

# Ermittlung der optimalen Struktur von Instantagglomeraten für ein schnelles Eindringen von Flüssigkeiten

Helmar Schubert\*

Instantprodukte, die hauptsächlich aus dem Lebensmittelbereich bekannt geworden sind, sollen sich in Flüssigkeiten möglichst schnell auflösen bzw. dispergieren lassen. Eine derartige Bedingung ist i. a. nur zu erreichen, wenn ein ausreichend feinkörniges Ausgangsmaterial bzw. eine große spezifische Oberfläche vorliegt. In feinkörnige Pulver, die nicht vollständig benetzt werden (Randwinkel  $\delta > 0$ ), dringt die Flüssigkeit jedoch i. a. nicht ausreichend schnell und vor allem nicht gleichmäßig ein. Durch eine spezielle Behandlung – das sog. Instantisieren – läßt sich eine wesentlich schnellere und hinreichend gleichmäßige Befeuchtung erreichen. Ein gleichmäßiges Eindringen der Flüssigkeit ist insbesondere zur Vermeidung einer „Klumpenbildung“ für Instantprodukte anzustreben.

Von den verschiedenen Instantverfahren [1] werden Agglomerierverfahren am häufigsten verwendet, zu denen in diesem Zusammenhang auch die verschiedenen Arten der Sprühtrocknung und Gefriertrocknung zählen. Man erhält oder gewinnt durch diese Verfahren die für eine schnelle Auflösung in Flüssigkeiten geforderte hohe spezifische Oberfläche und erzielt gleichzeitig ausreichend große Partikeln, die für einen schnellen kapillaren Flüssigkeitstransport in der Schüttung

notwendig sind. Die durch Agglomerieren hergestellten Instantprodukte werden als Instantagglomerate bezeichnet.

Die vielfältigen Instant-Agglomerierverfahren sind aus dem Schrifttum bekannt. Auch liegt ein umfangreiches stoffspezifisches Wissen vor. Dagegen mangelt es an grundlegenden Kenntnissen über den Gesamtvorgang des Dispergierens bzw. Lösens von Instantprodukten, der sog. Rekonstitution.

Man kann die Rekonstitution von Instantagglomeraten in vier Teilvorgänge gliedern [2]. Der erste Teilvorgang, das Eindringen der Flüssigkeit (Durchfeuchtung), ist eine notwendige Voraussetzung für die nachfolgenden Vorgänge. Wegen der großen Bedeutung für die Rekonstitution werden hier nur die grundlegenden Durchfeuchtungsvorgänge behandelt. Zur anschaulichen Darstellung wird davon ausgegangen, daß sich die Instantagglomerate während des Eindringens der Flüssigkeit nicht verändern.

Bei quellfähigen Produkten bedeutet dies beispielsweise, daß die Befeuchtung des Porensystems beendet sein muß, bevor sich ein Quellen störend bemerkbar macht.

Wegen der geforderten hinreichend schnellen Durchfeuchtung bildet sich bei Instantprodukten im Gegensatz zu langsamen kapillaren Transportvorgängen i. a. eine scharfe Flüssigkeitsfront aus, wobei im bereits gefüllten Porenraum nahezu keine Lufteinschlüsse zurückbleiben [3]. Für die eindimensionale Anordnung mit der Koordinate  $y$  in Strömungsrichtung ergibt sich die auf den freien Querschnitt  $A$  bezogene Geschwindigkeit der Flüssigkeit zu

$$v_A = \varepsilon \frac{dy}{dt} = \frac{B_0}{\eta} \frac{p_k}{y} \quad (1)$$

In dieser als Darcy-Gleichung bekannten Beziehung bedeuten  $\varepsilon$  die Porosität,  $t$  die Zeit,  $B_0$  die Durchlässigkeit des Porensystems,  $\eta$  die dyn. Zähigkeit der Flüssigkeit und  $p_k$  der Kapillardruck. Als

\* Dr.-Ing. H. Schubert, Dir. u. Prof. Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Institut für Verfahrenstechnik, Engesserstr. 20, 7500 Karlsruhe 1.

wichtigste Voraussetzung enthält Gl. (1) die Vereinfachungen, daß Trägheits- und äußere Feldkräfte vernachlässigt sind und eine homogene Schüttung vorliegt. Setzt man einen konstanten Kapillardruck voraus, so liefert die Integration von Gl. (1) zwischen den Grenzen  $y = 0$  und  $y = h$  sowie  $t = 0$  und der Eindringzeit  $t = t_p$  die Washburn-Gleichung [4]:

$$h^2 = \frac{2B_0 p_k t_p}{\varepsilon \eta} \quad (2)$$

Bei annähernd gleich großen Partikeln der Größe  $x$  ist in 1. Näherung  $B_0 \sim x^2$  und  $p_k \sim x^{-1}$ . Hieraus wird ersichtlich, weshalb bei größeren Partikeln die Flüssigkeit schneller eindringt, also eine Agglomeration die Instanzeigenschaften verbessert.

