

## Bericht zum Forschungsprojekt 2669

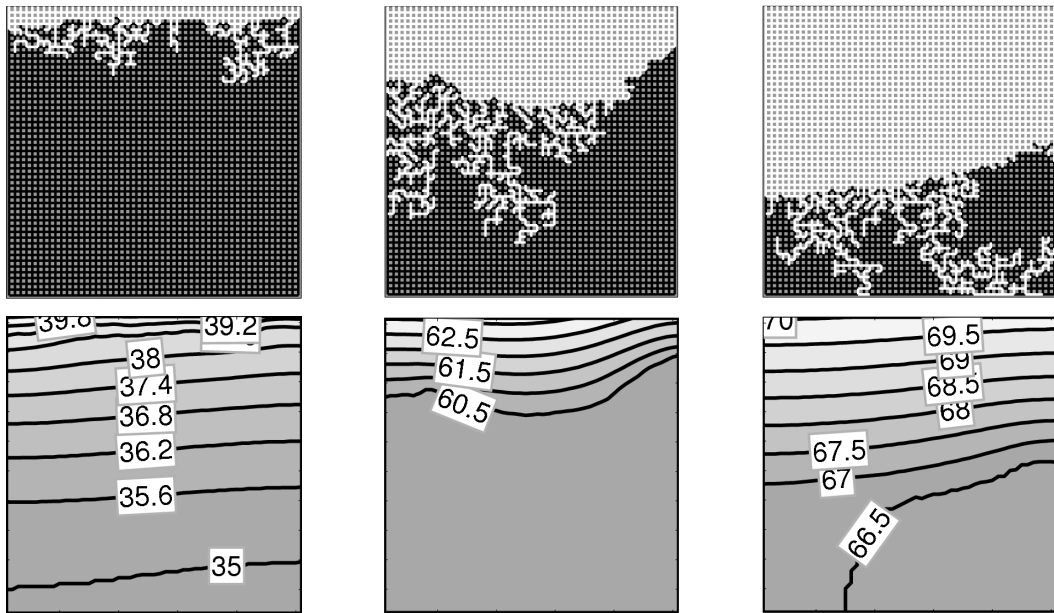
### „Porennetzwerkmodell zur Untersuchung der Trocknung poröser Medien“

Das Forschungsprojekt wurde von Herrn Vikranth K. Surasani am Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Prof. Tsotsas) bearbeitet und war der Juniorprofessur „Porennetzwerkmodelle in der Verfahrenstechnik“ (Jun.-Prof. Metzger) zugeordnet. Es hatte zum Ziel, ein existierendes Porennetzwerkmodell für die Trocknung um Wärmetransportphänomene zu erweitern.

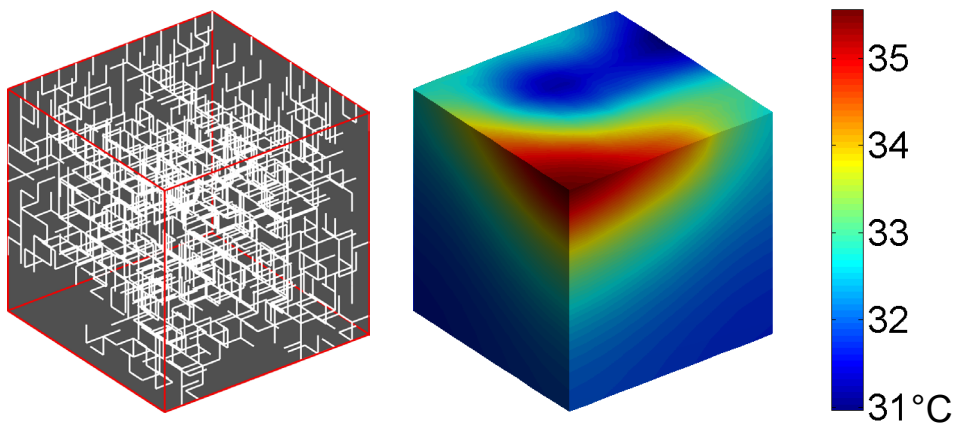
Im zugrunde liegenden isothermen Modell wird das poröse Medium durch ein Netzwerk aus zylindrischen Poren dargestellt und der Stofftransport durch Dampfdiffusion und kapillare Flüssigkeitsströmung (ohne Reibung) beschrieben. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die Massenbilanzen um die Netzwerkknoten durch Enthalpiebilanzen ergänzt. Berücksichtigt werden darin die Wärmeleitung in fester und flüssiger Phase sowie die latente Wärme beim Phasenübergang, jedoch noch nicht der konvektive Wärmetransport mit der Kapillarströmung. Stoff- und Wärmetransport sind aber nicht nur über die Verdunstungsenthalpie gekoppelt, sondern auch über die Temperaturabhängigkeiten von Sattdampfdruck, der als Randbedingung die Dampfdiffusion bestimmt, und Grenzflächenspannung, welche die Kapillardruckverteilung vorgibt. Aufgrund der ersten kann trotz globaler Verdunstung lokal auch Kondensation stattfinden; über die zweite Abhängigkeit ist die Kapillarströmung – und damit besonders auch die Reihenfolge der Porenentleerung – an die Temperaturverteilung gekoppelt. Das entwickelte Modell erlaubt es, den zeitlichen und räumlichen Verlauf von Porensättigung und Temperatur zu berechnen und daraus Trocknungskurven für das Porennetzwerk zu bestimmen. Im Folgenden sollen einige Simulationsbeispiele vorgestellt werden sowie wesentliche Aufgaben bei Modellentwicklung und numerischer Umsetzung.

