

B.R. Formisano¹, T. Schapitz², H. Kerskes², C. Bonten¹

Extrudierte zeolithische Wabenkörper für den Einsatz in der Wärmespeicherung

STICHWÖRTER: Zeolith, Wabenkörper, Extrusion, Wärmespeicherung

» **Keram. Z. 68 (2016) [3]**

AUTOR



Dipl.-Ing. Benjamino R. Formisano studierte Werkstoffwissenschaften an der Universität Stuttgart. Seit 2013 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, im Bereich Werkstofftechnik tätig. Dort befasst er sich mit dem Recycling von Gusspolyamid und der Herstellung von zeolithischen Wabenkörpern.
E-Mail: benjamino.formisano@ikt.uni-stuttgart.de

KURZFASSUNG

Zeolithe sind eine große Stoffklasse hochporöser Mineralien, welche sich auf Grund ihrer sehr spezifischen Adsorptionsverhalten für ein breites Anwendungsfeld, wie etwa der Stofftrennung oder der Wärmespeicherung eignen. Bisher werden sie vor allem als Festbetschüttungen aus kugelförmigen Pellets verwendet. Diese erlauben zwar eine gute Einsetzbarkeit der Eigenschaften des Zeoliths, werden jedoch durch den hohen Druckverlust bei der Durchströmung in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt. Mit zeolithhaltigen Wabenformkörpern hingegen ist es möglich, den Druckverlust deutlich zu senken. Zudem können mit Hilfe der makroskopischen Geometrie und der Zusammensetzung der Formmasse die

Eigenschaften des Wabenkörpers auf den entsprechenden Einsatzzweck hin angepasst werden. Eine mögliche Anwendung der Wabenkörper liegt in der reversiblen Speicherung von Abwärme und Wärme aus regenerativen Energien, wie etwa der diskontinuierlich erzeugten Solarthermie. Hierdurch kann ein sinnvoller und wichtiger Beitrag zu einer erfolgreichen Energiewende geleistet werden.

ABSTRACT

Extruded Zeolitic Honeycombs for Heat Storage Applications

Zeolites are a big class of highly porous minerals. Due to their specific adsorption properties, they can be used in versatile applications, such as separation processes or heat storage, for example. Until now, zeolites are mainly used in fixed beds of spherical pellets. The zeolites' properties can be used well in such a shape, but such a set-up suffers from high pressure losses when flown by a medium. However, using zeolitic honeycombs can reduce pressure losses significantly. Configuring the macroscopic geometry of the honeycombs and readapting the molding compounds enables adjusting the properties according to a specific purpose. A possible application of zeolitic honeycombs could be in thermal heat storage systems for waste heat or heat from renewable energies such as discontinuously generated solar thermal energy. This would be a useful and important contribution to a successful energy transition.

1. Einleitung

Im Zuge der deutschen Energiewende werden regenerative Energiequellen weiter an Bedeutung gewinnen. In Bezug auf beispielsweise Wind- oder Solarenergie besteht jedoch eine starke saisonale und tageszeitabhängige Fluktuation der erzeugten Energiemenge. Um diese Fluktuationen auszugleichen, werden effiziente Speicher benötigt, die in Zeiten von viel Wind oder Sonne die Energie aufnehmen und mit möglichst geringen Verlusten zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgeben können. Eine zentrale Bedeutung bei der Energieversorgung von Morgen werden Wärmespeicher spielen, da beispielsweise in Deutschland über die Hälfte der gesamten Endenergie in Form von Prozess- und Raumwärme anfällt. In Haushalten sind es sogar bis zu 85 % der Endenergie für Heizung, Warmwasser und Prozesswärme [1–3].

Derzeit werden fast ausschließlich Speicher fühlbarer Wärme eingesetzt, deren bekanntester Vertreter der Warmwasserspeicher ist. Hier wird Wärme durch Veränderung der Temperatur des Mediums gespeichert [4]. Wasserwärmespeicher sind zwar kostengünstig, benötigen auf Grund ihrer nur begrenzten Speicherdichte jedoch viel Platz. Eine andere Möglichkeit, Wärme aus regenerativen Energien oder Abwärme zu speichern, bieten sogenannte „Sorptionspeicher“, bei denen Wärme nicht in Form einer Temperaturerhöhung gespeichert wird, wie bei den Warmwasserspeichern, sondern mit Hilfe von exothermen Adsorptionsprozessen:

Ein Arbeitsmedium, z.B. Wasser, wird von einem Speichermedium exotherm adsorbiert und gibt dabei nutzbare Wärme ab. Der Prozess ist reversibel und kann theoretisch beliebig oft wiederholt werden.

