

Produktgestaltung mit Sekundärrohstoffen aus der Baustoff- und Keramikindustrie

Ulrich Teipel

| | | |
|----|--|-----|
| 1. | Forschungsverbund Forcycle..... | 480 |
| 2. | Produktgestaltung | 481 |
| 3. | Prozesstechnik – Aufbereitungstechnologien | 482 |
| 4. | Zusammenfassung | 488 |
| 5. | Quellen | 488 |

Die Baustoffindustrie ist der Industriezweig, in dem die größten Massenströme verarbeitet werden. Somit stellen die Sekundärbaurohstoffe und vor allem der Bauschutt einen der größten Abfallströme in Deutschland dar. Die zukünftigen Herausforderungen – die Abnahme an natürlichen Ressourcen und die Verknappung von Deponieraum – können mit dem gegenwärtigen Stand der Technik des Bauschuttrecyclings nicht beantwortet werden.

In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich etwa sechzig Millionen Tonnen Bauschutt, bestehend aus Beton-, und Mauerwerksbruch, an. Der Monitoringbericht der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau zeigt, dass etwas siebenzig Prozent recycelt werden [1]. Dies bedeutet, dass 15 bis 20 Millionen Tonnen Bauschutt jährlich deutschlandweit noch nicht recycelt werden; nur knapp fünf Prozent gelangen als hochwertiges Produkt in den Hochbau. Recycling-Baustoffe werden vornehmlich im Straßenbau eingesetzt. Zweitgrößtes Anwendungsfeld ist der Erdbau mit etwa zwölf Millionen Tonnen pro Jahr. Nur ein geringer Teil des aufbereiteten Betonbruchs findet als rezyklierte grobe Gesteinskörnung zurück in den Normalbeton [4-6]. Das Problem des Sekundärrohstoffes Mauerwerksbruch ist seine extreme Heterogenität. Mauerwerksbruch kann neben den Wandbaustoffen Ziegel, Beton und Mörtel auch Fliesen oder Porzellan von Waschbecken und Toiletten enthalten. Diese Heterogenität ist auch bei gewissenhaft durchgeführten und standardisierten Abbruch- und Rückführungsmaßnahmen nicht zu verhindern. Hierzu müssten neue Aufbereitungsprozesse mit integrierten Sortier- und Trennverfahren entwickelt werden. Die Heterogenität der Baustoffe wird mit Zunahme neuer komplexer Materialien in der Bauindustrie

– z.B. neuartige Verbundwerkstoffe – immer größer und stellt eine bedeutsame Aufgabe für die Baustoffrecyclingindustrie dar. Bei der Baustoffaufbereitung durch Zerkleinerung – Brechen und Mahlen – entsteht ein erheblicher Anteil an Feingut, für den noch keine zufrieden stellenden Versorgungswege gefunden wurden.

Es müssen Technologien, innovative Prozesse und logistisch umsetzbare Möglichkeiten gefunden werden, um aus Sekundärrohstoffen der Bauindustrie neue hochwertige Produkte herzustellen und diese am Markt zu platzieren. Aus heterogenen, körnigen mineralischen Rohstoffen werden durch die Anwendung neuer Verfahren hochwertige Produkte mit definierten Eigenschaftsprofilen hergestellt. Die neuen nachhaltigen Strategien müssen so ausgerichtet sein, dass sich ein funktionierender Markt für Recyclingbaustoffe entwickelt, in dem Sekundärbaurohstoffe und Primärrohstoffe gleichwertig und unter gleichen Bedingungen nachgefragt und eingesetzt werden.