#### **Trocknungssimulationen**

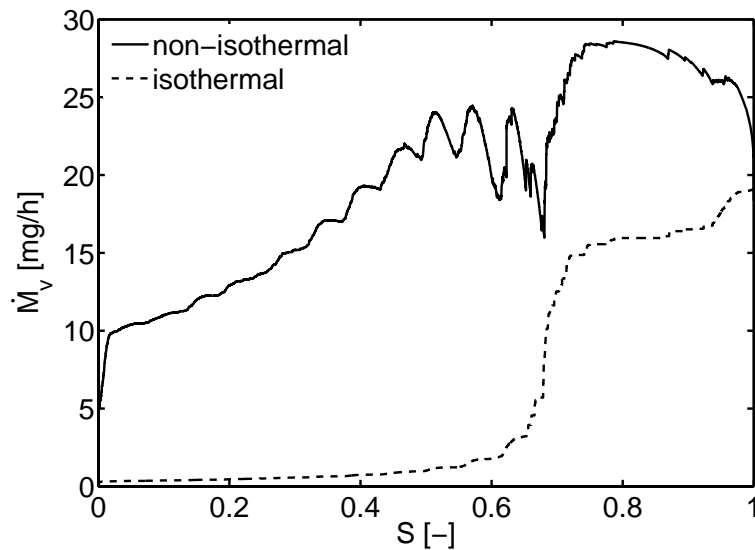
In Bild 1 ist die Konvektionstrocknung eines zweidimensionalen Porennetzwerkes mit monomodaler Porenradienverteilung dargestellt (von oben mit 80°C warmer trockener Luft). Für drei unterschiedliche Netzwerksättigungen sind jeweils die Flüssigkeitsverteilung (in schwarz) sowie das Temperaturfeld (in °C) gezeigt. Entsprechend dem Kapillardruck schreitet die Flüssig-Gas-Phasengrenze bevorzugt durch große Poren voran, so dass sich die Flüssigkeitsverteilung aus der zufälligen Größenverteilung der Poren ergibt. Als Folge beobachtet man eine fraktale Trocknungsfrent mit vielen Flüssigkeitsclustern. Typisch für monomodale Porennetze in 2D ist das frühe Austrocknen der Oberfläche, was dazu führt, dass die Trocknungsrate rasch absinkt und kein erster Trocknungsabschnitt beobachtet wird. Die daraus resultierende Erwärmung des Netzwerkes führt aber aufgrund des ansteigenden Sattdampfdrucks an der Phasengrenze dazu, dass die Trocknungsrate nicht ganz so stark absinkt wie im isothermen Fall. Die Flüssigkeitsverteilungen unterscheiden sich allerdings