Der Vorteil thermochemischer Speicher gegenüber Warmwasserspeichern besteht in den geringen Verlusten bei der Speicherung der Wärme auch über sehr lange Zeiträume hinweg, was durch herkömmliche Speicher selbst mit einer sehr aufwendigen Dämmung nicht erreicht werden kann [5].

2. Eignung der Zeolithe für die Wärmespeicherung

Eine Stoffklasse, welche für die sorptive Wärmespeicherung sehr gut geeignet ist, sind Zeolithe. Zeolithe sind Mineralien mit tetraedrischer Kristallstruktur, welche offene Hohlräume in Form von Käfigen und Kanälen enthalten, wie z.B. diverse Alumosilikate. Diese Hohlräume sind zum Teil durch austauschbare Kationen besetzt [6] und groß genug für die Passage von Gastspezies, wie etwa Gasmolekülen. Die Kationen sorgen

¹ Institut für Kunststofftechnik, Pfaffenwaldring 32, D-70569 Stuttgart

² Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Pfaffenwaldring 6, D-70569 Stuttgart

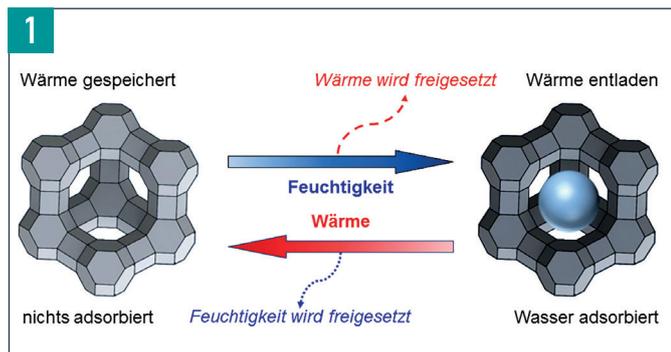


Bild 1 • Sorptive Wärmespeicherung am Beispiel des Stoffpaares Zeolith 13X und Wasser

für den Ladungsausgleich des Kristallgitters. Je nach Art jener Kationen und des Zeolithtyps werden unterschiedliche Poren- und Kanalgrößen im Zeolithkristall und somit andere Adsorptionspräferenzen erreicht.

Die Adsorption an Zeolithen kann daher für eine Vielzahl von verfahrenstechnischen Trennprozessen eingesetzt werden, wobei Zeolithe zudem den Vorteil einer besonders großen inneren Oberfläche [7] bieten. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen von relativ einfachen Verfahren, wie der Lufttrocknung oder der Abtrennung von CO₂ aus Biogasen, bis hin zu komplexen Themengebieten, wie der Trennung von sehr ähnlichen Polyolefinen und Isomeren [8]. Ausgewählt wird ein Zeolith dabei u.a. nach der erreichbaren Selektivität und Adsorptionskinetik und seiner erreichbaren Kapazität in Bezug auf den aufzunehmenden Stoff [9]. Auch im Bereich der Katalyse werden ausgewählte Zeolithtypen u.a. in für das Cracking in Erdölraffinerien [6] eingesetzt.

Eine für die Zukunft interessante Anwendung liegt in der oben genannten Speicherung von Wärme aus regenerativen Quellen, Abwärmeströmen etc. unter Ausnutzung der Sorptionsenthalpie, wie schematisch in Bild 1 dargestellt ist. Dabei wird Abwärmeenergie oder überschüssige Solarenergie in Zeiten hoher Sonneneinstrahlung zur Trocknung von Zeolith-Adsorptionskörpern genutzt. Die so gespeicherte Wärme kann durch Wasserdampfadsorption auf dem Zeolith wieder freigesetzt und dann z.B. zur zeitversetzten Beheizung oder Warmwassererzeugung im Haushalt genutzt werden. Ein solcher „Wärme-Akku“ besitzt einen hohen Speicherwirkungsgrad und erreicht systemabhängig mit 120 bis 177 kWh/m³ [5, 10, 11] eine mehrfache Speicherdichte im Vergleich zu den oben genannten Warmwasserspeichern.

