



## COATING MATTERS | CURTAIN COATING

### EINFÜHRUNG

Degressionsgewinne werden durch eine große Beschichtungsbreite, hohe Maschinengeschwindigkeit und die Beschichtung in einem Durchgang erzielt. Substrate können mit großer Bahnbreite hergestellt werden und Mehrschichtauftrag erweitert das Endprodukt, aber wie kann das beschichtete Produkt schneller hergestellt werden? Das erste Problem ist die Aushärtung (in der Regel der Engpass im Prozess). Zuerst muss ein Trockenofen in der richtigen Größe für die Anwendung ausgewählt werden. Dann ist die Strömungsdynamik im Beschichtungssystem zu berücksichtigen. Je schneller eine Flüssigkeit aufgebracht wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Filmrisse, Turbulenzen und Luft die Beschichtung beeinträchtigen und einen Pfad von Beschichtungsdefekten hinterlassen.

Bestimmte Beschichtungstechniken funktionieren jedoch besser mit höheren Maschinengeschwindigkeiten. Eine für hohe Geschwindigkeit geeignete Beschichtungstechnik ist das Curtain-Coating. Stellen Sie sich eine Schlitzdüse vor, dicht an der Bahn, die dann angehoben wird, sodass die Flüssigkeit wie ein Vorhang auf das Substrat fällt. Dieser „Flüssigkeitsregen“ kann gewisse Vorteile bieten, aber nur bei hohen Maschinengeschwindigkeiten. Woran liegt das? Die grundlegende Gleichung zur Berechnung eines fallenden Flüssigkeitsvorhangs ist die dimensionslose Weber-Zahl.

$$We = \rho QV/\sigma$$

We = Weber-Zahl

$\rho$  = Dichte

Q = Volumenstrom

V = Anströmgeschwindigkeit

$\sigma$  = Oberflächenspannung



Die Weber-Zahl gibt die für eine erfolgreiche Beschichtung benötigte Curtain-Höhe an. In der Regel sollten die Beschichtungsbedingungen eine  $We > 2$  ergeben. Dies gilt als Stabilitätsbereich für die Flüssigkeit. Bei einer  $We < 2$  wird der konstante Flüssigkeitsstrom unterbrochen und statt eines kontinuierlichen Vorhangs fallen einzelne Tröpfchen. Es auch ist möglich, den Curtain-

[www.slotdies.com](http://www.slotdies.com)

Article written by Mark Miller, Co-Founder of Coating Tech Slot Dies.



## COATING MATTERS | Curtain Coating

2

Strom unter anderen Bedingungen aufrechtzuerhalten, aber dies ist ein guter Anfang. Sehen wir uns die einzelnen Komponenten an. Die Weber-Zahl drückt das Verhältnis zwischen Dichte, Volumenstrom und Durchflussrate zur Oberflächenspannungskraft aus. Die Durchflussrate wird auch als Anströmgeschwindigkeit der Flüssigkeit bezeichnet – je größer die Fallhöhe der Flüssigkeit, desto höher die Geschwindigkeit. Die Beschichtungsdicke des Produkts wird durch die Maschinengeschwindigkeit und die Pumpendrehzahl bestimmt. Bei einer festgelegten Pumpendrehzahl (Volumenstrom) entsteht bei höherer Maschinengeschwindigkeit eine geringere Beschichtungsdicke. Wenn die Flüssigkeit bei hohem Durchsatz und geringer Maschinengeschwindigkeit aufgebracht wird, entsteht eine hohe Beschichtungsdicke. Wenn das Produkt also eine geringe Beschichtungsdicke erfordert, muss entweder die Höhe oder die Durchflussrate angepasst werden, um die Stabilitätskriterien zu erfüllen ( $We > 2$ ).

Da Dichte und Oberflächenspannung der Flüssigkeit verhältnismäßig unveränderlich sind, sind der Volumenstrom und die Höhe des Vorhangs die einzigen anpassbaren Variablen, um ein annehmbares Beschichtungsfenster zu erzielen.