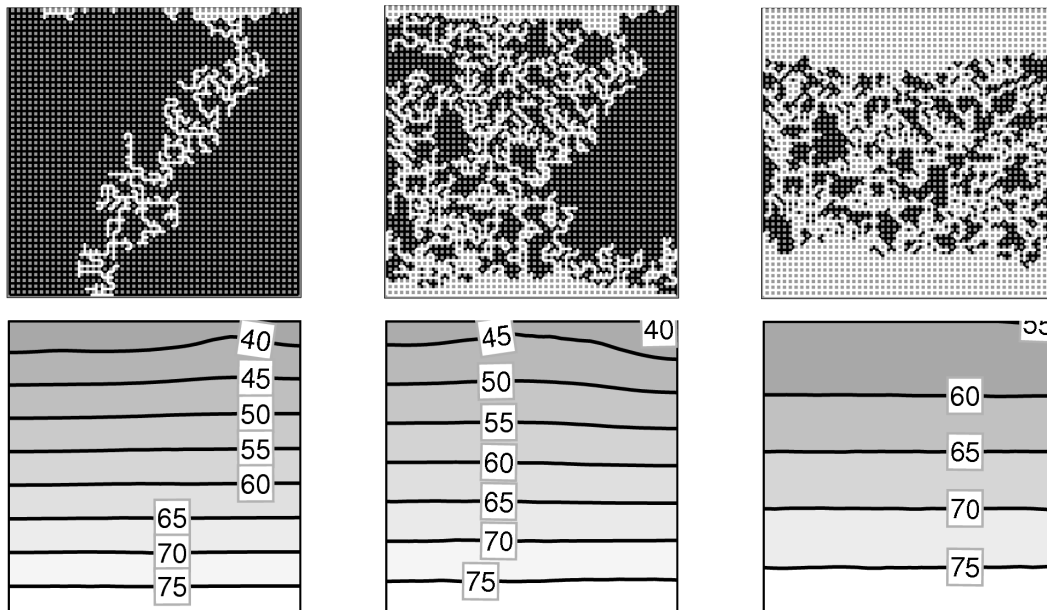
**Bild 1:** Flüssigkeitsverteilung und Temperaturfelder (Isothermen in °C) bei der Konvektionstrocknung eines monomodalen 2D Porennetzwerks.



**Bild 2:** Leere Poren und Temperaturverteilung für konvektiv getrocknetes 3D Porennetzwerk mit monomodaler Porengrößenverteilung (am Ende des ersten Trocknungsabschnitts).



**Bild 3:** Trocknungsrate als Funktion der Flüssigkeitssättigung für konvektiv getrocknetes monomodales 3D Porennetzwerk (siehe Bild 2).