In der industriellen Anwendung von Zeolithen werden derzeit vor allem Schüttungen aus kugelförmigen Pellets unterschiedlicher Geometrie (s. Bild 2) eingesetzt. Für viele Anwendungsfälle genügen sie, um die entsprechenden Eigenschaften des Zeoliths zum Tragen zu bringen. Der größte Nachteil dieser Schüttungen ist jedoch ihr hoher Druckverlust. Wird stattdessen der Zeolith in eine Wabenform gebracht, kann je nach Geometrie der Druckverlust zum Teil deutlich reduziert werden.

Abhängig von Art und Menge der Formmassenkomponenten und der Werkzeuggeometrien lassen sich Zeolith-Wabenkörper nahezu jeder Form und mit einem breiten Eigenschaftsspektrum herstellen. Es ist aber darauf zu achten, dass sich manche dieser Eigenschaften entgegenstellen. Wie beispielhaft in Bild 3 gezeigt, stehen sich Kinetik, Kapazität und mechanische Eigenschaften gegenüber. Eine möglichst hohe Kinetik bedarf eines guten und schnellen Zugangs zum Zeolith, also einer dünnwandigen Struktur und einer hohen Porosität. Für eine möglichst hohe Kapazität wird eine maximale Menge von Zeolith pro Volumen, also eher dicke Wände und eine geringe Porosität benötigt, während für gute mechanische Eigenschaften ein höherer Bindemittelanteil und eine



Bild 2 • Pellets aus Zeolith [15]

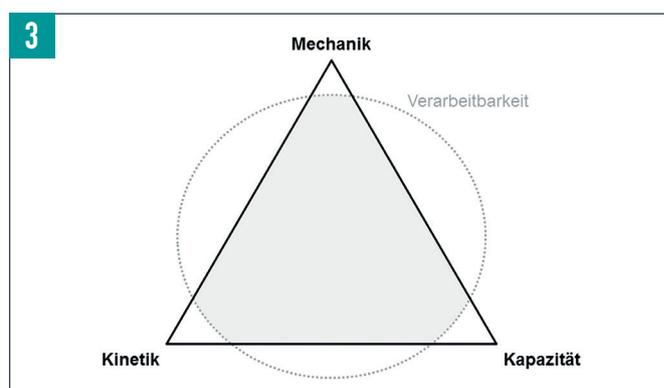


Bild 3 • Spannungsdreieck für die Herstellung zeolithischer Wabenkörper

geringere Porosität sinnvoll sind. Daher ist es wichtig, für den jeweiligen Anwendungsfall angepasste Wabenkörper herzustellen, um die jeweiligen Möglichkeiten dieses Materials möglichst voll auszuschöpfen.

Ziel der Arbeiten am Institut für Kunststofftechnik (IKT) ist die Herstellung von Zeolith-Wabenkörpern unterschiedlicher Geometrie mit einem möglichst hohen Zeolithgehalt, also möglichst hoher Kapazität. Dies ermöglicht Aussagen über die Füllgrenze der Formmasse und zukünftige Arbeiten zur Optimierung der Kinetik auf den jeweiligen Anwendungsfall hin – im Rahmen eines laufenden Projektes z.B. die Wärmespeicherung.

3. Herstellungsverfahren der Zeolith-Wabenkörper

Prinzipiell gibt es drei Herstellungsmöglichkeiten für Zeolith-Wabenkörper. Die erste Gruppe wird in einem thermoplastischen Verfahren hergestellt und besitzt eine Kunststoffmatrix [12]. Die Eigenschaften, sind hier vom verwendeten Kunststoff abhängig, womit z.B. die Temperaturbeständigkeit auf max. 260 °C beschränkt ist. Des Weiteren existieren sog. „bindemittelfreie“ Wabenkörper [13], welche jedoch nur sehr aufwendig herzustellen sind. Zuletzt gibt es die Möglichkeit, Zeolith-Wabenkörper mit einer mineralischen Matrix herzustellen. Hierbei werden typischerweise vier Komponenten eingesetzt [14]: Ein pulverförmiges Aktivmaterial, ein Binde- und ein Plastifizierhilfsmittel sowie ein Lösungsmittel.

