drei Bereiche mit den oben beschriebenen unterschiedlichen Strömungsstrukturen. Für eine mittleren Düsenaustrittsgeschwindigkeit von 8m/s zeigt sich, dass bei kleiner werdender Spaltweite der Bereich, in dem die Strömung parallel zur Wand verläuft, deutlich größer wird. Für den Zylinderdurchmesser 148mm erfolgte die Wirbelbildung und das Aufplatzen erst außerhalb des dargestellten Bereichs.

Wie schon in Abb. 4 so wird auch in Abb. 5 deutlich, daß mit zunehmender Geschwindigkeit das Aufplatzen der Wirbel näher zum Düsenaustritt rückt. Die Aufnahmen für die Geschwindigkeit 42m/s zeigen zudem, dass sich der Einfluss der Spaltweite mit zunehmender Düsenaustrittsgeschwindigkeit umkehrt. Das Aufplatzen der Wirbel rückt nun, bei kleiner werdender Spaltweite, näher zum Düsenaustritt hin. Der Bereich in dem die Strömung

parallel zur Wand verläuft bleibt bei dieser Geschwindigkeit unabhängig von der Spaltweite in etwa gleich groß und der Bereich vom Entstehen bis zum Aufplatzen der Wirbel wird mit abnehmender Spaltweite deutlich kleiner.

Die PIV-Messungen ergeben, wie schon beim Konturmodell, stetige Geschwindigkeitsfelder für die Mittelung über 100 Momentaufnahmen. Um die Entwicklung der Strömung mit zunehmendem Düsenabstand zu veranschaulichen, zeigt Abb. 6 die gemessenen Geschwindigkeitsprofile für einige ausgewählte Abstände. Dargestellt sind die Diagramme für die Zylinder mit den Durchmessern 135mm (links) und 144mm (rechts) bei gleicher mittlerer Düsenaustrittsgeschwindigkeit von ca. 35m/s. Die x-Achse des gewählten Koordinatensystems zeigt tangential zur Kontur nach oben und die Y-Koordinate, senkrecht dazu, radial nach außen. Die Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung wird mit u bezeichnet.

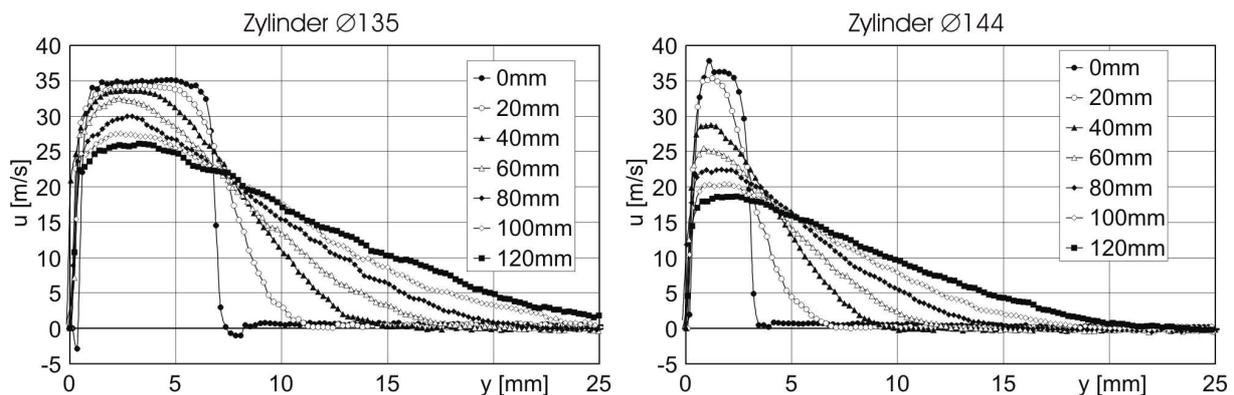


Abb. 6: Geschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Abstände zum Düsenaustritt Zylinderdurchmesser 135mm(links) und 144mm (rechts). Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit ca. 35m/s.

Für beide Zylinderdurchmesser zeigen sich, wie beim Konturmodell, am Düsenaustritt kastenförmige Strömungsprofile mit starken Geschwindigkeitsgradienten zur Wand und zur Umgebung. Mit zunehmendem Abstand zur Düse nimmt der Übergang zur ruhenden Umgebung einen asymptotischen Verlauf an und in der Kernströmung bildet sich ein Geschwindigkeitsmaximum aus. Bei weiter zunehmendem Abstand dehnt sich die Strömung in die Umgebung aus und das Geschwindigkeitsmaximum flacht ab. Die Geschwindigkeitsprofile bei kleiner Spaltweite (Zylinderdurchmesser 144mm) flachen dabei deutlich schneller ab als bei großer (Zylinderdurchmesser 135mm).