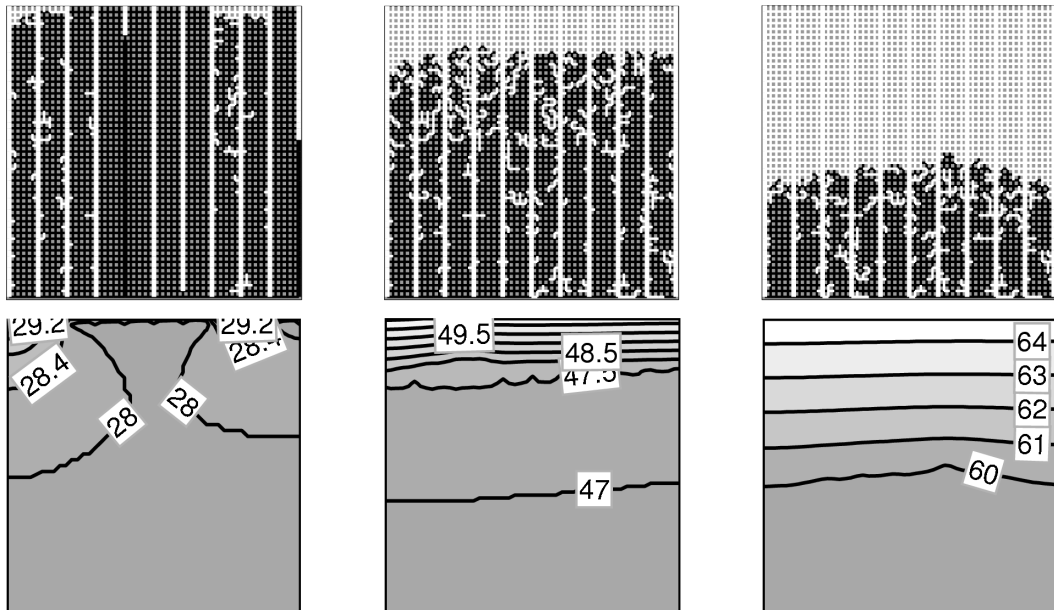


**Bild 4:** Atmosphärische Kontakttdrocknung des monomodalen 2D Porennetzwerks aus Bild 1.

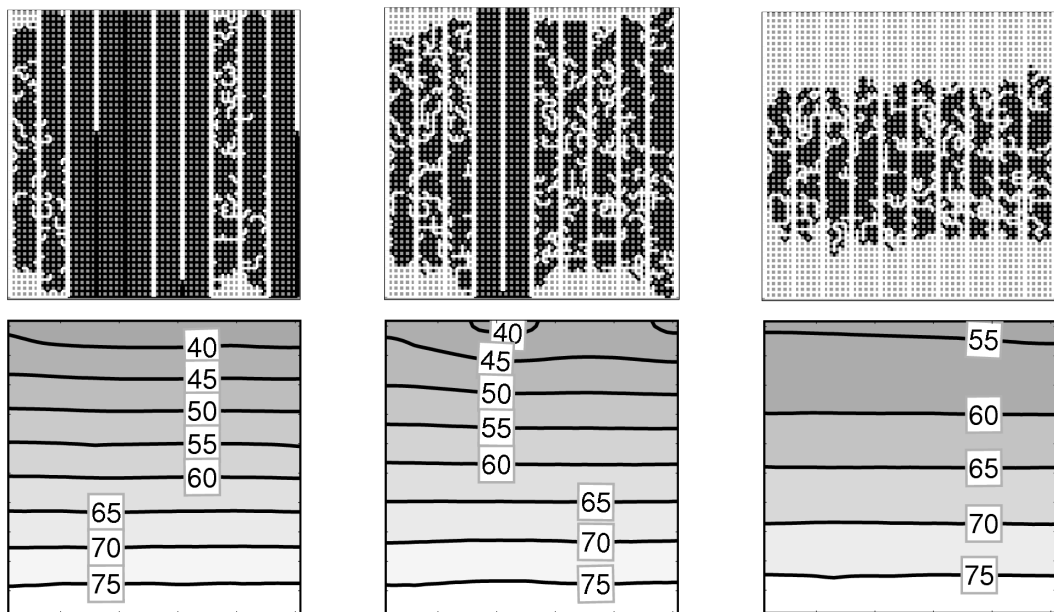
nur unwesentlich von den Isothermen, da die Temperatur über die gesamte Phasengrenze so wenig variiert, dass Kapillardruckunterschiede immer noch von der Porengröße und nicht von einer räumlichen Änderung der Grenzflächenspannung kontrolliert werden.

Bild 2 zeigt für den realitätsnahen Fall eines monomodalen Porennetzwerks in 3D, wie bei einer Flüssigkeitssättigung von 70 % noch feuchte Oberflächenregionen existieren, während das Gas bereits das gesamte Netzwerk durchdrungen hat. Dies ist auch bei der isothermen Trocknung der Fall und führt zu einem ersten Trocknungsabschnitt, wie in Bild 3 dargestellt. Bei Berücksichtigung des Wärmetransports kann man allerdings beobachten, wie die Austrocknung von Oberflächenregionen zu einer Erwärmung führt (siehe Bild 2). Dies wiederum bedeutet, dass die Trocknungsrate im zweiten Trocknungsabschnitt nicht so stark absinkt. (Das Netzwerk ist nicht hygroscopisch, so dass die Trocknungsrate am Ende der Trocknung nicht gegen Null geht.) Damit ist ein wesentlicher Mangel des isothermen Modells behoben, welches unrealistisch niedrige Trocknungsraten im zweiten Abschnitt vorhersagt. Was die Flüssigkeitsverteilungen anbelangt, so sind auch in 3D die Temperaturunterschiede bei der *Konvektionstrocknung* zu gering, um diese merklich zu verändern.

Anders verhält es sich bei der *atmosphärischen Kontakttdrocknung*. In Bild 4 ist dargestellt, wie das Porennetzwerk aus Bild 1 trocknet, wenn man es von unten mit 80°C beheizt und oben mit trockener Luft (20°C) überströmt. Man sieht, dass sich sogleich ein starker Temperaturgradient ausbildet, der sich während der Trocknung nur allmählich abschwächt. Deshalb läuft die Porenentleerung komplett anders ab: nun entleeren sich nicht stets die größeren Poren, sondern bevorzugt auch wärmere Poren, denn für beide ist die Absenkung des Flüssigkeitsdrucks gegenüber dem Gasdruck durch Kapillarität gering. Es bildet sich zunächst ein Gaskanal aus, bevor sich zwei Trocknungsfronten aufeinander zu bewegen, während die teilgesättigte Zone zusätzlich durch Verdunstung im Volumen ausgedünnt wird.



**Bild 5:** Konvektionstrocknung eines bimodalen 2D Porennetzwerks Flüssigkeitsverteilung (in schwarz) und Temperaturfelder (in °C) für die Sättigungen 60 %, 40 % und 20 %.