1. Forschungsverbund ForCycle

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) hat sich zum Ziel gesetzt, stoffspezifische Technologien für die innovative Nutzung von Sekundärrohstoffen zu verbessern. In enger Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie sollen Technologien und Verfahren entwickelt werden, mit denen die Produktion und der Einsatz von Sekundärrohstoffen verbessert werden können. Dafür hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) die Förderung des Forschungsverbunds *ForCycle* beschlossen und im Januar 2014 auf den Weg gebracht. Der Forschungsverbund soll Recyclingprozesse und Wiederverwertungsstrategien von Funktionsmaterialien – Metalle, mineralische Baustoffe und Kompositmaterialien – entwickeln und optimieren, für diese Funktionsmaterialien Wege in die umweltpolitisch und wirtschaftlich gewünschte Stoffstromkreislaufwirtschaft ermöglichen, einschlägige Wirtschaftsunternehmen in den Forschungsverbund strategisch integrieren, die bayerische Recyclingwirtschaft stärken, eine Ressourcenstrategie für Sekundärrohstoffe entwickeln und Vorschläge zu deren Umsetzung erarbeiten. Das strategische Konzept des *ForCycle*-Verbundes beruht auf einer Rohstoffbetrachtung, die den Wertschöpfungsprozess eines Rohstoffs und seiner Funktionen in den Blick nimmt. Die stoffspezifische Ressourcenstrategie verfolgt, analysiert und bewertet den Lebenszyklus eines Rohstoffs von der Förderung über die Aufbereitung, die Funktionalisierung für die Produktion und die Nutzung bis zur Entsorgung und seine mögliche Rückführung in den Stoffkreislauf. Projekte im Verbund sind: Entwicklung einer Gesamtlösung zur effektiven Rückgewinnung von Buntmetallen aus Industrieabwässern, ressourceneffiziente Faser-Matrix Separation für das Recycling von Carbonfaserstrukturen, niedrig schmelzende Zucker-Harnstoff Gemische zur Extraktion von Metallen und anderen Werkstoffen, neuartige biogene Hybridpolymere aus Cellulose und Chitin, Recycling von Metall-Kunststoffverbunden und Hybridwerkstoffen, Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial, Produktgestaltung mit Sekundärrohstoffen in der Baustoff- und Keramikindustrie, Aufreinigung von Gebrauchs- und Spezialgläsern zur Dissipationslimitierung und Rückgewinnung von Wertmetallen.

2. Produktgestaltung

Die Produktgestaltung hat das Ziel, Produkte mit definiertem Eigenschaftsprofil zu entwickeln und unter ökonomischen und ökologischen Bedingungen am Markt zu platzieren. Die Gestaltung von partikulären Produkten und dispersen Systemen ist ein für das jeweilige Stoffsystem spezifischer Vorgang von hoher Komplexität, der zur Erstellung eines gewünschten Produktprofils eine optimale Kombination der physikalischen, chemischen und ggf. biologischen Eigenschaften erfordert. Eine wesentliche Aufgabe der Produktgestaltung besteht darin, die anwendungsorientierten Anforderungen partikulärer Produkte und disperser Systeme reproduzierbar zu erzeugen und definiert zur Verfügung zu stellen.

Beispiele für Produkteigenschaften sind: Dispergierbarkeit, Farbe, Geschmacksmarkierung, Lagerstabilität, Staubneigung, rheologisches Verhalten, Explosionsneigung, Agglomerationsstruktur oder -neigung, Haftverhalten, Festigkeit, Durchströmungsverhalten und Bauteilporosität.

Viele dieser Produkteigenschaften werden häufig auf Basis empirischer Optimierung verarbeitungs- und anwendungsbezogen bestimmt. Die Produkteigenschaften stehen in engem Zusammenhang mit den physikalischen Eigenschaften des dispersen Systems, den Dispersitätseigenschaften. Der funktionale Zusammenhang zwischen den Produkt- und Dispersitätseigenschaften kann für chemisch identische Produkte durch die Eigenschaftsfunktion

$$\xi_i = f(\kappa_j) \quad (1)$$

beschrieben werden. Diese Gleichung zeigt, dass die Produkteigenschaften ξ_i in hohem Maße von den Dispersitätseigenschaften κ_j abhängig sind.

Für partikuläre Produkte, wie zerkleinerte Sekundärbaustoffe und disperse Systeme wichtige Dispersitätsgrößen sind u.a.: Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung, Morphologie, Polymorphie, Kristallinität, Struktur, Partikelporosität, Schüttdichte, Benetzbarkeit.

Für die Zukunft besteht eine wesentliche Aufgabe und Herausforderung darin, für eine bestimmte Produktgruppe diese Eigenschaftsfunktion ξ_i näher zu beschreiben. Partikel mit definierten Dispersitätseigenschaften können unter Berücksichtigung der Prozessfunktion durch verfahrenstechnische Prozesse wie die Zerkleinerung oder Agglomeration erzeugt werden.