Aus umfangreichen Untersuchungen von *van Brakel* [5] und eigenen Messungen ist jedoch bekannt, daß Gl. (2) für viele Stoffe nur eine sehr grobe Näherung darstellt. Der Hauptgrund hierfür ist die auch experimentell nachgewiesene Erkenntnis [3], daß für den Eindringvorgang nicht ein konstanter statischer Kapillardruck, sondern der dynamische Kapillardruck maßgebend ist, der sich mit der Geschwindigkeit der Flüssigkeitsfront ändert. Mit dem linearen Ansatz

$$p_k = p_{k0}(1 - v/v_0), \quad (3)$$

wobei  $v = dy/dt$  ist, liefert die Integration von Gl. (1) die zu Gl. (2) analoge Beziehung

$$h^2 + \frac{2B_0 p_{k0} h}{\varepsilon \eta v_0} = \frac{2B_0 p_{k0}}{\varepsilon \eta} t_p. \quad (4)$$

Hierin sind  $p_{k0}$  und  $v_0$  stoffabhängige Größen, die aus einem einfachen Eindringversuch gewonnen werden können, bei dem das eingedrungene Flüssigkeitsvolumen

$$V = \varepsilon h A \quad (5)$$

in Abhängigkeit von  $t_p$  gemessen wird. Da das kapillare Eindringen analog zur Kuchenfiltration verläuft, läßt sich aus den Gln. (4) und (5) die der bekannten Filtergleichung entsprechende Beziehung

$$t_p/V = mV + b \quad (6)$$

$$\text{mit } m = \frac{\eta}{2B_0 p_{k0} \varepsilon A^2} \quad (7)$$

$$\text{und } b = \frac{1}{\varepsilon v_0 A} \quad (8)$$

formulieren. Umfangreiche Experimente haben gezeigt, daß die Auftragung von  $t_p/V$  über  $V$  Geraden ergeben, aus denen sich die Stoffgrößen  $p_{k0}$  und  $v_0$  unmittelbar bestimmen lassen.

Mit Hilfe des experimentell ermittelten Eindringgesetzes kann die für eine schnelle Durchfeuchtung optimale Agglomeratgröße berechnet werden. Bereits in einer früheren Arbeit [6] war eine derartige Optimierungsrechnung ausgeführt worden, wobei von der groben Näherungsgleichung (2) ausgegangen wurde. Für die einstufige

Agglomeration hatte sich die optimale Agglomeratgröße zu

$$x_{\text{opt}} = \sqrt[3]{\frac{xH^2}{2} \left(\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon}\right)^{2,55}} \quad (9)$$

ergeben, wobei  $x$  die Ausgangs-Partikelgröße,  $H$  die Schütthöhe,  $\varepsilon_A$  die Porosität der Agglomerate und  $\varepsilon$  die Porosität der Schüttung bedeuten. Ausgangspunkt war die Überlegung, daß die Flüssigkeit sowohl in die Schüttung (Eindringzeit  $t_{ps}$ ) als auch in die Agglomerate (Eindringzeit  $t_{pA}$ ) eindringen muß. Bei zu großen Agglomeraten bestimmt  $t_{pA}$  den Vorgang, zu kleine Agglomerate erfordern einen zu großen Wert von  $t_{ps}$ . Dazwischen liegt ein Optimum, bei der die Gesamt-Eindringzeit minimal wird. Geht man von Gl. (4) bzw. Gl. (6) aus, so läßt sich auf entsprechende Weise die folgende Beziehung für die optimale Agglomeratgröße herleiten:

$$x_{\text{opt}}^3 + \frac{x_{\text{opt}}^2}{2v_0 m \varepsilon_A^2 A^2} - \left(\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon}\right)^{2,55} \cdot \frac{xH^2}{2} = 0. \quad (10)$$

Mit Hilfe der aus dem Eindringversuch ermittelten Werte von  $m$  und  $v_0$  liefert die reelle Lösung dieser Gleichung, die man z. B. mit einem Taschenrechner auf einfache Weise bestimmen kann, den gewünschten Wert  $x_{\text{opt}}$ . Gegenüber den nach Gl. (9) berechneten groben Schätzwerten ergeben sich nach Gl. (10) je nach den verwendeten Stoffen um ca. 20% bis 80% kleinere  $x_{\text{opt}}$ -Werte.

Eine für die Struktur von Instantagglomeraten wichtige Größe ist die Porosität. Theoretisch läßt sich zeigen [6], daß mit zunehmender Agglomeratporosität die Gesamteindringzeit abnimmt. Bei zu hohen Porositäten wird jedoch der kapillare Flüssigkeitstransport nahezu unterbrochen, so daß die Eindringzeit wieder sehr stark anwächst, vgl. [6]. Es existiert daher eine optimale Porosität, die für Instantagglomerate experimentell ermittelt werden muß und in keinem Fall überschritten werden darf.

Es sei abschließend darauf hingewiesen, daß für eine Gesamtoptimierung von Instantprodukten noch wesentlich mehr Einflußgrößen berücksichtigt werden müssen, die ohne umfangreiche praktische Erfahrung und stoffspezifische Kenntnisse nicht ausreichend erfaßt werden können. Die hier vorgelegten Ergebnisse können daher nur Anhaltswerte liefern, in welcher Weise Instantagglomerate verbessert werden können und wie ein besseres Verständnis grundlegender Vorgänge hierzu nutzbar gemacht werden kann.

Eingegangen am 16. Januar 1978 [K 301]

## Literatur

- [1] *Schulz, M. E.*: Zerstäubungstrocknen und Instantisieren. Verlag Hans Carl, Nürnberg 1963.
- [2] *Pfalzer, L.; Bartusch, W.; Heiss, R.*: Chem.-Ing.-Tech. 45 (1973) S. 510/516.
- [3] *Schubert, H.*: Capillary rise in porous media. Transactions 6th Fund. Res. Symp. „Fibre-water Interactions in Paper-making“, Session 5, No. 3, 1–8 Oxford, 18./23. Sept. 1977.
- [4] *Washburn, E.*: Phys. Rev. 17 (1921) S. 273/283.
- [5] *Brakel, J. van*: Dissertation TH Delft 1975.
- [6] *Schubert, H.*: Chem.-Ing.-Tech. 47 (1975) Nr. 3. S. 86/94.