

ander als auch mit der Adsorbensoberfläche zurückzuführen sind. Erst die Berücksichtigung der energetischen Heterogenität der Adsorbensoberfläche durch die Multiphase IAST oder die Heterogeneous IAST steigert die Qualität der Vorhersage spürbar. Binäre Aktivitätskoeffizienten der adsorbierten Phase haben kaum Einfluß auf das vorausberechnete binäre Adsorptionsgleichgewicht, es sei denn, sie werden aus den binären Gleichgewichten selbst ermittelt.

Die Genauigkeit der Vorausberechnung der Kapazität eines ein- oder mehrkomponentig beladenen Adsorbers ohne experimentelle Daten unter der Voraussetzung ideal adsorbierender Mischungen reicht heute für die Vorprojektierung. Die Voraussage nichtidealer Gleichgewichte gelingt, selbst mit genau vermessenen Einkomponentenisothermen, bisher noch nicht zuverlässig und bedarf der Ergänzung durch binäre Gleichgewichtsmessungen.

57

### Konvektive Trocknung gemischbeladener Güter mit zweiphasiger Gutsfeuchte

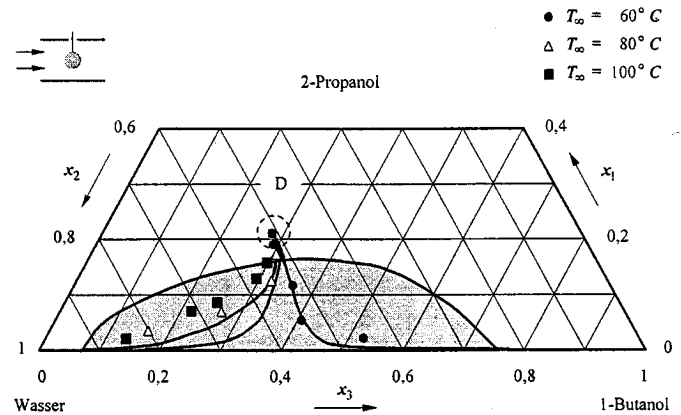
DIPL.-ING. MARTIN STEINBECK (Vortragender),  
 PROF. DR.-ING. DR. H. C. MULT. E.-U. SCHLÜNDER  
 Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstraße 12, D-76128 Karlsruhe.

Neben der Trocknung von wasserfeuchten Gütern ist in vielen Fällen auch die Trocknung von Gütern, die mit einem Flüssigkeitsgemisch beladen sind, von Bedeutung. Weist das Gutsfeuchtegemisch ein Zweiphasengebiet auf, so ist aufgrund einer selektiven Trocknung eine Zusammensetzungsänderung in solcher Weise möglich, daß die Gutsfeuchte im Laufe der Trocknung zwei flüssige Phasen ausbildet. Produkte mit derartigem Trocknungsverhalten sind z. B. Duftstoffe und Gewürze. Ihre Inhaltsstoffe, ätherische Öle und Wasser, sind nur in geringem Maße ineinander löslich.

Die Experimente zur konvektiven Trocknung erfolgten in einem Labortrocknungskanal mit einem Querschnitt von 0,15 x 0,15 m. Zur Untersuchung der unterschiedlichen Einflußgrößen wurden die Trocknungsbedingungen (Temperatur, Luftgeschwindigkeit, Vorbeladung) variiert. Als Modellsystem für die Gutsfeuchte fand das ternäre Gemisch 2-Propanol/Wasser/1-Butanol Verwendung. Dieses Gemisch weist bei geringen 2-Propanol-Konzentrationen eine Mischungslücke auf. Das poröse Trocknungsgut wurde mit einer Gemischzusammensetzung außerhalb des Zweiphasengebietes befeuchtet und anschließend konvektiv getrocknet. Auf Basis einer selektiven Trocknung ist eine zweiphasige Gutsfeuchte erzielbar. Die Auswertung der Versuche liefert Trocknungs- und Zusammensetzungsverlaufskurven (s. Abb.).

Die Trocknungsversuche zur konvektiven Trocknung zeigen einen signifikanten Einfluß der Geschwindigkeit und der Temperatur des Trocknungsmediums auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Sie steigt mit zunehmender Temperatur und Geschwindigkeit der Trocknungsluft. Wenn die Zusammensetzung der Gutsfeuchte in der Nähe der Scheidelinie innerhalb des Zweiphasengebietes liegt, d. h. es bilden sich zwei flüssige Phasen im

Abbildung. Restfeuchtelinien der Trocknung für unterschiedliche Temperaturen, Meßwerte (Symbole) und Rechnung (Linien),  $u = 0,2 \text{ m/s}$ ,  $x_{0,1-\text{Propanol}} = 0,2 \text{ l}$ ,  $x_{0,\text{Wasser}} = 0,5 \text{ l}$ .



