

Walzenbeschichten mit nicht-Newton'schen Flüssigkeiten

Roll Coating with Non-Newtonian Fluids

1 Einleitung

Beschichtungsverfahren mit rotierenden Walzen sind die Grundlage einer Vielzahl von verschiedenen Produktionsverfahren, wie beispielsweise von Papieren, Magnet- und Klebebändern oder photographischen Filmen. Auch zum Beschichten und Bedrucken von Papier, von metallischen Folien und von Textilfasern (Gewebe) wird ein solcher Prozeß verwendet. In Abb. 1 ist der prinzipielle Aufbau einer Beschichtungsanlage dargestellt. Über eine Abwickelvorrichtung und einen Puffer wird durch eine Transporteinheit das Trägermaterial in den Beschichter gezogen. In einem Trockner wird diese Beschichtung geliert und danach über einen Extruder in einem zweiten Beschichter eine Kunststoffschmelze auf die andere Seite des Trägermaterials gelegt. Nach dem Durchlaufen einer Kühlvorrichtung werden die Kanten geschnitten und die fertige Folie wird aufgewickelt.

Zum Beschichten von ebenen bahnförmigen festen Trägermaterialien werden Flüssigkeiten mit unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften eingesetzt. Beim Rollenbeschichten wird das aufzutragende Fluid von der Auftragswalze (Abb. 2) aus einem Flüssigkeitsbad aufgenommen. Durch die gleichsinnig rotierende Steuerwalze wird ein Teil des Fluids wieder aus dem Spalt zwischen den beiden Walzen ausgezogen. Der auf der Auftragswalze verbleibende dünne Beschichtungsfilm wird dann auf ein zugeführtes Trägermaterial (z. B. Gewebe) aufgetragen. Wichtige verarbeitete Materialien sind Polymere und Silikone mit Viskositäten im Bereich von 0,1 Pas bis 100 Pas, wobei der Abstand zwischen den Walzen h_0 und die Dicke der aufgetragenen Beschichtung h_1 nur wenige μm beträgt.

Das Strömungsfeld wird von den freien Oberflächen der Flüssigkeit und dem dreiphasigen Kontaktpunkt zwischen der festen Walze, der Flüssigkeit und der umgebenden Gasphase beeinflusst (Abb. 3). Dabei stellt sich das Geschwindigkeitsfeld zwischen den Walzen durch das Einwirken von Reibungs-, Trägheits-, Gravitations- und Kapillarkräften ein. Für höher viskose Fluide ist zusätzlich der Einfluß von dissipativen Temperaturerhöhungen zu berücksichtigen. Stabile flüssige Beschichtungen, die den steigenden Anforderungen an die Qualität ihrer Oberflächenstruktur genügen, können nur innerhalb gewisser Grenzwerte der auftretenden Kräfte entstehen. Diese kennzeichnen den Betriebsbereich, der auch als Beschichtungsfenster bezeichnet wird. Um die Strömungsfelder vollständig vorherzusagen, müssen die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie sowie einer weiteren Gleichung für die räumliche Lage der freien Oberflächen unter Berücksichtigung von stoffspezifischen konstitutiven Gleichungen und des möglichen Gleitens der rheologisch sich komplex verhaltenden Flüssigkeiten an den Oberflächen der rotierenden Walzen gelöst werden.

1 Introduction

Application of coatings using rotating rolls is the basis for numerous production processes, such as paper, magnetic and adhesive tape, and photographic film. Other processes that use rotating rolls include coating or printing onto paper, metallic films and cloth. Fig. 1 shows the principal components of a roll-coating process. The substrate proceeds from an unwinder into a buffer region and is then pulled by conveying rollers between the roll coaters. The coating is gelled in the dryer and then passes from an extruder into a second coating section where the opposite side of the substrate is coated with a polymer melt. The material is then pulled through chill rolls and its edges are trimmed before it is wound on a roll as finished film.

Fluids with different rheological properties can be used to coat smooth, web-shaped substrates. In the roll coating process the coating fluid is taken up by a furnishing roll (see Fig. 2). The control roll, which rotates in the same direction as the applicator roll, pulls a portion of the fluid from the gap between the two rollers, thereby controlling the coating thickness. The material remaining is then applied to the substrate as it passes between the applicator and conveying roll. Polymers and silicones with viscosities ranging from 0.1 Pas to 100 Pas are commonly used as coatings. For such materials the distance between the rolls h_0 and the thickness of the coating h_1 is on the order of microns.