Es gibt noch eine Reihe weiterer Variablen, die den Durchfluss und die Stabilität der Flüssigkeit beim Curtain-Coating beeinflussen, die anhand der Weber-Zahl bestimmten Stabilitätskriterien sind jedoch ein guter Ausgangspunkt. Das Beschichtungsfenster selbst wird durch das Verhältnis der Reynolds-Zahl und der Maschinengeschwindigkeit zur Anströmgeschwindigkeit berechnet.

$$Re = \rho Q / \mu$$

Re = Reynolds-Zahl

$\rho$  = Dichte

Q = Volumenstrom

$\mu$  = Viskosität

U/V

U = Maschinengeschwindigkeit

V = Anströmgeschwindigkeit

Wenn das U/V-Verhältnis gering ist, zerfällt der Beschichtungsvorhang (ähnlich wie bei einer



## COATING MATTERS | Curtain Coating

3

geringen Weber-Zahl). Wenn das Verhältnis zwischen  $Re$  und  $U/V$  ausgeglichen ist, ist die Beschichtungsflüssigkeit stabil. Mit zunehmendem  $U/V$ -Verhältnis wird Luft zum Problem, da die Maschinengeschwindigkeit höher ist als die Flüssigkeitsgeschwindigkeit.

Mit diesen wenigen Variablen und einfachen Gleichungen können Sie die Geschwindigkeit und die Leistungsfähigkeit Ihrer Curtain-Coating-Anwendung erheblich verbessern.

### VORTEILE

Prinzipiell unterscheidet sich Curtain-Coating vom Proximitätsauftrag nur durch den Abstand vom Substrat. Neben diesem Abstand sind jedoch zusätzlich viele der grundlegenden physikalischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Beide Systeme entwickeln einen Meniskus, eine dynamische Benetzungslinie und eine freie Oberfläche. Beide Systeme erfordern präzisionsgeschliffene Kanten und Stirnflächen, damit die Schlitzdüse gut funktioniert. Beide Systeme erlauben einen Mehrschichtauftrag, der ein Endprodukt mit mehreren Schichten erzeugt. Zudem ist sowohl für den Proximitätsauftrag als auch für das Curtain-Coating die Entwicklung einer optimalen Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Substrat nötig, um Lufteinschlüsse zu reduzieren.

Beim Proximitätsauftrag entspricht der Spalt zwischen der Schlitzdüse und dem Substrat der Dicke der nassen Beschichtung. Beim Curtain-Coating ist der Abstand wesentlich größer und wird nicht nur von der Dicke der nassen Beschichtung, sondern auch der Maschinengeschwindigkeit, der Anströmgeschwindigkeit sowie der Dichte und Viskosität der Beschichtungsflüssigkeit bestimmt. Dieser zusätzliche Abstand ermöglicht die Beschichtung unebener Oberflächen, bei denen kein Proximitätsauftrag möglich ist. Beispiele hierfür sind Nonwoven-Substrate und Glasscheiben.

Die hydrodynamische Stützung ergibt sich aus dem Abstand zwischen dem Austritt der Schlitzdüse und dem Substrat, der Ausrichtung nach Schwerkraft im Verhältnis zur Strömungsrichtung und der Flüssigkeitsdynamik beim Auftreffen auf das Substrat.

Ob bei der Beschichtung einer kontinuierlichen Bahn oder von Einzelteilen ist das Curtain-Coating vorteilhaft in Bezug auf die Geschwindigkeit, die beim Proximitätsauftrag begrenzt ist. In der Anfangszeit des Curtain-Coating wurde die Flüssigkeit als Film über Teile gegossen und die überschüssige Flüssigkeit wurde gesammelt und zur kontinuierlichen Verwendung recycelt. Dies ist immer noch möglich. Wenn jedoch während des Betriebs Lösungsmittel freigesetzt werden, muss das Aufbereitungssystem die Dichte und Viskosität messen, damit bei der Aufbereitung die richtige Menge Lösungsmittel nachgefüllt wird.

Wie schnell muss also die Maschine laufen, was ist der richtige Abstand zwischen Schlitzdüse und Substrat und wie viel Flüssigkeit muss durch die Schlitzdüse gepumpt werden, um einen stabilen



## COATING MATTERS | Curtain Coating

4

Vorhang zu erhalten? Jede Interaktion zwischen Flüssigkeit und Substrat ist aufgrund von Rheologie und Grenzflächendynamik unterschiedlich, aber es gilt die Faustregel, dass eine Durchflussrate von 0,5 cm<sup>3</sup>/s bei einer Höhe von 250 mm für die meisten Anwendungen gut geeignet ist.

Ähnlich wie beim Proximitätsauftrag mit Schlitzdüsen kann mithilfe einer Finite-Elemente-Analyse bestätigt werden, dass der interne Durchfluss für einen stabilen Flüssigkeitsvorhang in der richtigen Dicke über die gesamte Bahn hinweg ausreicht. Die Analyse prüft, ob der Flüssigkeitsvorhang robust genug ist, um einen Durchfluss mit der gleichen Geschwindigkeit, dem gleichen Druckabfall und dem gleichen Volumenstrom an der Austrittsstelle zu gewährleisten.