Laufe der Trocknung aus, haben die Trocknungsbedingungen einen signifikanten Einfluß auf die Zusammensetzungsänderung der Gutsfeuchte während der Trocknung. Die Selektivität der Trocknung wird im zweiten Trocknungsabschnitt von den Trocknungsbedingungen (Thermodynamik und Kinetik) geprägt. Eine Selektivitätsumkehr kann erreicht werden. Bei niedrigen Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten (schonende Trocknung) besteht die Restfeuchte hauptsächlich aus Butanol, bei hohen Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten (scharfe Trocknung) hingegen aus Wasser. Wenn die Änderung der Gutsfeuchtezusammensetzung außerhalb des Zweiphasengebietes verläuft, ist der Einfluß der Trocknungsbedingungen auf die Zusammensetzungsänderung unbedeutend. Ein einfaches Modell beschreibt diese Phänomene.

Neben den durch das Produkt vorgegebenen Einflußgrößen wie Porenstruktur, Produktabmessung und Gutsfeuchte bestimmen die Trocknungsbedingungen die Selektivität der Trocknung. Bei zweiphasiger Gutsfeuchte kann die Zusammensetzung der Restfeuchte im Gut bei der Trocknung in einem gewissen Maße über die Trocknungsbedingungen gesteuert werden. Eine Verbesserung der Produktqualität durch eine Einstellung der Restfeuchtezusammensetzung ist möglich.

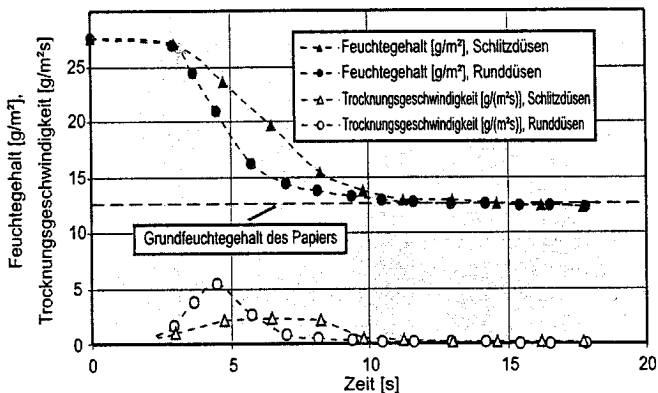
58

### Trocknungsmechanismen bei der Dispersionslackierung

J. MINTZLAFF, PROF. DR.-ING. F. MAYINGER  
 Lehrstuhl A für Thermodynamik, TU München, D-85747 Garching.

Die Papierveredelung dient der Verbesserung der mechanischen, physikalischen und optischen Eigenschaften von Papier durch das Aufbringen einer Beschichtung, etwa durch Kaschieren oder Lackieren. Nicht zuletzt aus ökologischen Aspekten verwendet man bei der Lackierung in letzter Zeit vermehrt Dispersionslacke auf Wasserbasis. Untersuchungsgegenstand ist in diesem Projekt das Trocknungssegment einer Lackiermaschine. Hier kommen

Abbildung.  
Vergleich der Trocknungsverläufe für die Konvektion bei 80 °C Lufttemperatur und 0,25 kg/m<sup>2</sup> s Luftmassenstrom mit Rund- und Schlitzdüsen.



zwei verschiedene Verfahren kombiniert zum Einsatz: Konvektions- und IR-Strahlungstrocknung. Untersucht werden die Mechanismen, die diesen beiden Verfahren zugrundeliegen. Die Optimierung des Trocknungssegments bewirkt zum einen eine Minimierung des Energieverbrauchs und zum anderen eine Verringerung von Anlagengröße und -kosten.

In einer Versuchseinrichtung wurde die Beschichtung von Papierbahnen und die anschließende Trocknung des Verbundes im Labormaßstab durchgeführt. Die Untersuchung der Trocknungsmechanismen vollzieht sich auf drei Ebenen: die lokale Untersuchung der einzelnen Phänomene beim kombinierten Wärme- und Stoffübergang, die globale Untersuchung des Trocknungsverlaufs sowie die Bildung eines theoretischen Modells zur numerischen Berechnung der Trocknung.

Von Relevanz für den Trocknungsverlauf sind sowohl die Vorgänge in der an den Naßfilm grenzenden Luftschicht als auch die Abläufe in Lack und Substrat. Mittels holographischer Interferometrie wurden die thermische Grenzschicht der Prallstrahlströmung untersucht und in Verbindung mit Bilanzmessungen die Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Trocknungsluft-Düsengeometrien und Reynolds-Zahlen ermittelt. Für den hier vorliegenden Fall der turbulenten Strömung mit laminarer Grenzschicht kann man aus der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang auf den Stoffübergangskoeffizienten schließen, da die Lewis-Zahl mit 0,937 für das System Wasserdampf/Luft sehr nahe bei 1 liegt.