Die Dispersitätseigenschaften partikulärer Produkte stellen über die Eigenschafts- und Prozessfunktion eine Verbindung zwischen dem Aufgabegut, dem jeweiligen Verfahren und den geforderten anwendungsorientierten Produkteigenschaften des Endproduktes dar.

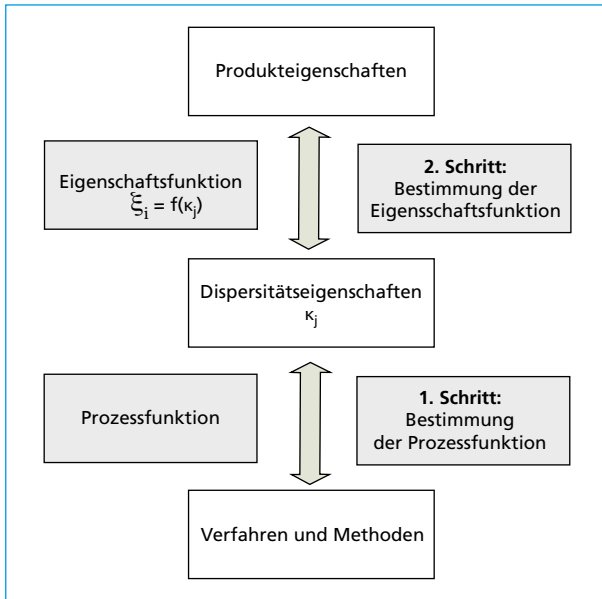


Bild 1:

Produktgestaltung

3. Prozesstechnik – Aufbereitungstechnologien

Baustoffabfälle aus dem Hochbau sind heterogene Gemische mineralischer Baustoffe, wie Beton oder Kalksandstein, Ziegel oder Mörtel, Putz und Dämmstoffe. Um diese Baureststoffe in Produkte zu überführen, müssen in einem ersten Schritt die Stoffe getrennt werden. Da die Baustoffe in ihrem primären Aufgabengebiet in dieser Zu-

sammensetzung ihre Funktion erfüllen müssen, ist nicht davon auszugehen, dass sich ihre Zusammensetzung in nächster Zeit ändert. In vielen Fällen sind Fremdbestandteile und variierende Anteile von z.B. Ziegel in Beton des Sekundärmaterials nachteilig für den Recycling-Prozess und das Endprodukt. Das inhomogene Stoffsystem Baureststoffe tritt sowohl in Form unterschiedlicher Materialien, als auch mit unterschiedlichen Größen und Größenverteilung der Bauschutt-Partikel auf.

Tabelle 1: Bestandteile von Bauschutt

| Baustoffabfälle | | |
|-----------------|---------------|------------|
| Erdreich | Ziegel | Gips |
| Beton | Kalksandstein | Blähton |
| Fliesen | Mörtel | Steinwolle |



Bild 2: Ausgangsmaterial Mauerwerksbruch

Mit der Aufbereitungstechnik sollen Sekundärrohstoffe aus Baustoffabfall (Bild 2) so hergestellt werden, dass ein hochwertiger Recycling-Baustoff mit definiertem Eigenschaftsprofil erzeugt wird. In der Baustoffindustrie dominieren einfache

und robuste Maschinen und Anlagen wie Brecher und grobe Siebe. Hier ist nicht die Produktqualität sondern die Störanfälligkeit der Maschine oder Anlage das wichtigste Kriterium. Oft sind die Aufbereitungstechnologien für Baustoffabfälle an die Technologien für primäre Baustoffe angelehnt. Für die Herstellung höherwertiger Produkte oder Vorprodukte aus sekundären Baurohstoffen müssen neue Prozesse entwickelt oder vorhandene Prozesse modifiziert werden.

Um Recyclingmaterialien mit hinreichender Produktqualität zu produzieren und am Markt zu etablieren, müssen bei der Konzeption der Verfahren die Besonderheiten der Sekundärrohstoffe, wie Inhomogenität, Partikelgrößenverteilung, Fein- oder Grobgutanteil oder Aggregate/Cluster aus verschiedenen Materialien berücksichtigt werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass Recyclingbaustoffe die Anforderungen der Umweltverträglichkeit erfüllen müssen.