### NACHTEILE

Die relativ lange Flüssigkeitsbrücke, die beim Curtain-Coating entsteht, unterscheidet sich prinzipiell von der kurzen Flüssigkeitsbrücke beim Proximitätsauftrag mit Schlitzdüsen. Beim Proximitätsauftrag muss ein Meniskus gebildet werden, der die Dicke der nassen Beschichtung an der Grenzfläche zwischen dem Substrat und der Schlitzdüse überbrückt. Beim Curtain-Coating dagegen muss sich der Flüssigkeitsvorhang selbst stützen, bis er am Substrat angelangt ist, wo eine hydrodynamische Stützung den bei allen Beschichtungssystemen nötigen Meniskus bildet.

Dieser recht lange Flüssigkeitsvorhang kann durch einen Luftstrom oder Vibrationen unterbrochen werden. Für die optimale Durchsatzsteuerung ist Folgendes nötig: scharfe Lippen am Austritt der Schlitzdüse zur Steuerung der statischen Kontaktlinie der Flüssigkeit, Kantenführungen zur Steuerung der Flüssigkeitskrümmung, während diese vom Austritt der Schlitzdüse zum Substrat fließt, und Luftabschirmungen, um die Auswirkungen von Luftströmungen auf den Flüssigkeitsstrom zu minimieren.

Um einen stabilen Film über die gesamte Breite des Schlitzdüsenaustritts aufrechtzuerhalten, sind Kantenführungen nötig. Dies können einfache Platten sein, auf denen die Flüssigkeit vom Schlitzdüsenaustritt zum Substrat fließt, oder komplexe Methoden wie flüssigkeitsgefüllte Röhren, die den Vorhang nach unten tragen. Die Kantenstabilität des Vorhangs ist der entscheidende Punkt. Ohne mechanische Kantenführungen würde die Flüssigkeit nach innen abgelenkt. Dies führt zu einer dreidimensionalen Krümmung. Dabei ist das größte Problem an den Kanten der Flüssigkeitsbildung, wo sich die Flüssigkeit „einrollt“ und einen Wulst bildet, der dicker ist als das restliche beschichtete Substrat.

Luftabschirmungen verhindern, dass der Vorhang während des Beschichtungsbetriebs unterbrochen wird. Ein simpler Luftzug aus einem Luftschacht oder von einer Tür kann einen stabilen Vorhang unterbrechen. Für diese mechanischen Luftabschirmungen müssen die Flüssigkeitsbildungszonen am Schlitzdüsenaustritt, die Stabilitätszone des Vorhangs auf dem Weg vom Schlitzdüsenaustritt zum Substrat sowie die Beschichtungsbildungszone auf dem Substrat berücksichtigt werden.



## COATING MATTERS | Curtain Coating

5

Zusätzlich zu Luft- und Vibrationsproblemen, die bei einem nicht gestützten Flüssigkeitsvorhang auftreten können, verursacht die hydrodynamische Stützfunktion eine Betriebseinschränkung und ein kleineres Beschichtungsfenster. Es ist wichtig, auf welche Weise die Flüssigkeit einen Wulst bildet, wenn sie auf das Substrat auftrifft. Die Wulstbildung wird vom Kontaktwinkel bestimmt, der wiederum von der Maschinengeschwindigkeit und dem Benetzungsvermögen der Flüssigkeit auf dem Substrat abhängt. Das Benetzungsvermögen kann durch Haftung zwischen Flüssigkeit und Substrat aufgrund von Oberflächenenergie und Oberflächenspannung verstärkt werden, wird jedoch in erster Linie durch die Maschinengeschwindigkeit und den Volumenstrom geregelt.

Das Verhältnis zwischen Volumenstrom ( $V$ ) und Maschinengeschwindigkeit ( $U$ ) wird bei der Berechnung der Reynolds-Zahl ermittelt. Das  $U/V$ -Verhältnis hat intensive Auswirkungen auf die Wulstbildung der anströmenden Flüssigkeit. Der Wulst muss ein kritisches Stabilitätsniveau erreichen, um Lufteinschlüsse zu entfernen, aber ein zu großer Wulst (eine zu geringe Maschinengeschwindigkeit für den Flüssigkeitsstrom) kann zu Strömungsturbulenzen im anströmenden Wulst und Luftdefekten bahnabwärts führen. Die exakte Reynolds-Zahl und das  $U/V$ -Verhältnis werden empirisch bestimmt.