Das Aktivmaterial bestimmt die sorptiven oder reaktionstechnischen Eigenschaften des fertigen Wabenkörpers. Die am IKT hergestellten Wabenkörper enthalten Zeolith 4A oder Zeolith 13X, welche sich für die Wärmespeicherung besonders eignen. Auch die Verarbeitbarkeit von anderen Aktivmaterialien konnte an Hand von Magnesiumhydroxid nachgewiesen werden.

Des Weiteren wird ein Bindemittel benötigt, welches die mechanische Festigkeit des fertigen Wabenkörpers nach der Herstellung bewirkt. Hier wurde ein spezielles, bei Raumtemperatur flüssiges, aushärtendes Polysiloxan verwendet. Hierdurch ist es möglich, auf gesundheitsschädliche Lösungsmittel zur Verflüssigung des Binders bei der Verarbeitung zu verzichten.

Um eine solche Formmasse plastisch und verarbeitbar zu machen, werden zusätzlich noch ein Plastifizierhilfsmittel sowie ein passendes Lösungsmittel benötigt. Hier hat sich u.a. eine Kombination von Methylhydroxyethylcellulose (MHEC) und Wasser bewährt. Um einen Ionenaustausch im Zeolith zu vermeiden, wurde demineralisiertes Wasser verwendet.

Die Herstellung der zeolithischen Wabenkörper erfolgte auf einem Doppelschneckenextruder des Typs ZSK 40 MC der Firma Coperion, Stuttgart. Die Verwendung eines solchen Doppelschneckenextruders ermöglicht es, Formmassenherstellung und Formgebung in nur einem Arbeitsschritt durchzuführen. Um ein übermäßiges Erwärmen der Formmasse im Extruder zu verhindern, wurde die maximal mögliche Kühlleistung verwendet. Für die Herstellung verschieden dimensionierter Wabenkörper wurden drei Werkzeuge mit Kanalweiten von 0,83–1,3 mm und Stegbreiten von 1,8–0,22 mm verwendet, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Nach der Extrusion wurden die Wabenkörper auf Länge geschnitten und in einer Mikrowellenanlage getrocknet. Abschließend erfolgte dann das Tempern in einem Trockenofen bei 200 °C.

4. Prüfung und Eigenschaften der Zeolith-Wabenkörper

Bei den Extrusionsversuchen zeigte sich, dass Zeolith-Wabenkörper mit einem hohen Füllgrad hergestellt werden können, dargestellt in Bild 4. Nach dem Trocknen weisen sie im Grünzustand einen Zeolithanteil von 77 Massen-% auf. Auf Grund von Spaltproduktbildung und deren Ausgasung z.B. bei der Aushärtung des Bindemittels während des Temperns sind keine Werte zum Zeolithgehalt der fertigen Wabenkörper vorhanden. Es ist jedoch naheliegend, dass er noch höher ist als im Grünzustand. Die Ergebnisse von Druckfestigkeitsmessungen quer zur Extrusionsrichtung, in Bild 5 vorgestellt, lassen erkennen, dass die Wabenkörper mit den breiteren Stegen (Werkzeug A) eine höhere Druckfestigkeit aufweisen. Durch die breiteren Stege kann eine höhere Kraft aufgenommen werden als bei den dünnwandigeren, bevor der Wabenkörper versagt. Des Weiteren fällt auf, dass die Druckfestigkeit der Wabenkörper mit Zeolith 13X höher ist als jene mit Zeolith 4A. Daher wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop Bilder von beiden Zeolithpulvern aufgenommen, welche in Bild 6 gezeigt sind. Das verwendete 4A-Pulver besteht aus kubischen Partikeln (Bild 6 (A)), während das Pulver des 13X-Zeoliths eine eher unregelmäßige Kornform aufweist (Bild 6 (B)). Diese führt zu einer besseren Verhakung der Pulverpartikel untereinander und zu einer verstärkten Brückenbildung. Was sich bei der Verarbeitung manchmal als hinderlich erweist, hat zumindest im vorliegenden Fall positive Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften.

