

MODERNE PROZESS- UND PRODUKTGESTALTUNG AM BEISPIEL DER TROCKNUNG

Evangelos Tsotsas

Von Lebensmitteln bis hin zu Kunststoffgranulaten, von Mineralien bis hin zu Baustoffen, von Katalysatoren bis hin zu Pillen sind die meisten und wertvollsten materiellen Güter der heutigen Gesellschaft Feststoffe, die während ihrer Herstellung oder Handhabung in aller Regel getrocknet werden müssen. Dabei muß der Prozeß auf Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit, das Produkt auf Qualität und Mehrwert gestaltet werden. Welche immateriellen Güter – also welche wissenschaftlichen und technischen Herangehensweisen – hierzu beitragen können bzw. notwendig sind, versucht der Artikel anzudeuten.

WARUM TROCKNUNG?

Nach gängiger Definition ist Trocknung das Entfernen von Feuchte – insbesondere von freier oder physikalisch gebundener Feuchte – aus einem Feststoff durch ihre Verwandlung in Dampf [1]. Sie ist als Trennprozeß deswegen besonders wichtig, weil die meisten Produkte nicht in Form von Gasen und auch nicht in Form von Flüssigkeiten, sondern in Form von Feststoffen – d. h. als Partikeln, Körner, Pulver, Granulate, Formkörper usw. – angeboten und auch nur in dieser Form genutzt werden können. In Feststoffen liegt der größte Anteil des Mehrwerts, den heutige Gesellschaften primär und sekundär erzeugen. Und, die nur trocken nutzbaren Feststoffe sind von Natur aus naß bzw. können nur in nassem Zustand hergestellt werden. So müssen Ziegelsteine getrocknet werden, bevor damit ein Haus gebaut werden kann, Kunststoffgranulate dürfen kaum Wasser enthalten, damit sie zu Spielzeugen, Verpackungsfolien oder Automobilteilen weiterverarbeitet werden können. Nur trockene Kohle kann effizient verfeuert werden. Nur getrocknetes Getreide kann gelagert werden ohne zu verfaulen, und auch pharmazeutische Wirkstoffe müssen getrocknet werden, um als Tabletten, Pillen oder Pulver formuliert werden zu können – um nur einige Beispiele zu nennen. Folgerichtig ist die Trocknung auch einer der ältesten implementierten verfahrenstechnischen Prozesse in der Geschichte der Zivilisation. Daß sich entsprechende Forschung immer noch und gerade heute besonders lohnt, hat nicht nur praktische, sondern auch wissenschaftliche Gründe, die im folgenden umrissen werden sollen.

WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN

Die mit der Trocknungstechnik verbundenen Aufgaben und Herausforderungen lassen sich – wohl wissend, daß derartige Einteilungen nie ganz frei von Ambivalenz sein können – den folgenden sechs Bereichen zuordnen.

Trocknerauslegung, -optimierung und -regelung

Wie bei jedem Apparat, so muß auch für einen Trockner die Auslegung insbesondere die Frage beantworten, wie groß der Apparat sein muß, um seine Aufgabe erfüllen zu können. Dies durch Ausprobieren – empirisch – herausfinden zu wollen, ist langwierig und teuer, und somit aus heutiger Sicht weder effektiv noch wünschenswert. Vielmehr und möglichst weitgehend möchte man Modelle verwenden, die den Prozeß mathematisch abbilden. Bei der am häufigsten vorkommenden Konvektionstrocknung, in der heiße Luft eingesetzt wird, müssen die Strömung des Gases, die Bewegung der Feststoffe, der Wärme- und Stoffübergang zwischen den Phasen, und auch die Transportvorgänge in dem trocknenden Feststoff adäquat beschrieben werden. Mehrere Modelle unterschiedlicher Detailtreue und Genauigkeit sind für ein und dieselbe Auslegung denkbar, je nach technischem Ziel und den zur Verfügung stehenden Mitteln. Meistens sind Auslegungsmodelle auch zur Trockneroptimierung, also zum Finden günstiger Betriebspunkte, geeignet. Manchmal vermögen Modelle sogar den Weg zu einem solchen Betriebspunkt dynamisch zu beschreiben und können somit zur Entwicklung von Methoden zur automatischen Regelung oder Steuerung eingesetzt werden. Den konkreten Regler muß man freilich durch Vereinfachung – Reduktion – des hierfür meistens zu komplexen, detaillierten Modells ableiten.

Wahrung der Produktqualität

Während Feststoffe in der Regel getrocknet werden müssen, dürfen sie dabei nicht beschädigt oder in ihren Eigenschaften beeinträchtigt werden – Keramiken dürfen während des Trocknens keine Risse bekommen, Lebensmittel dürfen nicht durch Abbau ihrer wertvollen Bestandteile denaturieren. Oft setzt man hierfür spezielle Techniken ein, so daß man z. B. Pharmaka häufig auf einer heißen Platte, ohne Luft und bei sehr niedrigen Temperaturen – aus dem gefrorenen Zustand heraus –

trocknet. Von der Trocknungsmethode jedoch unabhängig, sind Modelle wünschenswert, die nicht nur die Trocknerauslegung meistern, sondern auch den wichtigen Aspekt der Wahrung der Produktqualität erfassen. Geschichten – Trajektorien – der thermischen Belastung müssen zu diesem Zweck berechnet werden, oft sogar unter Berücksichtigung der Tatsache, daß nicht alle Partikeln identisch sind und den gleichen Weg durchlaufen, sondern sie eher ein sogenanntes eigenschaftsverteiltes System darstellen. Dies vergrößert zwar den Aufwand, jedoch auch den Wert der Modellierung.

Produktcharakterisierung, Beschreibung intrapartikulärer Transportvorgänge

Eigenschaften der Feststoffe, die entweder für den Abnehmer oder aber für die Herstellung selbst wichtig sind – also die Produkt- oder die Prozeßqualität betreffen – müssen identifiziert, gemessen und am besten auch verstanden werden. Nur mit den Mitteln der klassischen, sich auf Gase und Flüssigkeiten beziehenden und auf Gleichgewichtsthermodynamik und Strömungslehre beruhenden Verfahrenstechnik ist dies nicht möglich. Es ist deswegen nicht möglich, weil nicht nur die chemische Zusammensetzung, sondern insbesondere auch die Größe und Struktur poröser und disperser Feststoffe ihr Verhalten bestimmen. Der auch strukturell bedingte Stofftransport in einer Tablette bestimmt die für ihre therapeutische Wirkung wichtige Freisetzungseigenschaft des Wirkstoffes. Größe und Struktur der Partikeln von löslichem Kaffee bestimmen sein Instantverhalten, also seine Fähigkeit, sich in heißem Wasser schnell aufzulösen, wie es seine Anwendung erfordert. Sie bestimmen außerdem über den intrapartikulären Wärme- und Stofftransport den Aufwand, der erforderlich ist, um sie mit Hilfe der hierfür üblichen Methode der Sprühtrocknung herzustellen. Ganz generell hängt die produktspezifische Trocknungskinetik von den Transportvorgängen im Inneren des Gutes entscheidend ab.

