

## **Bericht zur Max-Buchner-Forschungsarbeit**

„Experimentelle und numerische Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit von Flüssigkeitsfilmen bei der Trocknung poröser Netzwerk“ (MBFSt-Kennziffer: 3739)

Dr.-Ing. Nicole Vorhauer-Huget, Thermische Verfahrenstechnik, Transport in Porous Media, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätstplatz 2, 39106 Magdeburg

### **1. Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Bei der Trocknung poröser Medien, aber auch in anderen verfahrenstechnischen Anwendungen, in welchen mindestens zwei Phasen (Gas und Flüssigkeit) gleichzeitig durch den porösen Feststoff transportiert werden, können hydraulisch leitfähige Flüssigkeitsfilme auftreten. Die Flüssigkeitsfilme bilden sich entlang der Feststoffoberfläche aus, wenn sich die Flüssigkeit aus den Poren zurückzieht. Sie können Durchmesser von mehreren Mikrometern erreichen und sich über eine Distanz von mehreren Porenreihen erstrecken. Flüssigkeitsfilme können damit einen erheblichen Beitrag zum Stofftransport leisten und z.B. zu einer Verkürzung der Gesamttrocknungsdauer beitragen. Das Ziel dieses Projektes war es daher, den Transport von Wasser bei Auftreten von Flüssigkeitsfilmen während der Trocknung von Porennetzwerken zu untersuchen.

### **2. Durchgeführter Arbeitsplan**

Es wurden die experimentellen Ergebnisse von 2D-Porennetzwerken mit abgerundeten Kanalstrukturen, welche durch isotropes nasschemisches Ätzen erzeugt wurden, mit denen aus [1] verglichen. Beide Varianten zeigten ähnliche Kontaktwinkel (zwischen  $20^\circ$  und  $40^\circ$ ) und Benetzungsverhalten. Das Netzwerk in [1] entstand jedoch durch induktionsgekoppeltes reaktives Ionentiefätzen und wies scharfe Kanten auf. Die Porenradienverteilungen der Netzwerke unterschieden sich hinsichtlich der Art der Verteilung und der Kanalgrößen. Im scharfkantigen Netzwerk aus [1] waren die Kanäle (Throats) lognormal-verteilt mit einer mittleren Breite von  $400 \mu\text{m} \pm 61 \mu\text{m}$ . Im abgerundeten Netzwerk aus nasschemischem Ätzen waren die Throats normalverteilt mit  $163.6 \mu\text{m} \pm 15.2 \mu\text{m}$  [2]. Die experimentellen Ergebnisse wurden hinsichtlich des Trocknungsverhaltens bei horizontaler Ausrichtung der Netzwerke ( $Bo = 0$ ) und konstanter Temperatur untersucht und mit Simulationsergebnissen aus Porennetzwerksimulation verglichen. Hierfür kamen verschiedene Annahmen hinsichtlich der Filmstruktur zur Anwendung. Die Flüssigkeitspermeabilität wurde für unterschiedliche Flüssigkeitssättigung während der Trocknung simuliert und in Bezug auf die Trocknungskurven analysiert.

### **3. Ergebnisse**

#### *Experimentelle Ergebnisse*

Die Vernetzung der Flüssigkeit im 2-Phasengebiet durch Flüssigkeitsfilme und -cluster trat unabhängig von der Geometrie der 2D-Porennetzwerke auf. Abbildung 1 zeigt am Beispiel des nasschemisch geätzten Netzwerkes, dass die Perkolationsfront der Bulk-Flüssigphase vordringen kann, während die Trocknungsfront an der Oberfläche des Netzwerkes haften bleibt. Die konstante normierte Trocknungsgeschwindigkeit und die Abnahme der Sättigung bei gleichbleibender Position der Trocknungsfront sind ein Indikator für die vernetzten Flüssigkeitscluster und Flüssigkeitsleitung von der Perkolationsfront an die Trocknungsfront. Die Trocknungsfront dringt hingegen weiter in das Netzwerk ein, wenn die hydraulische Leitfähigkeit an die Oberfläche nicht mehr gewährleistet werden kann. Nach dem Ablösen der Trocknungsfront nach etwa 1500 min Trocknungszeit, wandert sie annähernd linear mit der Zeit ins Innere des Netzwerkes (‘film tips position’ in Abb. 1a). Der durch die Trocknung erreichte Massenverlust des Netzwerkes ist als Funktion der Zeit in Abb. 1b dargestellt. Aus der Betrachtung der Trocknungsgeschwindigkeit können die Trocknungsabschnitte identifiziert werden, welche qualitativ mit den Ergebnissen der Lattice-Boltzmann Simulation einer Einzelkapillaren ohne Gravitationseinfluss übereinstimmen

[3]. Die Trocknungsabschnitte sind demnach durch ein anfängliches Abfallen der Trocknungsgeschwindigkeit (FRP in Abb. 1b), einen anschließenden Abschnitt konstanter Geschwindigkeit (CRP) und einen abschließenden Abschnitt, der durch das Zurückweichen der Trocknungsfrent charakterisiert ist (RFP), gekennzeichnet. Interessanterweise ist der CRP-Abschnitt bei Experimenten mit Einzelkapillare und Gravitation nicht zu beobachten, sondern es geht dort die FRP direkt in die RFP über [4].