Um die Adsorptionsleistung der verschiedenen erzeugten Wabenkörper zu ermitteln, wurden diese in einem Versuchsreaktor axial (in Extrusionsrichtung) mit Luft bei vorgegebener Eintrittstemperatur (30 °C) bei

Werkzeug	Stegbreite / mm	Kanalweite / mm	Zelldichte / cpi
A	1,8	1,3	58
B	0,3	1,0	374
C	0,22	0,83	568

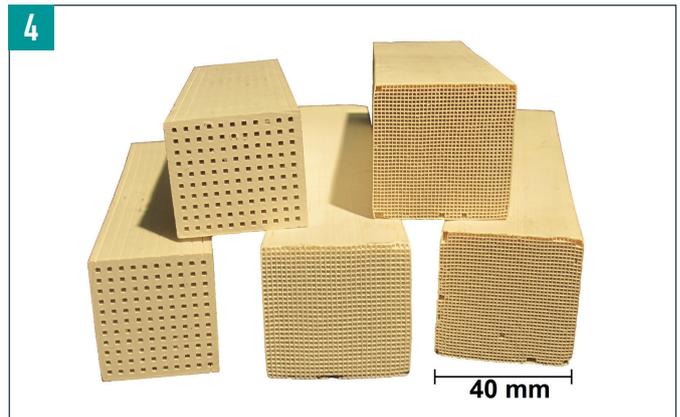


Bild 4 · Am IKT extrudierte zeolithische Wabenkörper

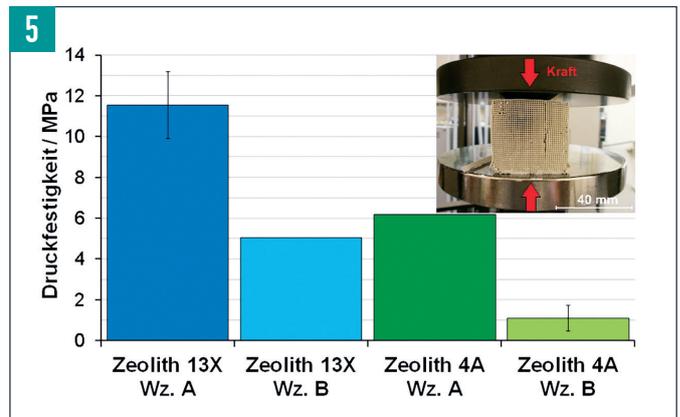


Bild 5 · Druckfestigkeiten der Wabenkörper quer zur Extrusionsrichtung, nach [16]

drei verschiedenen Feuchtegehalten (Wasserdampfpartialdruck 10, 15 und 20 mbar) durchströmt. Aufgrund der Adsorption erwärmt sich die Luft entsprechend der aufgenommenen Wassermenge im Reaktor. In Bild 7 und Bild 8 sind die Austrittstemperaturen der Wabenkörper mit Zeolith 13X und Zeolith 4A bei den unterschiedlichen Wasserdampfpartialdrücken dargestellt. Bei allen Messkurven nimmt mit zunehmendem Partialdruck die Maximaltemperatur ebenfalls zu. Zudem ist zu sehen, dass die mit dem Werkzeug A erzeugten dickwandigen Wabenkörper eine geringere Maximaltemperatur sowie eine deutlich geringere und damit langsame Abnahme der Austrittstemperatur zeigen. Dies lässt auf einen langsameren und damit längeren Adsorptionsvorgang schließen. Bei den Wabenkörpern aus Werkzeug B hingegen sind die erreichten Maximaltemperaturen höher und die Temperaturabnahme deutlich schneller, was auf eine schnellere Adsorption hinweist, welche mit der höheren spezifischen Oberfläche dieser Wabenkörper, siehe Bild 9, begründet werden kann. Bei den dünnwandigsten Wabenkörpern aus Werkzeug C

6

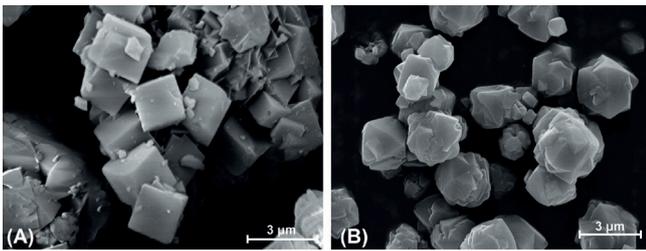


Bild 6 • Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der 4A- (A) und 13X- (B) Pulver