Bild 3 zeigt schematisch die erforderlichen Prozessschritte zur Aufbereitung und Produktgestaltung von sekundären mineralischen Baurohstoffen.

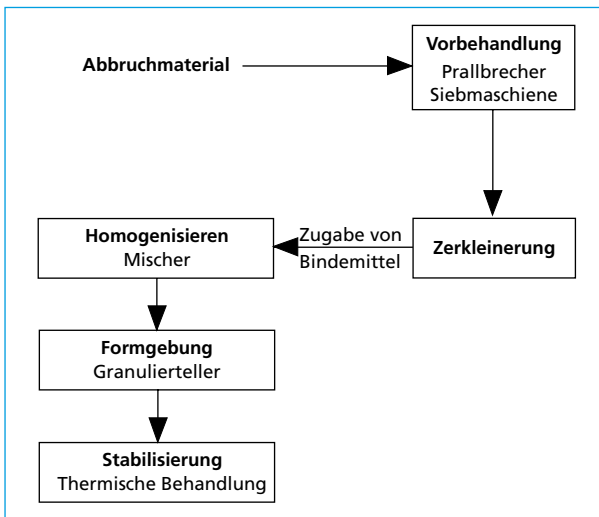


Bild 3:
Aufbereitung von Baustoffabfällen

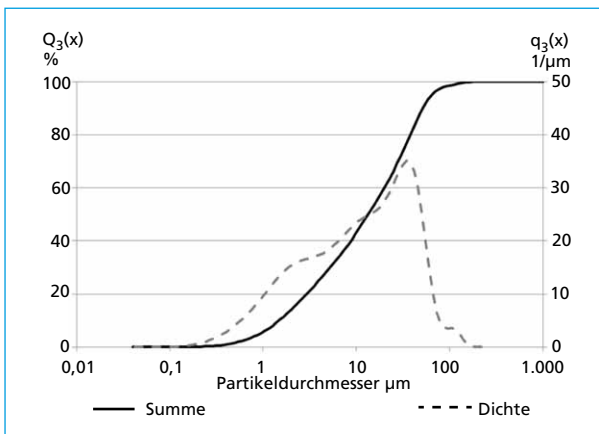


Bild 4:
Volumensummen- und Dichtefunktion

In einem ersten Prozessschritt muss der Bauschutt durch Grobzerkleinerung in einem Brecher – ggf. zweistufig Backen- und Pralldreher – grobe Klassierung des vorzerkleinerten Materials mit einer Siebmaschine und ggf. einer Strömungssortierung – z.B. Windsichtung – des Grobgutes des Siebmaschinenprozesses zur Abtrennung von Leichtstoffen wie Papier, Kunststofffolien, Dämmstoffen, Holz usw. vorbehandelt werden.



Bild 5: Mit einer Kugelmühle zerkleinertes Mauerwerksbruch



Bild 6: Grüngranulate nach dem Agglomerationsprozess mit einem Tellergranulator

Ein wichtiger Prozessschritt ist die Zerkleinerung der Bauschuttfractionen. Aufgrund der unterschiedlichen, heterogenen Baustoffabfälle müssen in Zukunft verschiedenen Zerkleinerungsverfahren und deren Wirksamkeit in Bezug auf die Herstellung homogener Fractionen untersucht werden. Bild 4 zeigt die Volumensummen- und Volumendichtefunktion von in einer Kugelmühle zerkleinertem Mauerwerksbruch. Diese Fraction besitzt eine typische Partikelgröße von $x_{90,3} < 100 \mu\text{m}$, was für die weiteren Schritte der Verarbeitung, insbesondere für die Formgebung, vorteilhaft ist. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung liegt bei $x_{50,3} = 30 \mu\text{m}$ (siehe auch Bild 5). Es ist zur Zeit noch unklar, mit welchem optimalen Energieeintrag und mit welcher Beanspruchungsart – Druck, Schlag oder Prall – diese Sekundärrohstofffractionen nach der Vorzerkleinerung – Brechen – beansprucht werden müssen und welche Zerkleinerungsmaschinen – Prallmühlen, Hammermühlen oder Kugelmühlen o.ä. – den gewünschten Zerkleinerungsgrad liefern. Auch die Prozessparameter, wie die Beanspruchungsdauer, die erzielbare mittlere Partikelgröße, die Partikelgrößenverteilung, die Beanspruchungsintensität, die erforderliche Zerkleinerungsarbeit und die mögliche Energieausnutzung und der Zerkleinerungsgrad sind zur vollständigen Beschreibung des Prozessschritts Zerkleinerung zu ermitteln.