Produktgestaltung

Wie bereits erwähnt, muß die Trocknung so durchgeführt werden, daß sie die Produktqualität nicht beeinträchtigt. Während dies eine Mindestanforderung darstellt, können Trocknungsprozesse oder die Trocknung als wesentlichen Bestandteil enthaltende Prozesse auch dazu genutzt werden, um Produktqualität gezielt zu erzeugen, um Produkte aktiv zu gestalten. Das Aufsprühen von Lösungen auf Partikeln bei gleichzeitigem, kontrolliertem Austrocknen des Lösungsmittels, um Schutz- oder Funktionsschichten zu schaffen – das sogenannte Coating – ist ein Beispiel hierfür – eines unter Vielen.

Ganzheitliche Verfahrensgestaltung

Während die Trocknung eine wichtige Position in der Feststoffverfahrenstechnik einnimmt, ist sie doch immer nur ein Schritt in einer Sequenz von Schritten – von Prozessen, die ein Produktionsverfahren ausmachen. Polymerisation, Fällung, Kristallisation, Waschen, Filtra-

tion, Zerkleinerung, Sichtung, pneumatische Förderung, Lagerung und viele andere mehr können solche Prozesse sein. Dabei gilt es immer, das Verfahren insgesamt – ganzheitlich – zu optimieren, da es stets mehr ist, als die Summe seiner Bestandteile. Manchmal wird es vorteilhaft sein, die einzelnen Prozesse möglichst separat und konsekutiv durchzuführen, manchmal bringen Prozeßkombinationen (z. B. Mahltrocknung) deutliche Vorteile. Immer sind mehrere Wege möglich, die es mathematisch und symbolisch darzustellen sowie rechnergestützt zu evaluieren gilt, und immer wird der Prozeß der Trocknung nur dann optimal untergebracht sein, wenn das Verfahren insgesamt besser als mögliche Varianten ist.

Energetische Optimierung

Indessen ist die Trocknung auch deswegen teuer, weil zur Verwandlung von Feuchte in Dampf viel Energie eingesetzt werden muß. Ist man nicht bereit, die lange Zeit abzuwarten, die an sonnigen Tagen auf der Wiese ausgelegte Güter zum Trocknen brauchen – und das war man schon in der klassischen Antike vielfach nicht –, so muß man den ökonomischen und ökologischen Preis für den Energieeinsatz bezahlen. Obschon derartige nicht ganz genau bestimmt werden kann, zeigen zuverlässige Erhebungen, daß sieben Prozent bis zehn Prozent des industriellen Energieverbrauchs westlicher Nationen auf das Konto der Trocknung gehen [2]. Somit gebieten Nachhaltigkeit (Ressourcenschonung, Vermeidung von Treibhausgasen) und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen die energetische Optimierung von Trocknungsprozessen – einzeln wie auch im Verbund.

EIN PANOPTIKUM

Die vorangegangenen Ausführungen legen die große Affinität der Trocknungstechnik in ihren Zielen und Methoden mit vielen anderen ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fachgebieten bereits nahe. Hier seien davon beispielhaft die Reaktionstechnik und die Materialwissenschaft genannt. In der Tat ist die Herangehensweise bei der Auslegung eines Trockners oder eines chemischen Reaktors dieselbe – bis hin zu dem Wunsch nach einer klaren Unterscheidung zwischen integrelem und differentiellen Verhalten, wobei sich ersteres auf den ganzen Apparat und letzteres auf die einzelne Partikel des zu trocknenden Produktes bzw. das einzelne Korn des die Reaktion beschleunigenden Katalysators bezieht. Und der Wunsch der Trocknungstechnik, aus der Struktur von Stoffen ihre Prozeß- und Produkteigenschaften abzuleiten, ähnelt dem Bestreben der Materialwissenschaft sehr, die Eigenschaften von Werkstoffen mit ihrem Gefüge zu korrelieren.

Nicht nur ist die Trocknungstechnik ein Panoptikum industrienaher Fragestellungen und moderner wissenschaftlicher Werkzeuge, sondern sie befindet sich auch im Schnittpunkt zwischen Prozeßgestaltung und Produktgestaltung, die die zukünftige Entwicklung der Verfahrenstechnik und des Chemieingenieurwesens gemeinsam zu definieren schei-

nen; am Schnittpunkt also der beiden großen Arbeitsrichtungen, für die sich international die Begriffe „Process Systems Engineering“ und „Product Engineering“ immer mehr durchsetzen – eine chancenreiche, aber auch anspruchsvolle Position. Bedenkt man die Anzahl der Produkte, die biologischen Ursprungs sind, und jener, die biologisch genutzt werden sollen, so sieht man deutlich, daß die Trocknungstechnik auch zum wichtigen und aktuellen Gebiet der Biotechnologie und der sogenannten Life Sciences viel beitragen kann und muß.

Absolventen materiell wie immateriell – mit besten beruflichen Perspektiven und der Möglichkeit, Wohlstand und Nachhaltigkeit kreativ miteinander zu verbinden.

FORSCHUNGSBEISPIELE AUS MAGDEBURG

Die sich im Prinzip auf das gesamte Spektrum der Trocknungstechnik beziehende Forschung in Magdeburg kann hier nur exemplarisch dargestellt werden. Diesem Zweck dienen sieben ausgewählte Aspekte, auf die im folgenden etwas näher eingegangen werden soll.

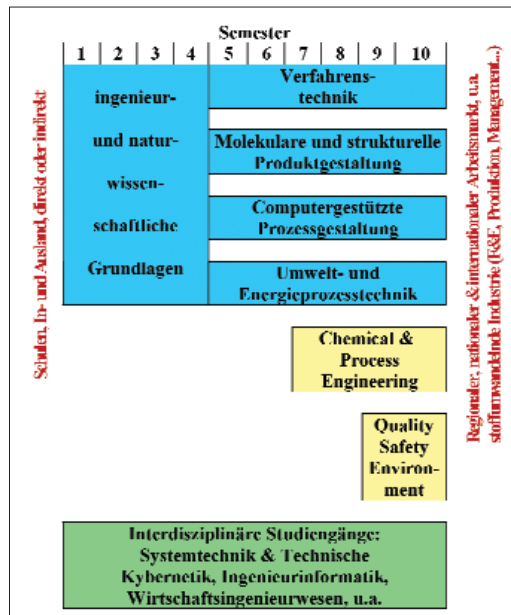


Abbildung 1 Lehrangebot der Magdeburger Fakultät für Verfahrenstechnik und Systemtechnik an eigenständigen (blau) bzw. interdisziplinären (grün) Diplomstudiengängen sowie an Masterstudiengängen (gelb). Immer mehr junge Frauen studieren verfahrenstechnisch orientierte Disziplinen, so daß sie in manchen Klassen bereits in der Mehrheit sind.