7

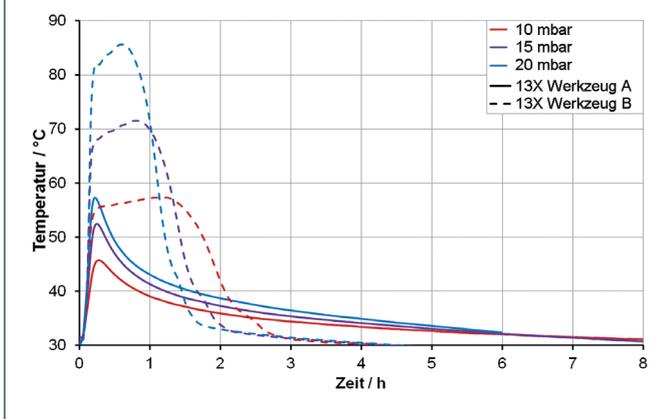


Bild 7 • Austrittstemperaturen der Wabenkörper mit Zeolith 13X

8

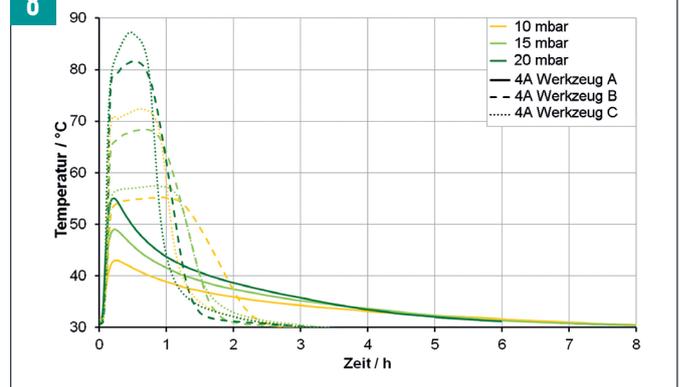


Bild 8 • Austrittstemperaturen der Wabenkörper mit Zeolith 4A

9

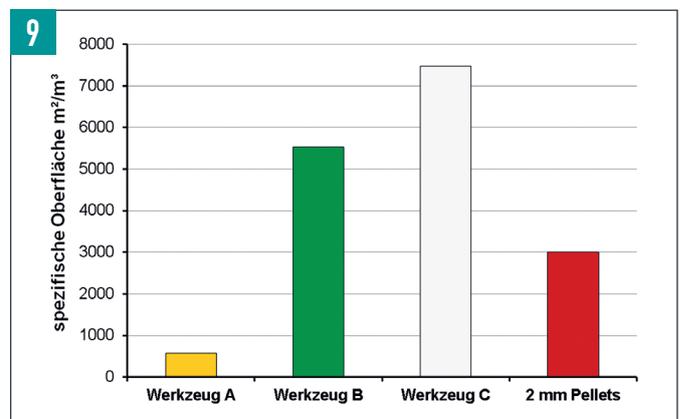


Bild 9 • Vergleich der spezifischen Oberflächen

ist dieser Effekt noch deutlicher zu erkennen.

Nicht nur Zeolithtyp, sondern auch Porosität und Bindemittelgehalt haben Einfluss auf das Beladungsverhalten. Ein Beispiel ist in Bild 10 aufgeführt. Hier wurden zerkleinerte Proben aus den dickwandigen Wabenkörpern mit beiden Zeolithtypen bei gleicher Temperatur und Feuchtigkeit gelagert und die Feuchtigkeitsaufnahme untersucht. Gleichmaßen wurde noch eine kommerzielle 13X-Schüttung untersucht. Es zeigt sich, dass der zerkleinerte 4A-Wabenkörper zuerst schneller Feuchtigkeit aufnimmt als ein ebenso bearbeiteter 13X-Wabenkörper, die Gesamtheftigkeitsaufnahme jedoch geringer ist. Die getesteten kommerziellen 13X-Pellets weisen eine höhere Feuchtigkeitsaufnahme auf als der zerkleinerte 13X-Wabenkörper; da jedoch keine Angaben über die jeweiligen Bindemittelgehalte verfügbar sind, trifft diese Aussage explizit nur auf den untersuchten Fall zu.