Dem Stoffstrom, der als innovativer Baustoff aufbereitet wird, wird vor der Homogenisierung in einem Mischer Blähmittel zugegeben. Anschließend wird dieses Gemisch in einer Granulieranlage, z.B. einem Tellergranulator oder einem Hochenergiemischer,

zu Agglomeraten unterschiedlicher Größe verarbeitet. Durch die mögliche Variation der Größe und der Festigkeit der Grünkörper können diese für unterschiedliche Einsatzgebiete gefertigt werden [2, 3, 7]. Auch die Möglichkeit der gezielten Einstellung der Dichte und der Porosität dieser Agglomerate eröffnet zusätzliche Einsatzmöglichkeiten für neue Produkte im Bauwesen und anderen Industriezweigen. Bild 6 zeigt Grüngranulate die durch Aufbauagglomeration in einem Tellergranulator (Bild 7) hergestellt wurden.



Bild 7: Tellergranulator

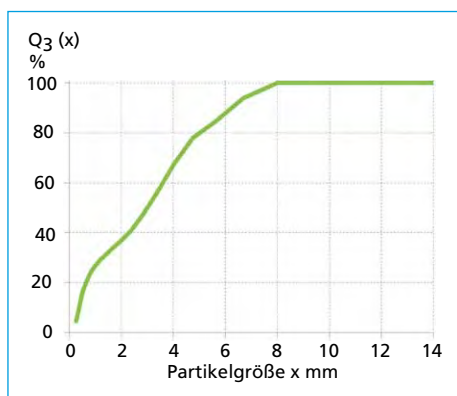


Bild 8: Partikelgrößenverteilung der Agglomerate

des Mauerwerksbruchs bewirkt tendenziell eine höhere Agglomeratgröße, wie die Ergebnisse mit 10,6 Prozent und 24,4 Prozent Feuchtigkeit zeigen.

Für den Agglomerationsvorgang sind die interpartikulären Wechselwirkungen und das Benetzungsverhalten von Mauerwerksbruch von besonderer Bedeutung. Bei der Aufbauagglomeration von Mauerwerksbruch wird als Bindemittel Wasser eingesetzt. Im Folgenden soll kurz auf die Benetzungseigenschaften von mineralischen

Für den Einsatz in der Bauindustrie sollen die Produkte, wenn sie z.B. als Leichtzuschlagsstoffe oder als Schüttung zur Wärme-/Schalldämmung eingesetzt werden sollen, folgende Spezifikationen besitzen: Die Agglomeratgröße soll nach Möglichkeit 8 mm nicht überschreiten ($x < 8 \text{ mm}$), die Schüttdichte soll zwischen $300 \text{ kg/m}^3 < \rho_{\text{Schütt}} < 800 \text{ kg/m}^3$ betragen, wobei $\rho_{\text{Schütt}} < 350 \text{ kg/m}^3$ angestrebt wird. Im Endprodukt liegt die minimale Kornfestigkeit idealerweise bei $\sigma > 2 \text{ N/mm}^2$, mindestens jedoch bei 1 N/mm^2 . Betonschädliche Salze, Schwermetalle und eine Brennbarkeit des Materials sind zu vermeiden. In Bild 8 ist die Volumensummenverteilung des Produktes nach der Aufbauagglomeration dargestellt. Es zeigt sich, dass 100 Prozent aller an der Fraktion beteiligten Agglomerate kleiner oder gleich 8 mm sind, so dass u.a. die Bedingung der Agglomeratgröße erfüllt werden konnte.