Bei derartiger Vielfalt, Verknüpfung und Aktualität ist das Fach ein gutes Beispiel auch für die Lehre an der Magdeburger Fakultät für Verfahrenstechnik und Systemtechnik, die insgesamt auf Vielfalt, Verknüpfung und Aktualität beruht (Abb. 1). So werden einerseits Spezialisierungen, z. B. aus den genannten Bereichen der Prozeß- und Produktgestaltung angeboten, die der Tatsache Rechnung tragen, daß die zukünftige Entwicklung der stoffumwandelnden Industrie westlicher Nationen nur wissenschaftsbasiert, intelligent und hochgradig wertschöpfend sein kann. Auch über den Tellerrand hinaus – interdisziplinär und gemeinsam mit anderen Fakultäten – werden solche Spezialisierungen angeboten. Andererseits sind internationale, englischsprachige Master-Studiengänge wichtig. Sie werden in Zukunft noch wichtiger werden, da es gilt, den enormen Bedarf der global schnell wachsenden verfahrenstechnischen Industrie nach gut ausgebildeten Ingenieurinnen und Ingenieuren zu stillen. Leicht sind diese Studiengänge freilich nicht, doch sie lohnen sich für die Absolventinnen und

Wirbelnde Schichten

Ein Beispiel für das dynamische Verhalten eines Wirbelschichttrockners wird in Abbildung 2 gezeigt. Sogenannte Wirbelschichten entstehen, wenn man auf einem Sieb liegende Partikeln von unten derart mit Gas durchströmt, daß sie zwar aufgewirbelt, jedoch nicht abgetragen werden. Typische Wirbelschichten sind auf etwa das zwei- bis dreifache der ursprünglichen Schichthöhe aufgelockert. In mancher Hinsicht benehmen sich solche Schichten wie Flüssigkeiten, deswegen nennt man den Vorgang auch Fluidisation. Wirbelschichten ermöglichen mit relativ einfachen Mitteln einen sehr intensiven Kontakt zwischen Gas und dem Feststoff, deswegen sind entsprechende Apparate in der Industrie sehr beliebt und weit verbreitet (Abb. 3), um z. B. die Feststoffe mit Hilfe heißer Luft zu trocknen.

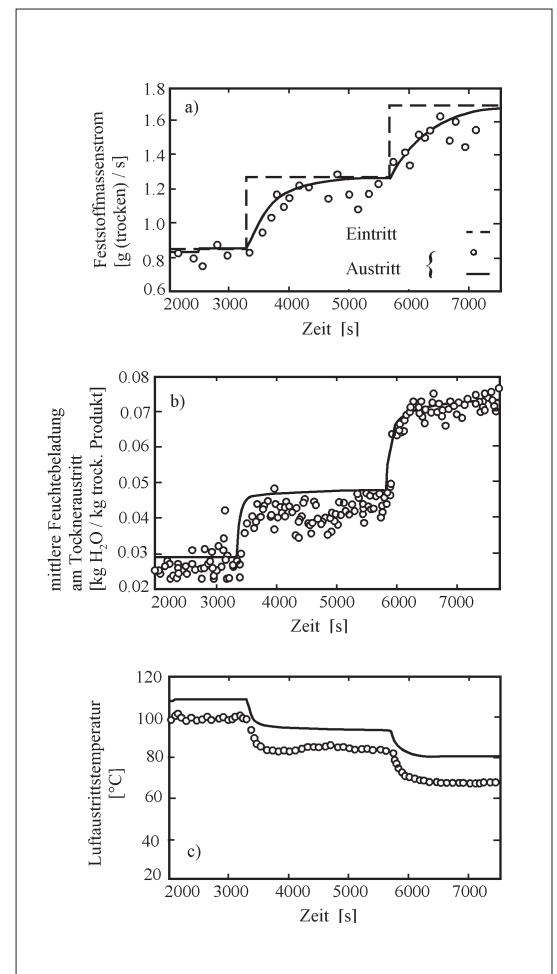


Abbildung 2 Systemantwort eines im Labormaßstab gebauten Wirbelschichttrockners (Durchmesser: 150 mm) auf die stufenweise Erhöhung des Massenstroms der eintretenden Feststoffe nach /3/; (Partikeln: γ -Al₂O₃, 1,8 mm im Durchmesser, Eintrittsfeuchtebelastung der Feststoffe: 0,62 kg H₂O/kg trocken, Massenstrom (trocken) der Luft: 35 g/s, Lufteintrittstemperatur: 150 °C, Lufteintrittsfeuchtebelastung: 0,003 kg H₂O/kg trocken). Die Kreise stellen Meßpunkte dar, die durchgezogenen Linien Berechnungen.



Abbildung 3 Beispiel eines industriellen Wirbelschichtapparats der Firma AMMAG GmbH, Gunskirchen/Österreich, beim Transport in die Produktionshalle. Der hier gezeigte, mehr als 10 m hohe Apparat ist nicht nur zur Trocknung, sondern insbesondere zur Sprühgranulation geeignet. Dabei werden mit Hilfe einer eingesprühten Lösung relativ kleine Teilchen in wesentlich größere Partikeln mit der erwünschten Konsistenz umgewandelt. Wirbelschichtapparate werden von vielen Herstellern angeboten und können von der hier gezeigten Form erheblich abweichen, z. B. flach und länglich sein.

Was nun in Abbildung 2 gezeigt wird, bezieht sich auf eine Wirbelschicht, die zwar sehr viel kleiner als Produktionsapparate ist (man spricht vom Labor- oder Miniplant-Maßstab), jedoch alle Funktionen der großen Apparate genau abbilden läßt, einschließlich der kontinuierlichen Betriebsweise. Letzteres bedeutet, daß zu trocknende Feststoffe ständig dem Apparat zugefügt, und auch fortwährend vom Apparat nach erfolgter Trocknung abgezogen werden. In diesem Modus kann eine Anlage monatelang ununterbrochen, Tag und Nacht, arbeiten – „Strich fahren“, wie der Praktiker sagt.