Die Berechnung der Weber-Zahl ist ein guter Ausgangspunkt, um zu verstehen, wo die Flüssigkeit einen stabilen Vorhang bilden wird. Sie muss jedoch mit dem Verständnis der hydrodynamischen Stützung einhergehen, damit ein brauchbares beschichtetes Produkt entsteht. In der Literatur wird angegeben, dass eine Weber-Zahl ab 2 für einen stabilen Vorhang sorgen sollte. Allerdings hat die Erfahrung gezeigt, dass für einen robusten, stabilen Vorhang in der Regel eine Weber-Zahl über 7 nötig ist. Bei der Entwicklung von Geräten und Beschichtungsmaschinen mit begrenzten empirischen Daten sollte hier die Diskrepanz zwischen Theorie und Realität berücksichtigt werden.

Sowohl für den Proximitätsauftrag als auch das Curtain-Coating ist ein gutes Verständnis der Verteilung des Flüssigkeitsstroms am Schlitzdüsenaustritt wichtig. Dies lässt sich durch eine Finite-Elemente-Analyse bestimmen und anhand von Experimenten verifizieren. Es ist jedoch für beide Methoden nicht ganz einfach, ein Computermodell des Flüssigkeitsstroms außerhalb der Schlitzdüse zu entwickeln. Die Bedingungen im Grenzbereich lassen sich nur schwer kontrollieren. Dies führt zu einem begrenzten Verständnis und einer geringeren Wiederholbarkeit mit empirischen Daten. Navier-Stokes-Berechnungen sind ein guter Ausgangspunkt für ein auf physikalischen Prinzipien beruhendes Strömungskonzept. Zur weiteren Entwicklung mathematischer Modelle sind empirische Messungen der Grenzfläche von Flüssigkeit und Substrat zum Vergleich mit den zu entwickelnden FEA-Modellen nötig.

Bei der Beobachtung der Wulstbildung bei Curtain-Coating-Projekten kann die hydrodynamische Stützung zu einem stabilen Meniskus und Beschichtungsfilm führen – oder auch nicht. Schlimmstenfalls sieht es aus wie ein gezogener Film ohne Wulstbildung. Bei einem intermediären Fluss sieht es aus, als ob ein Wulst gebildet wird, der aber unterbrochen und instabil ist. In beiden Fällen sind



## COATING MATTERS | Curtain Coating

6

Luftschlüsse die Ursache. Luftschlüsse führen zu einem uneinheitlichen Flüssigkeitsstrom und möglicherweise zu Streifen auf der Beschichtungsfläche. Entweder muss der Volumenstrom erhöht oder die Maschinengeschwindigkeit verringert werden. Dabei ist zu beachten, dass das Verhältnis dieser beiden Faktoren zur Entwicklung der gewünschten Beschichtungsdicke für das Produkt verwendet wird.

### FAZIT

Das Curtain-Coating mit Schlitzdüsen ist eine ideale Lösung zur Beschichtung unebener Oberflächen mit hoher Geschwindigkeit. Es sollte immer dann in Betracht gezogen werden, wenn der Proximitätsauftrag nicht möglich ist oder dünnere Beschichtungen und höhere Maschinengeschwindigkeiten nötig sind, um die Kostenvorgaben für die Beschichtung einzuhalten. Diese Überlegungen müssen für jede Maschineneinrichtung neu angestellt werden. Es muss ein Gleichgewicht zwischen einem größeren Beschichtungsspalt, höheren Maschinengeschwindigkeiten und dünneren Beschichtungen einerseits und den Nachteilen von Unterbrechungen durch Luftströme, Vibration sowie den Mindestanforderungen für Maschinengeschwindigkeit und Durchflussrate andererseits erarbeitet werden, damit die Prozessanlage die Kosten- und Leistungsvorgaben einhält. Das Curtain-Coating ist ideal für eine Präzisionsbeschichtung mit größerem Abstand zum Substrat.

### LITERATURHINWEISE

1. Kistler, SF, Schweizer, PM, Liquid Film Coating: Scientific Principles and Their Technological Implications. Chapman & Hall, New York (1997).
2. Guttoff, EB, Cohen, ED, Kheboian, GI, Coating and Drying Defects: Troubleshooting Operating Problems. Wiley-Inter-science, New York (2006).