**Bild 6:** Atmosphärische Kontaktstrocknung des bimodalen 2D Porennetzwerks aus Bild 5.

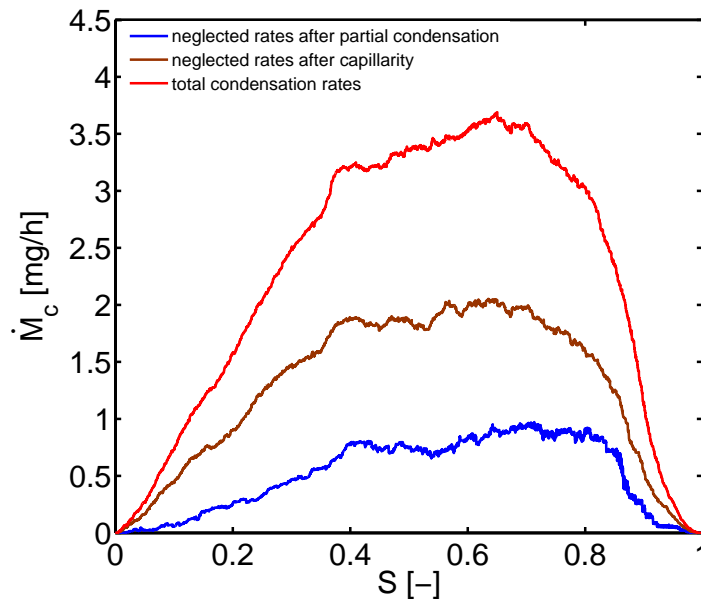
Ein zweidimensionales Beispiel für ein Porennetzwerk mit bimodaler Porengrößenverteilung ist in den Bildern 5 und 6 dargestellt. Die Makrokanäle entleeren sich zuerst, bevor die Mikroporen beginnen auszutrocknen und schließlich eine oder zwei Trocknungsfrenten durch das Netzwerk wandern. Da die Makrokanäle mehr als 40 % des Porenvolumens ausmachen, gibt es nun auch in 2D einen ersten Trocknungsabschnitt. Bei der Konvektionstrocknung ist in Bild 5 rechts das ganze Netzwerk auf Kühlgrenztemperatur; bei der Kontaktstrocknung verhält sich das Temperaturfeld wie im monomodalen Fall. Die höheren Trocknungsraten lassen sich im Kontaktmodus erzielen, wegen der höheren erreichten Temperaturen und des verringerten Abstands von Trocknungsfont zur Netzwerkoberfläche.

## Modellentwicklung und numerische Umsetzung

Die Beschreibung des Wärmetransports machte eine grundsätzliche Änderung bei der Zeitdiskretisierung nötig. Beim isothermen Stofftransport konnte die Dampfdiffusion während der Entleerung einer Pore nämlich als quasistationär behandelt werden; ist eine Pore aber vollständig entleert, so ändert sich die Kapillardruckverteilung, was zu starken Änderungen in der Kapillarströmung führen kann. Dies bedeutet, dass die jeweilige Zeitschrittweite durch die Entleerung einzelner Poren vorgegeben war. Beim Wärmetransport muss hingegen dynamisch gerechnet werden, denn wir sind ja an der Akkumulation von Enthalpie bzw. der Änderung der lokalen Temperatur interessiert. Die Zeitschrittweite muss nun entsprechend den Stabilitätsbedingungen für das dynamische Wärmetransportproblem gewählt werden. In einem anfänglich verwendeten expliziten Löseverfahren war der Zeitschritt so klein, dass die Trocknungssimulation von 2D Netzwerken mehrere Tage in Anspruch nahm. Mit einem semi-impliziten Löseverfahren konnte der Zeitschritt deutlich vergrößert werden, so dass sich die Rechenzeit auf wenige Stunden verkürzte.

Eine zweite Herausforderung stellte die Kondensation an kalten Flüssigkeitsmenisken dar. In vielen Fällen kann diese lokal kondensierte Flüssigkeit durch Kapillarkonvektion zu verdunstenden Menisken abgeführt werden; überwiegt jedoch im gesamten Flüssigkeitscluster die Kondensation, so müsste der Cluster zur Wahrung der Massenbilanz wachsen und es müssten leere Poren wieder befüllt werden. Da die Befüllung von Poren jedoch gänzlich anderen Gesetzen gehorcht als die Entleerung, konnte im Rahmen des Projekts noch keine vollständige Lösung des Problems erreicht werden. Ein wesentlicher Fortschritt wurde jedoch erzielt: es wurde die Pore identifiziert, von welcher das Wachstum eines „kondensierenden“ Clusters starten muss, und für den Fall, dass diese Pore einem verdunstenden Cluster benachbart ist, wurde die Flüssigkeit dorthin abgeführt.