Doch sind auch Störungen eines derartig stationären Betriebs möglich, die im Teil a von Abbildung 2 dadurch untersucht werden, daß der Massenstrom eintretender Feststoffe sprunghaft variiert wurde, dem gestrichelt dargestellten Treppenzug entsprechend. Bis sich der Massenstrom der Feststoffe am Austritt dem geänderten Feed-

massenstrom angepaßt hat, dauert es eine Weile, mit einem für das System charakteristischen Übergang, wie die Meßpunkte und die durchgezogenen Linien auf Abbildung 2a zeigen. Dabei verändert sich auch die Menge der Feststoffe, die sich im Apparat befinden, der Fläche zwischen der gestrichelten und der durchgezogenen Linie in Abbildung 2a entsprechend. Wichtig ist insbesondere auch die dynamische

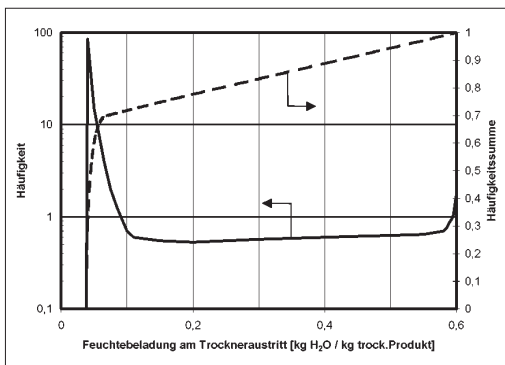


Abbildung 4 Berechnete Häufigkeits- (durchgezogen) und Häufigkeitssummenverteilung (gestrichelt) der Feuchtebelastung von Feststoffen am Austritt eines Wirbelschichttrockners. Die Feststoffe treten in den Apparat mit einer Feuchtebelastung von 0,60 kg Wasser je kg trockener Substanz ein, die mittlere Feuchtebelastung am Austritt beträgt 0,132 kg/kg.

Veränderung der mittleren Feuchtebelastung des Produktes am Trockneraustritt, die im Teil b von Abbildung 2 dargestellt wird. In der Praxis ist diese Feuchtebelastung ein wesentliches Merkmal der Produktqualität, das – je nach Anwendung – auf einen bestimmten Wert spezifiziert wird, der nicht überschritten werden darf. Je mehr Feststoffe getrocknet werden müssen, (also je größer der Massenstrom der Feststoffe am Trockneraustritt ist), desto feuchter sind sie am Austritt, wie Abbildung 2b deutlich zeigt. In stark belasteten Apparaten wird jedoch auch die Luft besser genutzt, sie gibt einen größeren Teil ihrer Energie an die Partikeln ab und verläßt somit den Trockner mit einer niedrigeren Temperatur (Abb. 2c).

Der Vergleich zwischen Messung (Kreise) und Berechnung (durchgezogene Linien) in Abbildung 2 zeigt, daß es ohne Anpassungsparameter gelingt, den Betrieb von Apparaten vorauszusagen – nicht immer perfekt, wie die kleine Abweichung zwischen Messung und Rechnung im Teil c der Abbildung andeutet – doch insgesamt mit guter Genauigkeit. Damit dies gelingt, sind jedoch recht komplexe Modelle notwendig, aus mathematischer Sicht in der Regel Systeme miteinander gekoppelter Differentialgleichungen, auf die hier mit Verweis auf /3/ nicht näher eingegangen werden kann. Eine zuverlässige Auslegung und Optimierung der Apparate und Prozesse, einschließlich

der energetischen Optimierung und der Entwicklung von Reglern, ist der Lohn für die Mühe. Freilich muß man bei der Modellvalidierung erheblichen Aufwand betreiben, zu dem Abbildung 2 nur einen kleinen Einblick gibt. Nur sorgfältig mit Hilfe von Messungen überprüfte Modelle sind etwas wert. Und lediglich solch komplexe Modelle, die nicht nur insgesamt und pauschal, sondern auch bezüglich ihrer Bestandteile und systematisch überprüft wurden, bringen die Wissenschaft und die Technik voran.

Indessen sind auch die zur Validierung benötigten Meßwerte nicht immer leicht in der erwünschten Qualität erhältlich. So wurden die gemessenen mittleren Produktfeuchtebelastungen von Abbildung 2b mit Hilfe der Absorption von Mikrowellen in einem speziellen Gerät gewonnen. Zum ersten Mal ist es dabei gelungen, diese Meßtechnik on-line – also direkt an dem Rohr, das das Produkt abführt – zu implementieren. Gleichzeitig wurde am Gasaustritt die Luftfeuchte aus der Schwächung von Infrarotstrahlen durch Wechselwirkung mit den Wasserdampfmolekülen bestimmt, um die Güte der Meßdaten über Massenbilanzen einer weiteren Überprüfung zu unterziehen /3/.

Der manchmal nicht so kleine Unterschied

Während Abbildung 2b Mittelwerte für die Produktfeuchte am Austritt des Trockners zeigt, ist diese Eigenschaft in Wirklichkeit verteilt. Solche Verteilungen werden vom geschilderten Modell berechnet, eigentlich schon bevor daraus Mittelwerte gebildet werden können. Dies wird in Abbildung 4 mit einer Häufigkeits- und einer Häufigkeitssummenverteilung exemplarisch dargestellt. Erstere gibt die Häufigkeit an, mit der Partikeln eine gewisse Restfeuchte erreichen, letztere zählt alle Partikeln, die trockener sind, als es dieser Restfeuchte entspricht. So erkennt man zwar am Maximum der durchgezogenen Kurve von Abbildung 4, daß sehr viele Partikeln recht trocken werden, dieser Mehrheit steht aber eine nicht zu vernachlässigende Minderheit noch nasser oder sehr nasser Teilchen gegenüber. Nach hinreichend langem Zählen würde man sogar Partikeln finden, die den Apparat so verlassen, wie sie ihn betreten haben, ohne überhaupt getrocknet worden zu sein. Sehr asymmetrisch und sehr langgezogen ist die Häufigkeitsverteilung von Abbildung 4 und zeigt uns damit, daß vermeintlich kleine Unterschiede nicht immer so klein sind.

Berechnungen wie die von Abbildung 4 sind freilich nur deswegen möglich, weil das Modell die Partikeln je nach der Verweilzeit, die sie im Trockner verbringen, in Gruppen einteilt, und diese Gruppen dann gesondert behandelt. Ähnlich geht man bei der Einteilung einer Population in Altersgruppen vor, wodurch sich die im Zusammenhang mit dieser Methode gebräuchlichen Begriffe von Populationsbilanzen und Populationsdynamik erklären. Daß dies nicht nur wissenschaftlichen Wert besitzt, hat Abbildung 4 eigentlich deutlich gezeigt. Wenige sehr nasse

Partikeln können das sonst und im Mittel recht anständig getrocknete Produkt verderben, ungünstige Verteilungen – wie die von Abbildung 4 – müssen voraussagbar sein, damit sie auch vermieden werden können.