In weiteren lokalen Untersuchungen wurden die Fugazität des Wassers im Lack aus Gleichgewichtsversuchen bestimmt, REM-Aufnahmen des Verbundes im Querschnitt angefertigt, die Verteilung der Strahlungsintensität unter dem IR-Trocknungssegment vermessen und das Verhalten des Verbundes im Hinblick auf die Absorption der IR-Strahlung analysiert.

Im Rahmen einer globalen Untersuchung wurden die Trocknungsverläufe der reinen Konvektionstrocknung, der reinen Strahlungstrocknung und einer Kombination beider Verfahren aufgenommen. Die Parametervariation umfaßt Lackauftragsmenge, Düsengeometrie, Trocknungsluftmassenstrom und -temperatur sowie die Wellenlänge der IR-Strahlungsröhren.

Die lokalen Untersuchungen ergaben für die Konvektion bei gleichem Luftmassenstrom einen höheren Wärmeübergang bei der Rund- gegenüber der Schlitzdüsenanordnung, der

sich auch in den globalen Messungen des Trocknungsverlaufes widerspiegelt (s. Abb.). Bei der IR-Trocknung zeigt sich, daß mittelwellige Strahlungsröhren bei gleicher Flächenleistung eine kürzere Trocknungszeit bewirken als kurzwellige.

Anhand eines Vergleichs wird das Trocknungsverhalten der unterschiedlichen Verfahren diskutiert, um Hinweise auf eine optimierte Gestaltung des Trocknungsabschnittes herauszuarbeiten.

## 59

### Trocknung lösemittelhaltiger Polymerfilme

DIPL.-ING. G. R. WAGNER (Vortragender),

EM. PROF. DR.-ING. DR. H. C. MULT. E.-U. SCHLÜNDER

Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstraße 12, D-76128 Karlsruhe.

Die Trocknung lösemittelhaltiger Polymerfilme ist durch eine starke Abnahme der Verdunstungsgeschwindigkeit bei niedrigen Feuchtigkeitsgehalten gekennzeichnet. Diese kann bis zu mehreren Größenordnungen betragen und spielt somit für den ökonomischen Betrieb vieler Produktionsprozesse (z. B. Klebebandherstellung) eine entscheidende Rolle. Hinsichtlich der strengeren Auflagen bezüglich der Emission von Lösemitteln ist man zudem bestrebt, die Restfeuchte im Film weiter zu reduzieren, um somit eine Nachverdunstung außerhalb der Trocknungsanlage auszuschließen.

Das Trocknungsverhalten dünner (ca. 20 bis 40 µm) Polyvinylacetat-Filme, die mit einem Gemisch aus Benzol und Methanol beladen waren und in wasserfreier Luft trockneten, wurde mittels der Fouriertransform-Infrarotspektroskopie untersucht. Die Spektren wurden mit einer Partial-Least-Squares-Methode ausgewertet, welche die Bestimmung der integralen Konzentrationen der einzelnen Lösemittel im Film gestattet. Die Parameter Luftgeschwindigkeit, Anfangszusammensetzung des Films, Trocknungstemperatur, Filmdicke und Vorbeladung der Trocknungsluft mit einem Lösemittel wurden systematisch variiert.

Höhere Luftgeschwindigkeiten führen zwar anfänglich zu höheren Trocknungsraten, für den Gesamtprozeß ist die Überströmgeschwindigkeit jedoch unerheblich. Ursache hierfür ist das schnelle Austrocknen der obersten Schicht des Films („skinning“). Der Diffusionskoeffizient der Lösemittel fällt bei geringen Feuchten stark ab, und somit ist der Stoffübergang durch diese „Haut“ der geschwindigkeitslimitierende Schritt. Die Variation der Anfangszusammensetzung zeigt, daß methanolfeuchte Polymerfilme am schnellsten, benzolfeuchte am langsamsten trocknen. Polymerfilme mit Anfangskonzentrationen zwischen diesen Grenzwerten trocknen anfänglich schneller, der Gesamtprozeß wird jedoch durch die Komponente mit dem kleineren filmseitigen Diffusionskoeffizienten (Benzol) limitiert. Somit liegen alle Trocknungskurven mit ternären Gemischen (PVAc/MeOH/Benzol) zwischen denen der binären. Nur die Filmdicke und die Trocknungstemperatur zeigen einen signifikanten Einfluß auf die Durchtrocknung der