Da die lokalen Kondensationsraten bekannt sind, konnte der Fehler quantifiziert werden. Für den Fall der reinen Konvektionstrocknung wurden nur sehr kleine Kondensationsraten gefunden (insgesamt 1.6 % der Porenflüssigkeit kondensierten im Verlauf der Trocknung), so dass deren unvollständige Berücksichtigung sich nur unwesentlich auf das Trocknungsverhalten auswirken sollte. Im Falle der Kontaktheizung treten über die Trocknungsfront jedoch so große Temperaturunterschiede auf, dass globale Kondensationsraten von ähnlicher Größe wie die Trocknungsrate auftreten. So mussten während der Trocknung des monomodalen 2D Netzwerks mit Kontaktheizung (siehe Bild 4) insgesamt 35% der ursprünglichen Porenflüssigkeit kondensieren. Die entsprechenden Kondensationsraten sind in Bild 7 als obere Kurve dargestellt. Berücksichtigt man die Kompensation der Kondensation durch Verdunstung clusterweise bzw. über die Clustergrenze hinweg, so ergeben sich unterschiedlich große unberücksichtigte Kondensationsraten (mittlere bzw. untere Kurve). Im besten Fall bleiben nur insgesamt 8% der ursprünglichen Porenflüssigkeit unberücksichtigt.



**Bild 7:** Verbesserte Berücksichtigung von Kondensationseffekten (Beispiel Bild 4).

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Einbeziehung des Wärmetransports in das Porennetzwerkmodell für die Trocknung stellt eine wesentliche Verbesserung dar, da die Trocknungsraten im zweiten Trocknungsabschnitt auf realistische Werte angehoben wurden. Bezüglich der verfügbaren Information auf der Mikroebene wurde ein großer Schritt getan, denn neben der lokalen Porensättigung ist nun auch die Temperaturverteilung im Netzwerk verfügbar. Somit lassen sich Struktureinflüsse auf das Trocknungsverhalten und die thermische Belastung während der Trocknung direkt untersuchen. Auch ist es im neuen Modell möglich, unterschiedliche Arten der Wärmezufuhr zu betrachten, wie es am Vergleich von Konvektionstrocknung und atmosphärischer Kontakt-trocknung gezeigt wurde. Der erzielte Fortschritt in der diskreten Modellierung von Transportvorgängen in porösen Medien dokumentiert sich in mehreren Veröffentlichungen in internationalen Fachjournalen (s. u.).

Zukünftige modelltheoretische Arbeiten werden sich mit der Berücksichtigung der viskosen Kapillarströmung in den Enthalpiebilanzen – ein isothermes Modell liegt bereits vor – und der Befüllung von leeren Poren durch Kondensationseffekte befassen. Außerdem sind röntgentomographische Experimente zur Bewertung des Trocknungsmodells geplant, denn diese ermöglichen (für Porengrößen  $> 10 \mu\text{m}$ ) eine Charakterisierung der Porenstruktur und eine Messung der Flüssigkeitsverteilung in den Poren während der Trocknung.

### Veröffentlichungen

1. V.K. Surasani, T. Metzger, E. Tsotsas, Consideration of heat transfer in pore network modelling of convective drying, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51, 2506-2518, 2008.
2. V.K. Surasani, T. Metzger, E. Tsotsas, Influence of heating mode on drying behavior of capillary porous media: pore scale modelling, *Chem. Eng. Sci.* 63, 5218-5228, 2008.
3. V.K. Surasani, T. Metzger, E. Tsotsas, A non-isothermal pore network drying model with gravity effect, submitted to *Transport in Porous Media*.

## **Abstract**

Die Trocknung poröser Medien wurde mit einem diskreten Modell auf der Ebene einzelner Poren beschrieben. Neben der Trocknungskurve können damit Flüssigkeitssättigungen und Temperaturen lokal berechnet werden, so dass der Einfluss von Porenstruktur (z. B. Art der Porengrößenverteilung) und Trocknungsbedingungen (z. B. Konvektions- oder Kontakt-trocknung) auf den Trocknungsverlauf untersucht werden kann.