Beispielhaft ist in Bild 9 der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Agglomeration von Mauerwerksbruch dargestellt. Der Feuchtigkeitsanteil φ wurde auf die Trockenmasse, die nach einer Trocknung von 24 Stunden bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht wurde, bezogen. Ein höherer Feuchtigkeitsgehalt

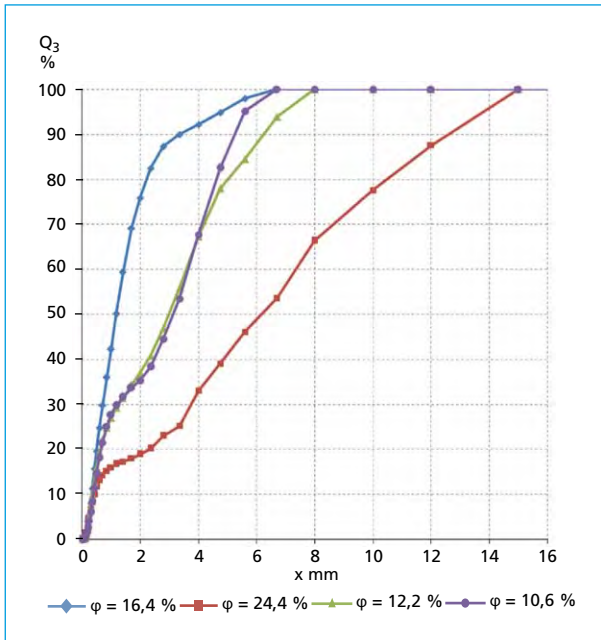


Bild 9:

Volumensummenverteilung Mauerwerksbruch in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes φ

Sekundärrohstoffen am Beispiel Mauerwerksbruch eingegangen werden. Hierzu werden im ersten Schritt die Grenzflächenspannungen detektiert, die im Dreiphasensystem Wasser, Mauerwerksbruch und Umgebungsluft auftreten. Aus diesen Grenzflächenspannungen resultiert ein spezifischer Kontaktwinkel zwischen der Partikeloberfläche des Mauerwerksbruchs und der Flüssigkeit (Wasser). Dieses Phänomen kann mit der Durchströmung einer Schüttung aus Mauerwerksbruchpartikeln in der Kombination mit der Sorptionsmethode und der modifizierten Washburn-Gleichung untersucht werden [8].

$$m_F^2 = \frac{\rho_F^2 \cdot A^2 \cdot (c \cdot \bar{r}) \cdot \gamma_{F,G} \cdot \cos \delta}{2 \cdot \eta_F} \cdot t \quad (2)$$

Hierin sind m_F die Masse der adsorbierten Flüssigkeit, δ der Randwinkel, $\gamma_{F,G}$ die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Partikeloberfläche, c der Orientierungsfaktor der Partikelschüttung, r der mittlere Radius, A die Grenzfläche des freien Volumens und η_F die Viskosität des Wassers. Bild 10 zeigt das Sorptionsverhalten von Mauerwerksbruchpartikeln und Wasser. Hieraus ergibt sich, bei den Bedingungen, ein Randwinkel von $\delta = 79,6^\circ$. Diese kann durch Zugabe von Zusatzstoffen oder Hilfsstoffe verringert werden, was zu deutlich verbesserten Agglomerationsbedingungen führen würden.

In dem letzten Prozessschritt werden die Grünkörper (Granulate) durch thermische Behandlung (Sinterung) oder hydrothermale Behandlung oder ggf. den Einsatz von Bindemitteln stabilisiert.

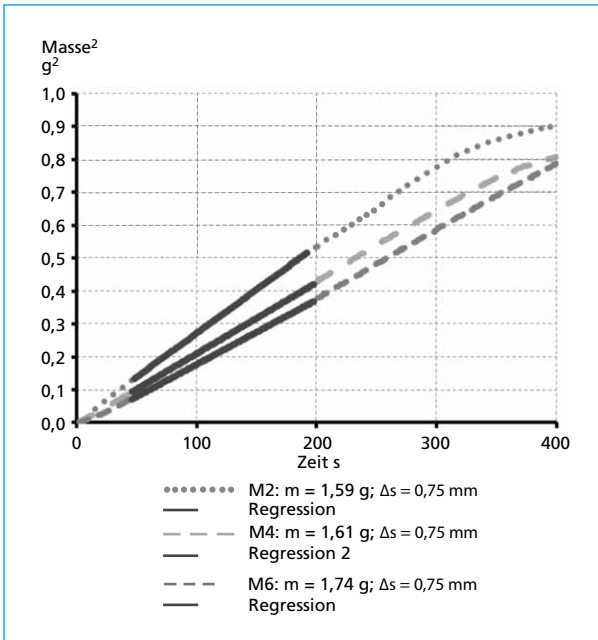


Bild 10:

Benetzungsverhalten Mauerwerksbruch und Wasser

Unter Anwendung dieser Prozesskette sollen aus sekundären Baurohstoffen neue Produkte mit besonderen definierten Eigenschaftsprofilen erzeugen werden. Die Anwendungsgebiete der Produkte aus recyceltem Baumaterial sind vielfältig.

Zum Beispiel können Zuschlagsstoffe für Leichtbeton, Materialien zur Wärmedämmung oder zum Schallschutz und Baumaterialien, bei denen eine poröse Struktur erforderlich ist, hergestellt werden. Im Bereich der Agrarindustrie können die neuen Produkte mit porösen Strukturen als Hydrokultursubstrate, Dachbegrünungssubstrate, Beimischungen zu Pflanzsubstraten oder Trägermaterial für Düngemittel, Pflanzenschutzmittel oder Mikroorganismen Einsatz finden. Zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in diesem Industriebereich ist eine Erhöhung der Recyclingquote für Bauschutt ein wichtiges anzustrebendes Ziel.



Bild 11: Produkte aus Sekundärbaurohstoffen

4. Zusammenfassung

Baustoffabfälle stellen den größten Abfallstrom in der Bundesrepublik Deutschland dar. Zurzeit werden etwa sieben Prozent der sekundären Baustoffe verwertet, wobei der Straßen- und Tiefbau dominiert und nur fünf Prozent der recycelten Stoffe in den Hochbau gelangen. Insbesondere für Baustoffabfälle aus Mauerwerks- und Betonbruch stehen zurzeit noch keine technologischen Lösungen zur Verfügung, um hochwertige Produkte aus Sekundärrohstoffen am Markt zu platzieren. Hierzu besteht noch deutlicher Forschungsbedarf, um Technologien und Prozesse zu entwickeln, so dass aus Sekundärbaurohstoffen neue Produkte mit besonderen definierten Eigenschaftsprofilen entstehen.

5. Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, Mineralische Baustoffabfälle Monitoring 2008, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle, Berlin 2011
- [2] Hennig, M.; Schindhelm, S.; Teipel, U.: Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Entwicklung von Agglomerationsverfahren für partikuläre Rohstoffe. In: Teipel, U.; Schmidt, R. (Hrsg.): Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2011, Band 2, 303 - 316
- [3] Hennig, M.; Teipel, U.: Aufbereitung von sekundären mineralischen Baustoffen. Schüttgut 20 (2014) 1, 54 - 58
- [4] Müller, A.: Baustoffrecycling. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 11-12/2011, S. 224-230
- [5] Schnell, A.; Müller, A.: Entwicklung von Technologien zur Herstellung von Leichtgranulaten aus Heterogenen Bau- und Abbruchabfällen. In: Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen U. Teipel (Ed.) Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2010, 235 - 247
- [6] Schnell, A.; Müller, A.; Ludwig, H.-M. : Heterogener Mauerwerksbruch als Rohstoffbasis zur Herstellung von leichten Gesteinkörnungen. Tagungsband 18. Int. Baustofftagung Weimar, 2012, Band 2, 1098 - 1106
- [7] Schindhelm, S.; Schnell, A.; Hennig, M.; Schwieger, B.; Müller, A.; Teipel, U.: Aufbereitung von sekundären Baurohstoffen durch Agglomeration. Chemie Ingenieur Technik 84 (2012) 10, 1798 - 1805
- [8] Teipel, U.; Mikonsaari, I.: Determining Contact Angles of Powders by Liquid Penetration, Part. Part. Syst. Charact. 21 (2004) 255 - 260