Noch komplexer wird die Situation bei Betrachtung von mehreren statt nur einer Eigenschaft (in unserem Beispiel: Restfeuchte), und bei mehreren statt nur einer Ursache (in unserem Fall: unterschiedliche Verweilzeiten) für entsprechende Verteilungen. Doch generell gilt, daß Feststoffe eigenschaftsverteilte Systeme sind, und daß die Populationsdynamik einen wichtigen Zugang zur Untersuchung solcher Systeme eröffnet, eigentlich ein Schlüssel zum besseren Verständnis der Produktqualität sein kann. Dieser Schlüssel ist im geschilderten Modell nach Burgschweiger et al. /3/ bereits enthalten, das im Prinzip das Potential besitzt, Populationen im Hinblick auf thermische Belastungen, die für ihre Qualität relevant sein können, vollständig zu charakterisieren.

Denkt man den Populationsgedanken zu Ende, so kommt man sogar dazu, keine Gruppen zu bilden, sondern jede Partikel eines Kollektivs individuell betrachten zu wollen. Diese als „discrete particle modelling“ bekannte, neuartige Methode könnte helfen, gesicherte und auf traditionelle Weise modellierte Erkenntnisse über die Trocknung von durchmischten Schüttungen auf einer Heizplatte – also über die sogenannte Kontakt-trocknung, s. u. a. /4/ – nachzuvollziehen und zu erweitern.

Schwabende Teilchen

Der aufmerksame Leser, der sich an dieser Stelle vielleicht fragt, wie stoffspezifische Eigenschaften der Partikeln, deren Trocknung in den vorangegangenen Abschnitten diskutiert wurde, in die Modellberechnungen eingehen, stellt eine überaus berechtigte Frage. Jedes Produkt trocknet nämlich anders, leicht oder schwer, schnell oder langsam. Diese produktspezifische Trocknungskinetik muß bekannt sein, um Berechnungen überhaupt durchführen zu können – und zwar für die kleinste Einheit bekannt, die das Produkt ausmacht, für die Einzelpartikel.

Es sind also Meßtechniken zur Untersuchung der Trocknung von Einzelpartikeln notwendig, und Abbildung 5 stellt das Prinzip einer solcher Meßtechnik nach Groenewold et al. /5/ dar. Dabei wird ein Gerät verwendet, das als „akustischer Levitator“ oder „Stehwellenpositionierer“ bekannt ist. Unter dieser Bezeichnung verbirgt sich ein unscheinbarer und recht kleiner (Innendurchmesser: 15,5 mm) Glaszylinder. Am unteren Ende dieses Rohrs befindet sich ein Sendewandler, ein Kristall, der unter Wechselstrom hochfrequent – mit 45 kHz, also 45 000 Mal in der Sekunde – vibriert. Die dadurch entstehende Druckwelle wird am anderen Ende des Röhrchens reflektiert, so daß die Luft im Röhrchen insgesamt in Vibration versetzt wird, wie die Saite einer Gitarre. In der Nähe eines Knoten-

punkts dieser sogenannten stehenden Welle kann ein Teilchen – ein Tropfen oder eine Partikel – berührungslos in der Schwebelage gehalten werden, es wird levitiert. Nun kann man das wie von Geisterhand in der Schwebelage gehaltene Teilchen mit Hilfe eines kleinen, zusätzlichen Stroms von konditionierter Luft trocknen und die Geschwindigkeit der Trocknung aus der Menge des Wasserdampfs erschließen, der das Röhrchen verläßt. Da sich die Trocknungsgeschwindigkeit mit der Zeit verändert, muß die Abluftfeuchte fortwährend gemessen werden, eine Aufgabe die nach Abbildung 5 ein sogenanntes Taupunktspiegel-Hygrometer übernimmt. Dieses Gerät bestimmt die Luftfeuchte aus der Temperatur, bei der ein Spiegel in Kontakt mit der feuchten Luft beschlägt – und zwar so genau und so schnell, daß der Fachmann von einer quasi-kontinuierlichen on-line-Messung spricht.

Schwabende Teilchen bieten also – neben einer Palette von anderen Methoden, die hier nicht besprochen werden sollen – Zugang zur produktspezifischen Trocknungskinetik. Exemplarisch hierfür wird in Abbildung 6 gezeigt, wie eine Einzelpartikel aus $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ in Luft trocknet. Das Aluminiumoxid des Gamma-Typs ist ein feinstporöser Stoff mit extrem großer innerer Oberfläche, der u. a. als Katalysatorträger, Membran oder Adsorbens verwendet wird. Letztere Eigenschaft der Adsorption ist auch in Abbildung 6 erkennbar. Dort stellt die gestrichelte Gerade die Geschwindigkeit dar, mit der ein Tropfen gleicher Größe wie die Partikel in derselben Atmosphäre verdunsten würde. Der Abstand zwischen dieser Geraden und der durchgezogenen Kurve – in Abbildung 6 rot punktiert – wird durch die mit einer Dampfdruckerniedrigung einher gehenden Bindung der Wassermoleküle an der Oberfläche des Feststoffes verursacht – also eben durch die Adsorption. Sowohl die gestrichelte wie auch die durchgezogene Linie können vorausberechnet werden /6/. Empirisch erfaßt wird hingegen in der Regel der grün punktierte Bereich, der die Hemmung der Trocknung durch Stoff- und Wärmetransportwiderstände im Partikelinneren beschreibt /7/. Sogenannte Normierungsmethoden gestatten es, die Ausprägung dieses Bereiches verallgemeinert darzustellen. Mit dieser Vorgabe kann der Weg vom Kleinen (von der Einzelpartikel) zum Großen (zum Trockner) besritten werden, was zu Ergebnissen wie z. B. jenen von Abbildung 2 führt.

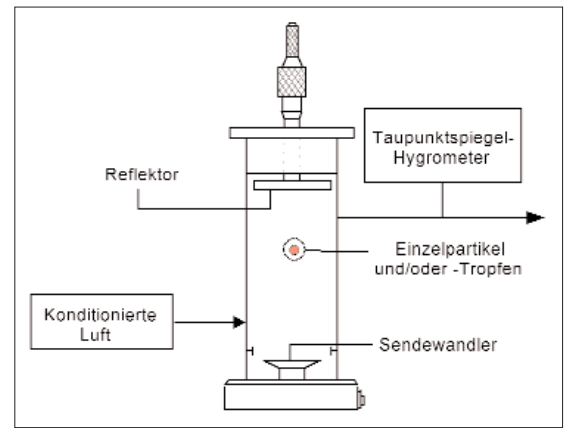


Abbildung 5
Untersuchung des Trocknungsverhaltens einer schwebenden Einzelpartikel im akustischen Levitator (Prinzipische Skizze). Die Applikation der Partikel ist einfacher, wenn man zuerst einen Tropfen levitiert und die Partikel dann in diesen Tropfen plaziert.