Vergleicht man die berechneten Druckverluste der verschiedenen Wabenkörperformen mit der einer Kugelschüttung mit 2 mm Durchmesser, in Bild 11 abgebildet, so zeigt sich eindeutig, dass alle untersuchten Wabenkörper bei gleicher durchströmter Länge einen deutlich geringeren Druckverlust als die Kugelschüttung aufweisen. Zusätzlich zeigen die berechneten spezifischen Oberflächen in Bild 9, dass die dünnwandigeren Wabenkörper zudem eine 1,8- bis 2,5-fache spezifische Oberfläche im Vergleich zur Festbettschüttung aufweist. Hier zeigt sich die strömungstechnische Überlegenheit der Zeolith-Wabenkörper gegenüber Zeolithpellets deutlich.

5. Schlussfolgerungen

Insgesamt lässt sich sagen, dass zeolithische Wabenkörper im Vergleich zu Festbettschüttungen eine große Möglichkeit für die Erweiterung der Anwendungsvielfalt bedeuten:

Es ist möglich, bei den Formkörpern Kapazität und Kinetik einzustellen, da hohe Wanddicken höchste volumenspezifische Füllgrade ermöglichen, während dünnwandigere Wabenkörper eine schnellere Kinetik durch bessere Zugänglichkeit aufweisen. Zudem geben Veränderungen in der Formmasse weitere Möglichkeiten zur Anpassung. Gleichzeitig ist es möglich, hohe Druckfestigkeiten zu erzielen. Dies ermöglicht den Einsatz in selbsttragenden Strukturen und/oder harscheren Anwendungsbedingungen. Nicht zuletzt macht sie der im Vergleich zu Festbettschüttungen niedrige Druckverlust für viele Anwendungen interessant, da die durchströmbare Länge in einer Anlage deutlich erhöht werden kann.

Mit Kenntnis der maximalen Formmassenfüllbarkeit ist es nun möglich, weitere Eigenschaften, wie etwa die für die Kinetik wichtige Porosität auf den jeweiligen Einsatzzweck, etwa für die Wärmespeicherung, hin anzupassen.

Zudem ergibt sich die Möglichkeit, Zeolith-Wabenkörper durch entsprechende Veränderungen der Formmasse oder durch Nachbehandlungen für eine Vielzahl weiterer Anwendungen auszulegen: etwa für die Katalyse, eine direkte Gas-/Stofftrennung bei der Durchströmung oder der Trocknung und Klimatisierung z.B. von Gebäuden und Fahrzeugen.

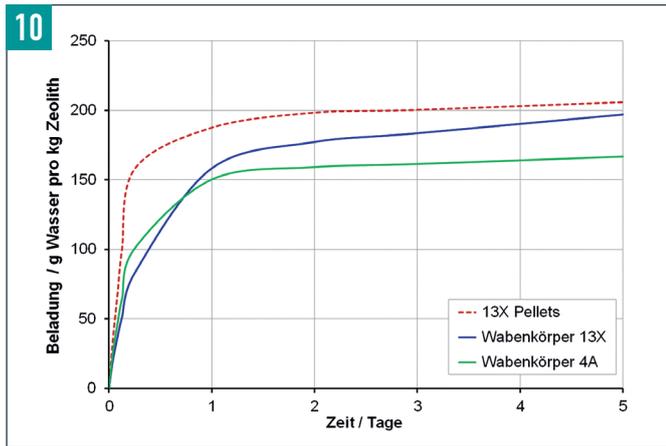


Bild 10 • Beladung der Wabenkörper

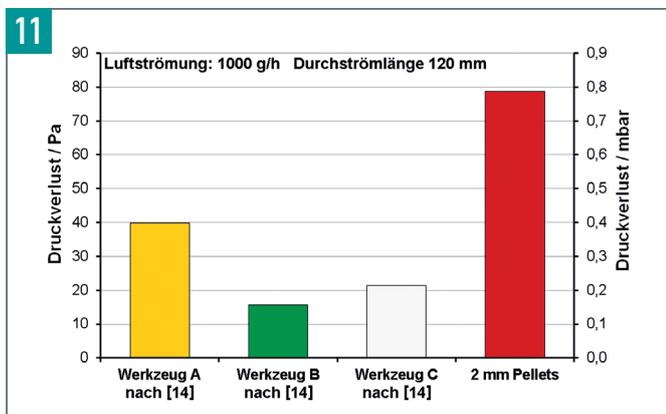


Bild 11 • Vergleich der Druckverluste unterschiedlicher Wabengeometrien mit einer Pelletschüttung

Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojektes MAKSORe unter dem Kennzeichen O3SF0441C vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Zudem danken wir der Firma Grace GmbH, Worms, für die freundliche und großzügige Unterstützung mit Rohmaterial und Proben.

Literatur

[1] **Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.:** Energieverbrauch im Haushalt. BDEW-Datenkatalog, (2010). [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100927_Energieverbrauch_im_Haushalt/\\$file/Energie-Info%20Energieverbrauch%20in%20Haushalten%202009.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100927_Energieverbrauch_im_Haushalt/$file/Energie-Info%20Energieverbrauch%20in%20Haushalten%202009.pdf). Zugriff: 2. Mai 2016

[2] **Umweltbundesamt:** Anteile der Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe (2014): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/anteile-der-energieformen-strom-waerme-kraftstoffe>. Zugriff: 2. Mai 2016

[3] **Umweltbundesamt:** Energieverbrauch der privaten Haushalte (2015). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/energieverbrauch-der-privaten-haushalte>. Zugriff: 2. Mai 2016

[4] **Sterner, M., Stadler, I.:** Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer, Heidelberg (2014), ISBN: 978-3-642-37379-4

[5] **Hauer, A.:** Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen. Dissertation, Fakultät für Prozesswissenschaften, Universität Berlin (2002)

[6] **Coombs, D.S., Alberti, A., Armbruster, T., Artioli, G., et al.:** Recommended nomenclature for zeolite minerals: report of the subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. Mineralogical Magazine **62** (1998) [4] 533–571

[7] **Puppe, L., Büchner, W.:** Zeolithe – Struktur, Synthesen, Anwendungen. Naturwissenschaften **71** (1984) 192–198

[8] **Auerbach, S.M., Carrado, K.A., Dutta, P.K. (Ed.):** Handbook of Zeolite Science and Technology. Marcel Dekker, Basel, New York (2003), ISBN: 0-8247-4020-3

[9] **Kaman, N.:** Die Verwendung von Molekularsieb-Zeolithen zur Trennung von Ethanol-Wasser-Gemischen. Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Oldenburg (1993)

[10] **Kerskes, H., Sommer, K., Müller-Steinhagen, H.:** Monosorp – Integrales Konzept zur solarthermischen Gebäudeheizung mit Sorptionswärmespeicher. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS (2007)

[11] **Gantenbein, P., Frei, U.:** Zeolithspeicher in der thermischen Solartechnik: Machbarkeit und Potential. Programm Aktive Sonnene Energienutzung, Solarthermik, ausgearbeitet im Auftrag des Bundesamtes für Energie (2000)

[12] **Hammer, J.:** Entwicklung zeolithischer Adsorptionsformteile mit thermoplastischen Polymeren als Plastifizier- und Bindemittel. Dissertation, Institut für Kunststofftechnologie, Universität Stuttgart (2006)

[13] **Schumann, K., Unger, B., Brandt, A., Fischer, G., Richter, H., Jänchen, J.:** Herstellung und Charakterisierung von kompakten bindemittelfreien Zeolithformkörpern mit Faujasit- und Linde Typ A-Struktur. Chemie Ingenieur Technik **86** (2014) [1–2] 1–7

[14] **Trefzger, C.:** Herstellung zeolithischer Wabenkörper. Dissertation, Institut für Kunststofftechnologie, Universität Stuttgart (2002)

[15] **Formisano, B., Weinert, M., Günther, P., Nieken, U., Bonten, C.:** Extrudierte zeolithische Wabenkörper für zukünftige Sorptionsspeicher. EuroHeat & Power **43** (2014) [7–8] 17–19

[16] **Schmitt, N.:** Extrudierte Wabenkörper für die Wärmespeicherung. Diplomarbeit, Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart (2015)

Eingegangen: 13.05.2016