Aus den Experimenten mit Einzelkapillaren und 2D-Porennetzwerken wurden in der Literatur Filmmodelle hergeleitet [1, 5, 6]. Für eine Übereinstimmung der simulierten und experimentell bestimmten Trocknungsgeschwindigkeiten werden dort jedoch Abweichungen in der Berechnung der Trocknungsfrentposition hingenommen. Eine Abhilfe hierfür stellt eine Kombination diskreter und kontinuierlicher Filmstrukturen dar [2].

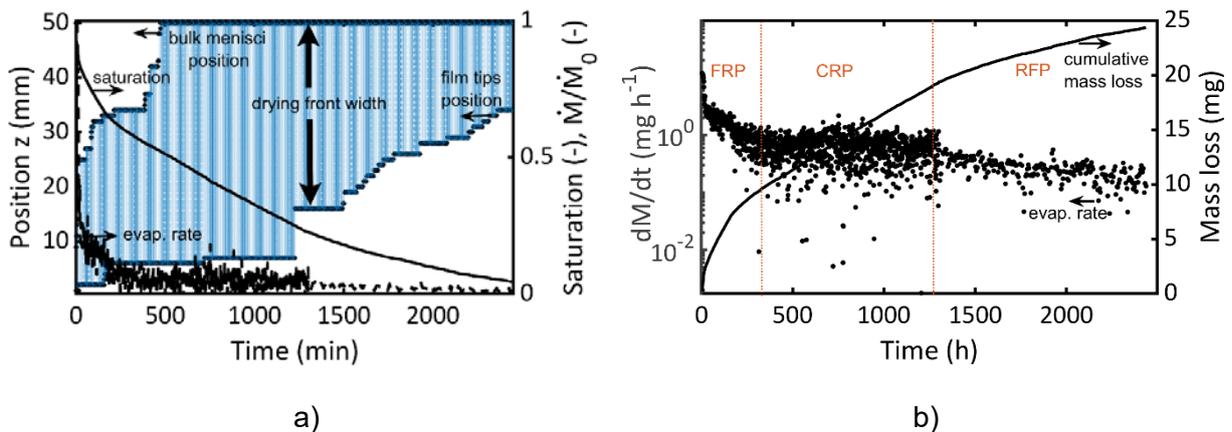


Abb. 1: a) Flüssigkeitstransport innerhalb der Trocknungsfrent bei abnehmender Sättigung des Gesamtnetzwerkes. b) Trocknungsgeschwindigkeit und Abnahme der Gesamtmasse des Netzwerkes als Funktion der Zeit.

Die relative Permeabilität des Wassers für den in Abb. 1 dargestellten Fall, lässt sich nach Darcy ableiten, wobei der Flüssigkeitsdruckunterschied  $dP_l / ds$  eine Funktion der Porenradienverteilung, mit  $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$ , darstellt. Alternativ, kann für die Berechnung der Flüssigkeitsleitfähigkeit anstelle des Flüssigkeitsdruckes auch die Sättigung  $S$  herangezogen werden, sodass  $K \cdot k_l \propto 1/dS / ds$ . Setzt man Massenerhaltung voraus, d.h.  $\dot{M}_l = \dot{M}_v$ , kann mit Kenntnis der Position der Fronten (Abb. 1a) der effektive Feuchteleitkoeffizient abgeleitet werden.

### Simulationsergebnisse

Der Einfluss der Vernetzung der Flüssigkeit durch Flüssigkeitsfilme lässt sich mit Porennetzwerksimulationen quantitativ untersuchen. Die Flüssigkeitsfilme tragen demnach nicht nur zu einer Verzögerung des Eindringens der Trocknungsfrent bei, sondern auch zu einer Entleerung der verbundenen Flüssigkeitscluster an der Perkolationsfrent. Dies ist in Abb. 2 anhand der relativen Flüssigkeitspermeabilität  $k_l$  eines trocknenden 2D-Netzwerkes mit implementierten Flüssigkeitsfilmringen dargestellt [2].