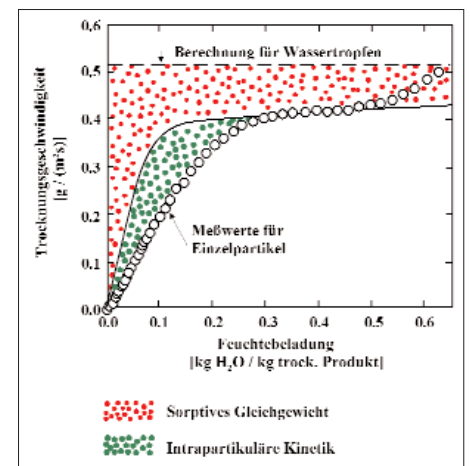
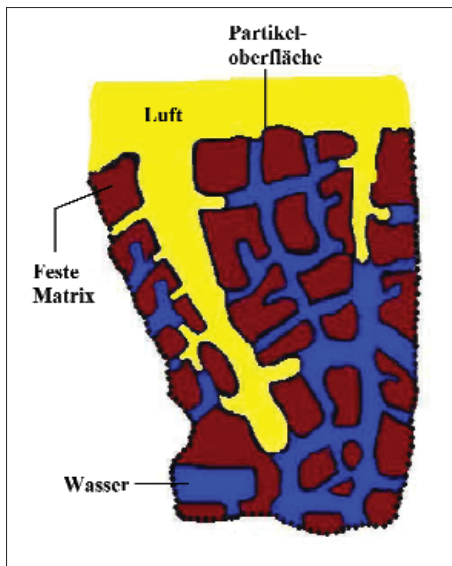


Abbildung 6
Trocknung einer Einzelpartikel aus $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Kreise: Messungen im Trocknungskanal, nahezu trockene Luft, 0,05 m/s, 40 °C). Daß die Partikel langsamer als ein Wassertropfen trocknet, ist z. T. auf Adsorption, z. T. auf Transportwiderstände im Partikelinneren zurückzuführen /6/.



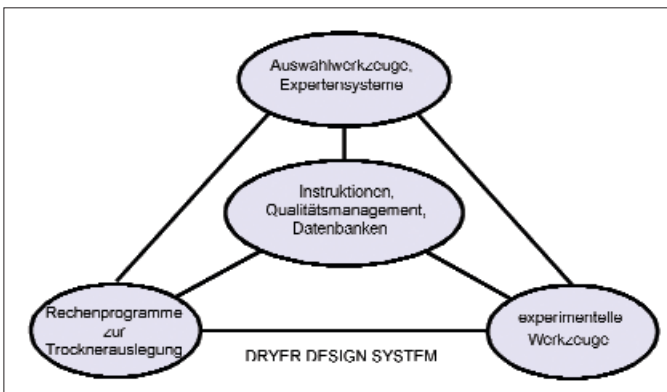
Aus dem Kleinen zum Großen

Es ist indessen nicht ganz einseitig, warum der Anspruch, vorausberechnen zu wollen, an der Partikeloberfläche enden, warum das kleinste Kleine die Einzelpartikel sein soll. Ebenso gut könnte man die Partikel als groß definieren und versuchen, ihr Verhalten aus ihrer inneren Mikrostruktur – die dann das Kleine wäre – und den dort geltenden Gesetzmäßigkeiten zu erschließen. Genau dies wird im Rahmen des an der Otto-von-Guericke-Universität von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) neu errichteten Graduiertenkollegs „Mikro-Makro-Wechselwirkungen in strukturierten Medien und Partikelsystemen“ in den nächsten Jahren

intensiv untersucht werden – im Verbund mit einer Reihe anderer, ähnlich gelagerter Probleme.

Daß die Aufgabe nicht leicht ist, verdeutlicht Abbildung 7, die das Innere eines teilgesättigten porösen Mediums schematisch darstellt. Dort sind drei verschiedene Phasen zugegen – das Feststoffgerüst, die Flüssigkeit und das leere Poren auffüllende Gasmisch aus Luft und Wasserdampf. Rechnet man die im Bild nicht dargestellten, am Feststoff adsorbierten dünnen Wasserschichten hinzu, sind es sogar vier Phasen. Kapillarität spielt in der komplexen, aus kleinen und größeren Poren bestehenden Topologie eine Rolle, Wärmetransport in die Partikel und Stofftransport aus der Partikel sind miteinander gekoppelt. Mathematische Techniken, die als Homogenisierung bekannt sind, und/oder sogenannte Netzwerkmodelle müssen eingesetzt werden, um die komplexen Zusammenhänge zu erfassen. Darüber hinaus wäre es wünschenswert, die Trocknungskinetik experimentell nicht nur von außen zu beobachten, sondern während der Trocknung auch in das Innere der Partikel schauen zu können. Die Kernspintomographie ist hierfür die Methode der Wahl, entsprechende, modernste Geräte werden beim Erscheinen dieses Heftes im Jubiläumsjahr 2003 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg installiert sein. Vier Lehrstühle der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik werden diese Geräte gemeinsam betreiben.

Abbildung 7
Schematische Darstellung eines mit Flüssigkeit teilgesättigten porösen Stoffes.



che für andere Stoffe – wird ein Teil des Lohns für die Mühe sein. Darüber hinaus eröffnet das Verständnis des Zusammenhangs zwischen makroskopisch nutzbarer Eigenschaft und der Mikrostruktur die Möglichkeit, Stoffe gezielt zu gestalten – eine bemerkenswerte Möglichkeit, die es früher nicht gab.

Aus dem Großen zum noch Größeren

Freilich muß man nicht bei jeder technischen Aufgabe das komplexeste Modell oder die aufwendigste Meßtechnik einsetzen, Vieles läßt sich auch mit relativ einfachen Mitteln zufriedenstellend bewältigen. So soll auf einem für die Industrie so interessanten Gebiet wie der Trocknungstechnik eine Vielfalt von rechnerischen und experimentellen Werkzeugen vorgehalten werden, die durch die große Anzahl unterschiedlicher Apparatetypen sogar noch vielfältiger wird. Damit daraus kein Chaos entsteht, bedarf es eines übergeordneten Rahmens, der am Magdeburger Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik „Dryer Design System“ genannt wird. Werkzeuge zur Vorauswahl des für eine gewisse Aufgabe am besten geeigneten Trocknertyps, Auslegungssoftware unterschiedlicher Detailtreue und die hierzu passenden Meßmethoden zur Bestimmung notwendiger Eingabedaten bilden die Eckssäulen dieses Systems, wie Abbildung 8 schematisch zeigt. Diese werden von Funktionen ergänzt, die den Anwender unterstützen und die Gelegenheit bieten, spezifisches Know-how zu speichern. Gewiß ist das System offen – einer Baustelle ähnlich, an der fortwährend gearbeitet wird.