Wenn der Spalt sehr viel kleiner als der Zylinderdurchmesser ist, kann die Kühlluftströmung als ebener Wandstrahl bei ruhender Umgebung angesehen werden. Für diesen Strömungsfall hat Förthmann (1934) eine Selbstähnlichkeit der Geschwindigkeitsprofile ab einem gewissen Düsenabstand experimentell ermittelt. Durch eine geeignete Normierung liegen in diesem Strömungsfall die Geschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Düsenabstände deckungsgleich übereinander. Die Geschwindigkeit u wird hierzu mit der Maximalgeschwindigkeit u_{\max} und der Abstand y mit der Halbweite $y_{0,5}$ normiert. Die Halbweite $y_{0,5}$ beschreibt dabei den Abstand zur Wand, an dem die Geschwindigkeit auf die halbe Maximalgeschwindigkeit abgesunken ist. Die auf diese Weise normierten Geschwindigkeitsprofile sind in Abb. 7 dargestellt.

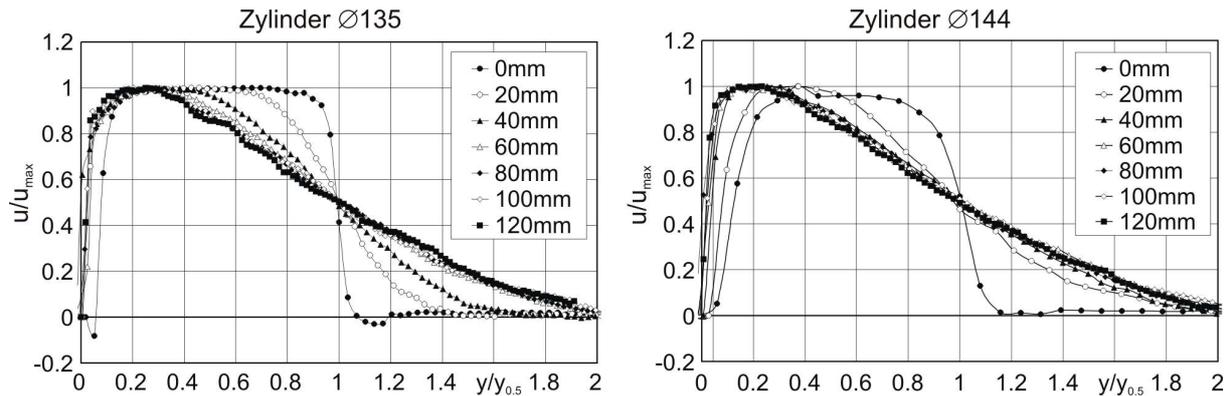


Abb. 7: Normierte Geschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Abstände zum Düsenaustritt Zylinderdurchmesser 135mm(links) und 144mm (rechts). Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit ca. 35m/s.

Die Diagramme zeigen, dass sich auch für die untersuchten Kühlluftströmungen eine Selbstähnlichkeit der Geschwindigkeitsprofile einstellt. Der Abstand zur Düse, ab dem die Selbstähnlichkeit vorliegt, hängt dabei vom Zylinderdurchmesser und damit von der Spaltweite ab. Für den Zylinderdurchmesser 135mm (Spaltweite 7,5mm) beträgt dieser Abstand ca. 80mm und für den Zylinderdurchmesser 144mm (Spaltweite 3mm) ca. 40mm. Die Ähnlichkeit beschränkt sich dabei nicht nur auf die Geschwindigkeitsprofile für einen festen Zylinderdurchmesser. Die selbe Selbstähnlichkeit findet sich auch bei unterschiedlichem Zylinderdurchmessern (bzw. unterschiedlicher Spaltweite).

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Visualisierungen und PIV-Messungen am beheizten und unbeheizten Konturmodell ist es gelungen, die Entstehungsursachen der unterschiedlichen Abkühlgeschichten verschiedener Folienelemente auf das Aufplatzen der Wirbel in der Scherschicht zurückzuführen. Insbesondere die Visualisierungen am beheizten Modell ergeben hier wesentliche neue Erkenntnisse. Die Messungen mit unterschiedlichen Spaltweiten haben gezeigt, dass ab einem gewissen Abstand zur Düse die Strömung einen selbstähnlichen Charakter annimmt, der zudem unabhängig von der Düsenform (Spaltweite) ist.

Im Folgenden sind weitere Untersuchungen geplant, um Möglichkeiten zur positiven Beeinflussung der Düsenströmung zu finden. Auch der Effekt, dass die Nebeltröpfchen verdampfen und so die thermische Grenzschicht sichtbar machen, soll weiter untersucht werden, um hiermit mehr Informationen über die thermische Grenzschicht zu gewinnen.

Dankesworte

Das Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (Pe 401 / 19).

Literatur

- Feron, B., 1999: Entstehungsursachen der Dickenschwankungen bei der Blasfolienextrusion, Dissertation Universität Essen, auch erschienen im Shaker Verlag, Aachen (ISBN 3-8265-4812-4)
- Förthmann, E., 1934: Über turbulente Strahlausbreitung, Ingenieur Archiv, Vol. V (1934), No.1, pp. 210-218
- Ruppel C., Peters F., 2004: The design of a new flow meter for pipes based on the drag force exerted on a cylinder in cross flow (Drag Force Flow Meter: DFFM), erscheint in Journal of Fluids Engineering 2004
- Xiong, W., 2000: PIV-Untersuchungen im Nahfeld von Strömungsgleichrichtern, Dissertation Universität Essen, auch erschienen im Shaker Verlag, Aachen (ISBN 3-8265-7575-X)