The flow field is influenced by the free surface of the fluid and the interface between the three phases, i.e., the fixed rolls, the fluid and the surrounding gas phase (see Fig. 3). The velocity field between the rolls is determined by frictional, inertial, gravitational and capillary forces. For higher viscosity fluids, one must also account for the influence of dissipative temperature increases. Stable fluid coatings that satisfy the demanding surface quality requirements can generally only be obtained by operating within certain values of the existing forces. These limits define the operational (or coatings) window. To completely predict the flow fields one must solve the mass, momentum, and energy conservation equations as well as an additional equation describing the position of the free surface. The latter equation must incorporate a material specific constitutive equation (which may include rheologically complex behavior) and consider possible fluid slip on the roller surfaces.

2 Calculation Procedure

To calculate the flow field between two rolls rotating in the same direction, Klostermann [1] used the mass, momentum, and energy conservation equations as

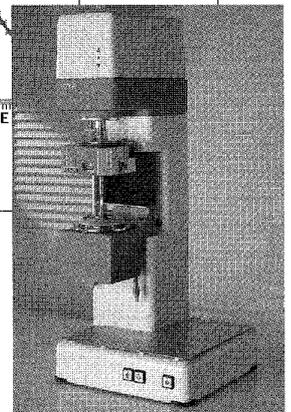
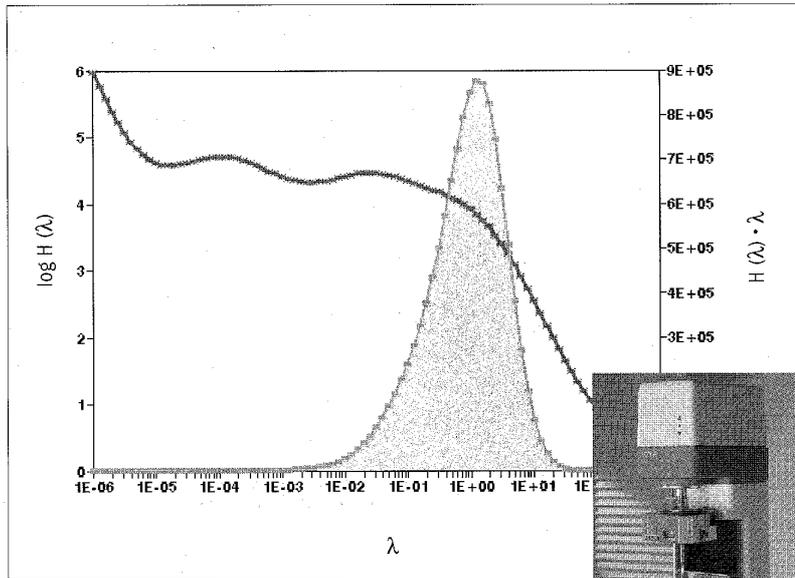


The complete Rheology of your polymer with a HAAKE Rheometer

besitzt daher einen erheblichen Einfluß auf die Strömung und die auf der Auftragswalze verbleibende Beschichtungsdicke [1]. Für eine über die Steuerwalze gekühlte Strömung ist die Beschichtungsdicke am kleinsten. Wird die Steuerwalze gekühlt, so ist die Viskosität an der Oberfläche der Steuerwalze am höchsten. Durch die erhöhten Reibungskräfte in der Nähe der Steuerwalze kann durch die Steuerwalze eine größere Schubspannung in die Strömung übertragen werden.