Was in bezug auf einen einzigen Prozeß sinnvoll ist – nämlich seine ganzheitliche Betrachtung – ist im Hinblick auf ein aus mehreren Prozessen bestehendes Produktionsverfahren eigentlich unerlässlich. Entsprechende, mit benutzerfreundlichen Oberflächen ausgestattete, Werkzeuge sind kommerziell erhältlich, reif und leistungsfähig, wenn es um die Handhabung von Flüssigkeiten geht, Mangelware jedoch in bezug auf Feststoffe – aus den bereits erläuterten Gründen. Diese gewaltige Lücke zu schließen, hat sich ein Konsortium aus elf deutschen Laboratorien vorgenommen und für ein Verbundprojekt mit dem Titel „Fließschemasimulation von Feststoffprozessen“ die Unterstützung der Gesellschaft Verfahrens-Technik (GVT) und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gewinnen können. Gleich zwei Lehrstühle aus Magdeburg, die Thermische Verfahrenstechnik und der Chemische Apparatebau, sind an dem Projekt beteiligt, das im April 2003 begonnen hat.

So wird der mehrskalige („multiscale“) Charakter der Trocknungstechnik noch deutlicher, der vom ganz Kleinen (dem adsorbierten Molekül) über das recht Kleine (die Pore), das Kleine (die Partikel) und das relativ Große (den Apparat) bis zum ganz Großen (dem Produktionsverfahren oder gar dem stofflichen Kreislauf) reicht. Auch dies ist für mehrere Fachgebiete der Verfahrenstechnik typisch.

Abbildung 8
Wichtigste Bestandteile eines Systems zur Auslegung von Trocknungsprozessen und -apparaten.

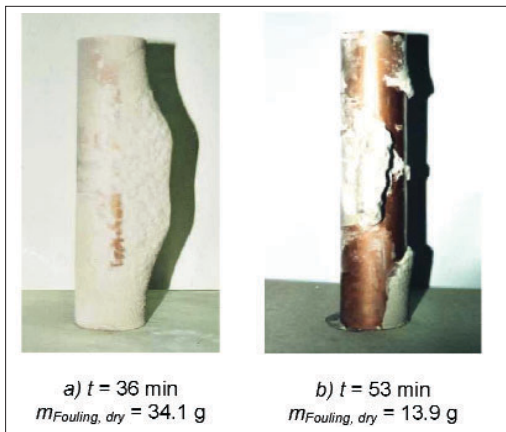


Abbildung 9
Beispiele für die im Sinne einer Wärmerückgewinnung unerwünschte Bildung von Ablagerungen aus Trocknerabgasen. Derartige Vorgänge können nachgestellt und experimentell untersucht werden /8/.

An der Peripherie

In einem derart abgesteckten Rahmen dürfen periphere Elemente des Trocknungsprozesses auch nicht vernachlässigt werden. Möchte man z. B. aus dem feuchten und staubigen Abgas eines Trockners Wärme zurück gewinnen – was angesichts des bereits besprochenen, hohen Energiebedarfs des Prozesses sehr sinnvoll wäre – so dürfen die Flächen entsprechender Wärmeübertrager nach einer Weile der Benutzung nicht wie in Abbildung 9a aussehen. Und wenn sie doch so aussehen, sollte die Konsistenz der bei gleichzeitiger Kondensation an der kalten Fläche entstehenden Staubablagerung (des sogenannten „Fouling“) zumindest derart sein, daß die Schicht von selbst abfällt (Abbildung 9b) bzw. leicht abgetragen werden kann. Ob dies tatsächlich eintritt, kann in Magdeburg experimentell untersucht werden /8/.

Auch darf – um ein zweites Beispiel zu nennen – die Restfeuchte eines getrockneten Produktes, das in einem Silo lagert, nicht derart wandern, das flüssiges Wasser an der kalten Bunkerwand kondensiert. Derartiger „Silo-Regen“ macht nicht nur bei Kunden einen schlechten Eindruck, sondern er ist in der Tat für die Produktqualität schlecht. Findet die Kondensation an Korngrenzen statt, so kann sie bei wasserlöslichen Produkten sogar zur lokalen Auflösung und Rekristallisation führen. Die Körner wachsen dann zusammen, wodurch das Material seine Fließfähigkeit verliert. Während dies in Salzstreuern lediglich zu kleinen Unannehmlichkeiten führt, hat aus dem gleichen Grund der Inhalt mancher Zucker-Silos bergmännisch abgebaut werden müssen. Das Zusammenspiel zwischen adsorptivem Gleichgewicht, Wärmetransport und Stofftransport steuert solche Effekte, es liefert aber auch den Schlüssel für ihre Einschätzung und Vermeidung /9/.

Feststoffe, maßgeschneidert

Große Erfahrung mit der Herstellung, der „Formulierung“, von Partikeln hat der Magdebur-

ger Lehrstuhl für Chemischen Apparatebau – also Professor Lothar Mörl und seine Arbeitsgruppe, zu der auch Dr.-Ing. Stefan Heinrich, einer der beiden ersten Junior-Professoren der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, gehört. Hierbei werden, wie bereits angedeutet, Wirbelschichten eingesetzt, in die eine Schmelze, eine Lösung oder eine Suspension (in Flüssigkeit verteilte, feine Teilchen, auch „slurry“ genannt) eingedüst wird. Die feststoffhaltigen, feinen Tröpfchen treffen auf die Partikeln der Wirbelschicht und bewirken, je nach Betriebsbedingungen, daß diese mit einer Schicht überzogen werden, gleichmäßig wachsen oder zu größeren Partikeln verschmelzen. Coating, Granulation bzw. Agglomeration sind hierfür die Fachbegriffe. Das Ergebnis sieht man exemplarisch in Abbildung 10. Damit die genannten formgebenden Prozesse in der Wirbelschicht ablaufen können, ist die Entfernung der Trägerflüssigkeit – meistens Wasser – durch Trocknung erforderlich. Die Modellierung erfolgt ähnlich wie bei der Trocknung, wobei nun der Populationsdynamik eine noch größere Bedeutung zukommt – will man doch wissen, mit welcher Verteilung der Korngröße das Produkt den Apparat verläßt /10/. Auch hier müssen verschiedene Skalen betrachtet werden, um z. B. von den Kräften, die