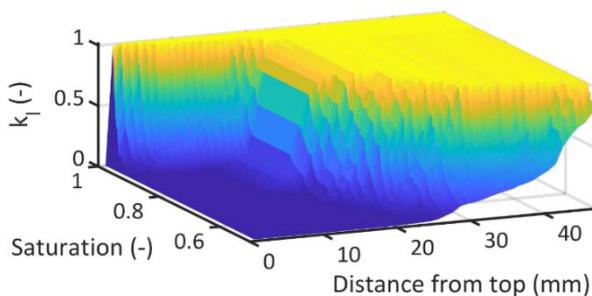


Abb. 2: Relative Permeabilität der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Gesamtnetzwerksättigung und des Ortes. Die Flüssigkeitsleitung bis an die Oberfläche wird bis zu einer Sättigung von rund 90 % aufrechterhalten.

In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, dass die Flüssigkeitsleitfähigkeit auch in Bezug auf nicht-isotherme Netzwerke, wo ein Teil der an die Trocknungsfront transportierten und dort verdampften Flüssigkeit in einem Heat-Pipe Kreislauf an die Perkolationsfront zurückgeführt und kondensiert wird, eine wichtige Rolle spielt. Dies ist vor allem für solche Fälle von Relevanz, in denen mit der Flüssigkeit dispergierte Partikel oder gelöste Stoffe transportiert werden. Wie die in Abb. 3 dargestellte 2D-Simulation zeigt, muss die Flüssigkeitstransportrate innerhalb des 2-Phasengebietes größer sein als die von außen beobachtbare Trocknungsgeschwindigkeit, da ein Teil des Dampfes entgegengesetzt zur Haupttransportrichtung diffundiert.

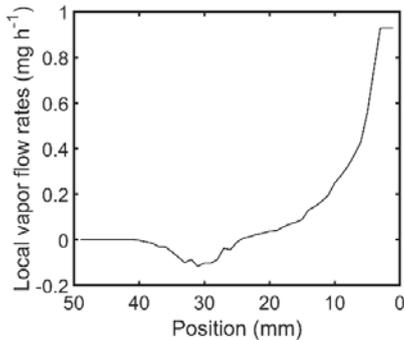


Abb. 3: Darstellung der örtlichen Dampfdiffusionsströme. Der lokale Wasserdampfdiffusionsstrom an die Perkolationsfront, mit negativem Vorzeichen, beträgt in diesem Beispiel maximal rund 13 % der Gesamttrocknungsrate.

#### 4. Diskussion und Fazit

Flüssigkeitsfilme tragen vor allem deswegen zu einer Verkürzung der Trocknungszeit bei, weil sie die Flüssigkeitsleitfähigkeit an die Trocknungsfront über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten können. Die Gesamtsättigung kann daher bei konstanter Trocknungsfrontposition und Trocknungsgeschwindigkeit um einen erheblichen Anteil reduziert werden. Geistlinger et al. [1] haben gezeigt, dass die Breite des entstehenden und sich ausdehnenden 2-Phasengebietes in einem Temperaturbereich zwischen 28°C und 42°C konstant ist. Die Tortuosität der Flüssigkeitsfilme im 2D-Netzwerk führt jedoch zu Abweichungen im Vergleich zu den Vorhersagen der Einzelkapillaren [1]. Der Vergleich der gefundenen Ergebnisse mit Literaturdaten zeigt, dass sowohl Gravitation als auch die Berücksichtigung der Netzwerkgeometrie (2D, 3D) für zukünftige Betrachtungen erforderlich ist [3,4]. Die Parametrierung des Porennetzwerkmodelles kann dabei unter Zuhilfenahme von Lattice-Boltzmann-Simulation erfolgen [3].

#### 5. Literatur

- [1] Geistlinger, H.; Ding, Y.; Apelt, B.; Schlueter, S.; Küchler, M.; Reuter, D.; Vorhauer, N.; Vogel, H.-J. (2019) Evaporation study based on micromodel-experiments: Comparison of theory and experiment, *Water Resources Research*, 55 (8), 653-6672
- [2] Vorhauer, N.; Wang, Y.J.; Kharaghani, A.; Tsotsas, E.; Prat, M. (2015) Drying with formation of capillary rings in a model porous medium. *Transport in Porous Media*, 110, 197–223
- [3] Bhaskaran, S.; Panda, D.; Vorhauer-Huget, N.; Hosseini, S.A.; Tsotsas, E.; Surasani, V.K. (2020) Study on film effects during isothermal drying of square capillary tube using Lattice Boltzmann model, submitted to *Drying Technology*
- [4] Chauvet, F.; Duru, P.; Geoffroy, S.; Prat, M. (2009) Three periods of drying of a single square capillary tube, *Physical Review Letters*, 103, 124502
- [5] Prat, M. (2007) On the influence of pore shape, contact angle and film flows on drying of capillary porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 1455–1468
- [6] Yiotis, A.G.; Boudouvis, A.G.; Stubos, A.K.; Tsimpanogiannis, I.N.; Yortsos, Y.C. (2004) Effect of liquid films on the drying of porous media, *AIChE Journal*, 50 (11), 2721–2737.