3.6 Einfluß der Gravitation

In Beschichtungsanlagen werden die rotierenden Walzen in unterschiedlichen räumlichen Anordnungen eingesetzt und sind damit unterschiedlichen Schwerkrafteinflüssen unterworfen. Der Einfluß der Schwerkraft auf die Strömung im Walzspalt ist von der Richtung abhängig, in der die Gravitationskraft wirkt. In Abb. 8 ist daher die dimensionslose Beschichtungsdicke als Funktion der Anordnung der Walzen für verschiedene Stokes-Zahlen dargestellt. Die Anordnung der Walzen wird durch den Winkel α zwischen der x-Achse und der Richtung der Gravitation in Gleichung (9) beschrieben. Eine Änderung der Wirkungsrichtung der Gravitation bedeutet eine Drehung der Walzen um den Koordinatenursprung. Für einen Winkel von $\alpha = 0^\circ$ liegen die Walzen nebeneinander und die Schwerkraft wirkt im Walzspalt der Förderrichtung der Auftragswalze entgegen. Für eine solche Lage ist die berechnete Beschichtungsdicke minimal und geringer als für eine vernachlässigbare Gravitationskraft. Sind die Walzen übereinander angeordnet, beträgt der Winkel 90° bzw. 270° . Der Einfluß der Stokes-Zahl ist dann nur gering. Die größte Beschichtungsdicke entsteht dagegen für einen Winkel zwischen der Richtung der Gravitation und der x-Achse von 180° . Eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Winkels bewirkt eine unterschiedliche Änderung der Beschichtungsdicke, da die in Abb. 8 dargestellten Verläufe nicht exakt symmetrisch sind. Für eine Auftragswalze die oberhalb der Steuerwalze angeordnet ist, wird die Beschichtungsdicke größer als für eine umgekehrte Anordnung, da der Kontaktpunkt nach außen wandert und der Beschichtungsfilm geringfügig gestaut wird. Ursache hierfür ist das ebenfalls nicht symmetrische Strömungsfeld zwischen den Walzen. Ist die Förderrichtung der Auftragswalze der



The complete Rheology of your polymer can be characterized with a HAAKE Rheometer for determining molecular behavior and processability.

Molecular properties:

Dynamic Rheometer RheoStress®

- All in one rheometer
 - controlled stress
 - controlled rate oscillation
 - quantitative normal force
- Highest torque and strain resolution
- Automatic gap control: AutoGap, ThermoGap
- Sophisticated Windows software for:
 - WLF time temperature shift
 - Relaxation spectrum calculation
 - Molecular weight distribution
- Special test sample preparation tool

Processing properties:

Torque Rheometer PolyLab®

- Extrusion capillary rheometer
- Optical tests for "die swell" and pigment distribution
- Compounding with laboratory twin screw extruder
- Mixer tests for analysis of degradation, plastification and fusion

Gebr. HAAKE GmbH
 Dieselstr. 4
 D-76227 Karlsruhe
 Tel. +49 (0)721 40 94-0
 Fax +49 (0)721 40 94 300
<http://www.haake.de>

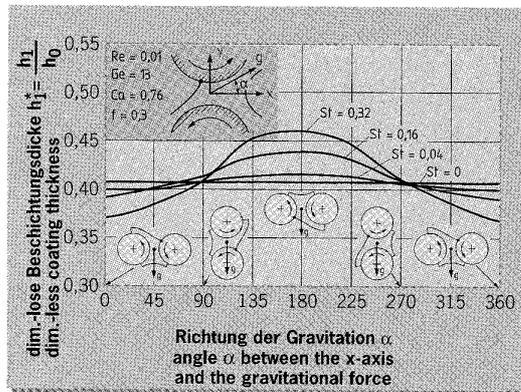
HAAKE (UK)
 Sussex Manor Park
 Gatwick Road, Crawley
 Sussex RH10 2QQ
 Tel. +44 1293 561 323
 Fax +44 1293 516 823

HAAKE Inc. (USA)
 53 W. Century Road
 Paramus, NJ 07652
 Tel. +1 201 265 7865
 Fax +1 201 265 1977

Innovations come from
HAAKE

Abb. 8:
Einfluß der Lage der Walzen für unterschiedliche Stokes-Zahlen

Fig. 8:
The influence of the orientation of the rolls for various Stokes numbers



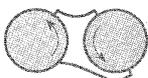
Richtung der Gravitationskraft entgegengerichtet, so wirkt die Gravitation auch der Krümmung der Profile entgegen, das Profil der Horizontalgeschwindigkeit ist im dargestellten Fall fast linear und der geförderte Volumenstrom ist minimal. Weist die Förderrichtung der Auftragswalze dagegen in die gleiche Richtung wie die Gravitationskraft, so ist die Krümmung der Profile der Horizontalgeschwindigkeit sowie der geförderte Volumenstrom maximal.

4 Empirische Näherungsgleichung

Eine einfache Gleichung zur Berechnung der Beschichtungsdicke kann als Erweiterung der Gleichung für die Schmierfilmtheorie um einen exponentiellen Term gemäß Gleichung (10) hergeleitet werden. So kann neben dem Grenzfall der Schmierfilmtheorie auch der in Abb. 6 dargestellte Anstieg der dimensionslosen Beschichtungsdicke mit steigender Friktionszahl berücksichtigt werden [1], [5]. Die Koeffizienten a bis d der Gleichung (10) können als empirische Funktionen der Einflußgrößen berechnet werden. Dazu dienen der Wert h_1^* und die Steigung dh_1^*/df der Verläufe für die Friktionszahl $f = 0$ sowie die kritische Friktionszahl f_{krit} , für die die dimensionslose Beschichtungsdicke minimal ist, als charakteristische Größen. Für die Berechnung der Beschichtungsdicke in Abhängigkeit von der Friktions-, der Kapillar- und der Reynolds-Zahl erhält man aus den charakteristischen Größen die empirische Näherungsgleichung (11).

Ihr Verlauf deckt sich nahezu mit der in Abb. 6 dargestellten durch numerische Berechnung ermittelten Abhängigkeit. Durch weitere multiplikative Terme kann in Gleichung (10) für die vorgegebenen Gültigkeitsbereiche auch der Einfluß der Walzenradien, des Walzabstandes, der Gravitation, der Strukturviskosität und der Temperatur berücksichtigt werden [1].

Rh



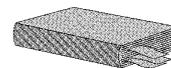
between the effective direction of gravity and the x-axis is 180° . An increase or decrease of this angle results in a non-symmetrical change in the coating thickness, because the curves shown in Fig. 8 are not exactly symmetric. If the applicator roll is positioned above the control roll, the coating thickness will be greater than for the reverse situation, because the contact point migrates outward and the coating bulges slightly out. This is also caused by the non-symmetric flow field between the rolls. If the applicator roll rotation is counter to the effective direction of gravity, the coating profile's curvature is reduced by the effect of gravity. In this case the profile of the horizontal velocity is nearly linear and the volumetric flow is minimal. For the opposite case, i. e., the applicator roll rotates in the same direction as the gravitational force, the curvature of the horizontal velocity profile is maximum, as is the volumetric flow through the nip.

4 Empirical Approximation Equation

A simple equation for calculating the coating thickness can be derived by adding an exponential term to the lubricating film theory equation (see Equation (10)). This modified equation agrees with the lubricating film theory at low friction numbers, but predicts an increasing film thickness with increasing friction number as shown in Fig. 6 [1], [5]. The coefficients a–d in Equation (10) can be calculated as empirical functions of the parameters that influence the process. Characteristic parameters can be defined, including h_1^* , the slope dh_1^*/df at a value $f = 0$, and the critical friction number f_{krit} , which is the value corresponding to a minimum dimensionless coating thickness. An empirical approximation equation that incorporates these characteristic parameters and the friction, capillary, and Reynolds numbers is shown in Equation (11).

The predictions of this equation are nearly identical to the curves shown in Fig. 6, which were determined via numerical calculations. Adding multiplicative terms to Equation (10) allows one to account for the influence of roll radius, roll nip clearance, gravity, shear thinning behavior, and temperature [1].

Rh



- [1] Klostermann R.: „Das Strömungsfeld mit freier Oberfläche zwischen zwei gleichsinnig rotierenden Walzen“; Dissertation, Universität Hannover, 1995
- [2] Coyle D.J., Macosko C.W., Scriven L.E.; AIChE Journal, 36 (1990) No. 2, p.161–174
- [3] Coyle D.J.: in "An introduction to coating and drying technology", Hrsg.: E.D. Cohen, E.B. Gutoff; VCH Publishers, New York, 1991
- [4] Klostermann R., Mewes D.: Kautschuk Gummi Kunststoffe, zur Veröffentlichung angenommen, 1995
- [5] Klostermann R., Mewes D.: Chemie Ing. Technik, zur Veröffentlichung eingereicht, 1996