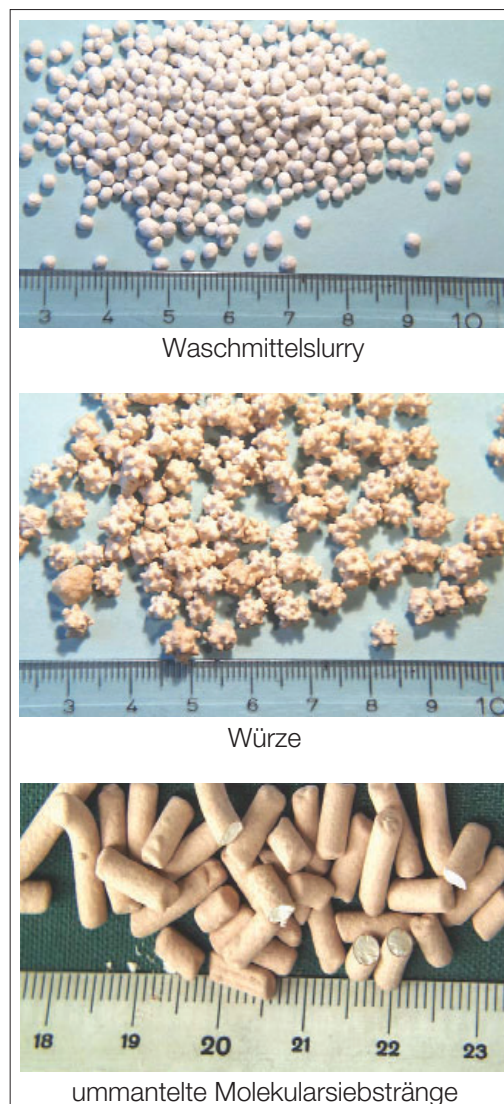


Abbildung 10
Hunderte verschiedener Stoffe wurden bis jetzt am Lehrstuhl für Chemischen Apparatebau erfolgreich zu Partikeln formuliert, hier werden lediglich drei Beispiele gezeigt; (Molekularsieb (Zeolith): feinstporöser Stoff, zur Trennung von Gasgemischen gut geeignet und katalytisch aktiv, nicht unähnlich dem bereits erwähnten γ -Aluminiumoxid).

zwischen festen Oberflächen und dünnsten Flüssigkeitsfilmen wirken, auf Effizienz und Dynamik großer technischer Anlagen zu gelangen. Auf mehreren Gebieten arbeiten die Lehrstühle für Chemischen Apparatebau und für Thermische Verfahrenstechnik eng zusammen; gleichzeitig suchen sie die Kooperation mit weiteren Partnern aus dem In- und Ausland.

SCHLUSSWORT

Für die Forschungstätigkeit an der Magdeburger Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik wurde hier mit der Trocknung ein Beispiel gegeben – weitere andere Beispiele wären möglich, auch über die enge Zusammenarbeit, die zwischen der Fakultät und dem Max-Planck-Institut

für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg erfolgreich besteht. Allen gemeinsam ist der Anspruch, Forschung stets am internationalen Wettbewerb zu messen. Und für alle gilt, daß Forschung nicht einfach neben der Lehre stattfindet, sondern für die Lehre eine unabdingbare Voraussetzung ist. Während die Bedeutung der Technik, also der Ingenieurwissenschaften, für eine Sicherung des Wohlstandes und für nachhaltige Entwicklung unstrittig ist, sind Technik und Ingenieurwissenschaften auch aus regionaler Sicht ein wichtiger Standortfaktor – für industriell hochentwickelte Regionen gewiß, für solche, die es wieder werden wollen, wahrscheinlich um so mehr. Auch in diesem Sinne versucht man, in Magdeburg einen Beitrag zu leisten.

Literatur

- /1/ Tsotsas, E. (Bearbeiter), Trocknungstechnik – Trocknungstechnische Grundbegriffe, VDMA 24351, Einheitsblätter des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1999
- /2/ Bond, A., Model approach to dryer control, *Process Engng*, 11(1980), 85
- /3/ Burgschweiger, J., Tsotsas, E., Experimental investigation and modelling of continuous fluidized bed drying under steady-state and dynamic conditions, *Chem. Eng. Sci.*, 57(2002), 5021-5038
- /4/ Schlünder, E.-U., Tsotsas, E., Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttungen und Wirbelschichten, Thieme Verlag, Stuttgart, 1998
- /5/ Groenewold, C., Möser, C., Groenewold, H., Tsotsas, E., Determination of single-particle drying kinetics in an acoustic levitator, *Chem. Eng. J.*, 86(2002), 217-222
- /6/ Burgschweiger, J., Groenewold, H., Hirschmann, C., Tsotsas, E., From hygroscopic single particle to batch fluidized bed drying kinetics, *Can. J. Chem. Eng.*, 77(1999), 333-341
- /7/ Groenewold, H., Hirschmann, C., Burgschweiger, J., Tsotsas, E., Comparison of convective drying kinetics of active and inactivated Al_2O_3 , *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 48(2000), No. 2, 369-382
- /8/ Kaiser, S., Antonijevic, D., Tsotsas, E., Formation of fouling layers on a heat exchanger element exposed to warm, humid and solids loaded air streams, *Exper. Thermal and Fluid Sci.*, 26(2002), 291-297
- /9/ Schneider, M., Tsotsas, E., On the predictability of silo rain: Modeling moisture migration in beds of particulates after drying, *Proceedings of the 1st Nordic Drying Conference, Trondheim/Norway, 2001*, Paper No. 15
- /10/ Heinrich, S., Peglow, M., Ihlow, M., Henneberg, M., Mörl, L., Analysis of the start-up process in continuous fluidized bed spray granulation by population balance modelling, *Chem. Eng. Sci.*, 57(2002), 4369-4390



Prof. Dr.-Ing. habil. Evangelos Tsotsas

wurde 1959 in Thessaloniki geboren, wo er auch die Schule besuchte und 1981 von der dortigen Universität ein Diplom des Maschinenbaus erhielt. Dem Wechsel an die Fakultät für Chemieingenieurwesen der Universität Karlsruhe folgten 1985 die Promotion und 1990 die Habilitation. Nach

einer Tätigkeit in der internationalen chemischen Industrie nahm Evangelos Tsotsas Ende 1994 den Ruf auf den in Magdeburg neu gegründeten Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik an, den er seitdem leitet. Am Lehrstuhl werden die Transportvorgänge in mehrphasigen, dispersen Stoffsystemen der Verfahrenstechnik, insbesondere in granularen und porösen Medien, mit Bezug auf Trenn- und reaktive Prozesse sowie auf die Produktgestaltung untersucht. Für seine Arbeiten auf dem im Beitrag dargestellten Gebiet der Trocknungstechnik wurde Professor Tsotsas im Sommer 2002 mit dem internationalen „Award for Innovation in Drying Research“ ausgezeichnet. Von 1998 bis 2002 war Evangelos Tsotsas Dekan der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik.