
**KARBONISATHALTIGE GRANULATE UND DEREN
HERSTELLUNGSVERFAHREN SOWIE VERWENDUNG**

GEBIET DER ERFINDUNG

Die Erfindung betrifft Granulate für die Verwendung als Baustoffe oder als Zuschlag in Baustoffen. Ferner betrifft die Erfindung Herstellungsverfahren für die Granulate sowie deren Verwendung.

STAND DER TECHNIK

Die Baubranche ist eine Industriebranche mit einem hohen CO₂-Ausstoß. Beispielsweise gehört die Zementindustrie zu den Hauptemittenten von Treibhausgasen, die die globale Erwärmung bewirken. Weltweit werden jährlich 4,1 Milliarden Tonnen Zement hergestellt, der im Mittel etwa 60 % CaO enthält. Damit ergibt sich durch das Freisetzen des im Kalk gebundenen Kohlendioxids, selbst bei optimaler Prozessführung, ein Ausstoß von mindestens drei Milliarden Tonnen CO₂ oder etwa 6 bis 8 % des jährlichen CO₂-Ausstoßes. Beispielsweise wird durch Herstellung und Einsatz von 1 kg Portlandzement etwa 0,7 kg CO₂ freigesetzt. Um die Klimaziele zu erreichen und zukünftig Kosten hinsichtlich der CO₂-Bepreisung zu reduzieren, soll der CO₂-Ausstoß der Baubranche gesenkt werden. Ein Aspekt davon ist die Suche nach alternativen Rohstoffen und Substitutionsmöglichkeiten für besonders CO₂-intensive Baustoffe.

Eine an sich bekannte Möglichkeit ist die Verwertung von Karbonisaten in Bauprodukten, wodurch CO₂ in Form von Kohlen-

stoff gebunden werden und somit der Baustoff als Kohlenstoff-Senke funktionieren kann. Die Verwertung von Karbonisaten in Baustoffen ist allerdings auf Grund der stofflich heterogenen Zusammensetzung und der daraus folgenden unregelmäßigen Eigenschaften nur eingeschränkt möglich. Karbonisate aus unterschiedlichen Quellen bzw. aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren bringen zudem auch unterschiedliche Eigenschaften mit sich, weshalb Baustoffformulierungen immer wieder daran angepasst werden müssen. Eine großtechnische industrielle Verwendung ist aktuell entsprechend eingeschränkt, da die Anpassung bzw. Modifikation der Reststoffe (z.B. chemische Aufbereitung, Konditionierung, Aktivierung) oftmals aufwändig und unwirtschaftlich ist. Es sollen aber Lösungen gefunden werden, um Karbonisate ohne Nachteile in Baustoffe einbringen zu können, um die Klimaeffekte der Bauwirtschaft einzudämmen und gleichzeitig die Kosten durch die zu erwartende steigende CO₂-Bepreisung zu begrenzen.

Es fehlt somit an effizienten kostengünstigen Homogenisierungs- bzw. Modifikationsverfahren, um die Karbonisate in deren Eigenschaften anzugleichen bzw. deren Anbindung zur Baustoffmatrix zu optimieren und dieses Zwischenprodukt dann in unterschiedlichen Baustoffen einzusetzen.

In der US 2020/0062646 A1 sind Baustoffe offenbart, in denen Zement, Sand und Pflanzenkohle („biochar“) vermischt werden und nach Zugabe von Wasser ausgehärtet werden. Alternativ wird pulverisierte Pflanzenkohle mit Putz oder Gips („plaster“) vermengt und zu beschichteten oder homogenen Pellets verarbeitet, die als Füller für Trockenbauwände verwendet werden können. Nachteilig daran ist, dass mit den offenbarten Verfahren nur sehr geringe Mengen an Pflanzenkohle aufgenommen werden konnten (ca. 6 g pro 0,1 m² Wandpaneel). Alternativ konnten bei der Mörtelherstellung knapp 1,5 Gew.-% Pflanzenkohle in der Trockenmasse erzielt werden, indem ein geringer Teil Sand durch Pflanzenkohle ersetzt wurde. Die eingesetzte Pflanzenkohle musste hier jedoch nach der Pyrolyse zunächst noch aufgemahlen werden, was einen

energetisch aufwändigen Zusatzschritt bedeutet, in welchem zusätzliche Energie verbraucht wird und damit auch eine weitere Freisetzung von CO₂ einhergeht. Die hohe spezifische Oberfläche der Pflanzenkohle wird durch die Mahlung noch weiter erhöht, wodurch diese mehr Feuchtigkeit adsorbieren kann. Dies hat einen starken Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der Mörtelmischung, weshalb zur Kompensation Fließmittel in die Mörtelmischung geben werden mussten. Zudem ist der genaue Wasseranspruch der in der US 2020/0062646 A1 beschriebenen Granulate je nach Herkunft der Karbonisate zunächst unbekannt und bedarf der Abstimmung mit dem Wassergehalt in einer Mörtelmischung.

Der Stand der Technik stellt sich daher als Problem dar.

KURZBESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Nachfolgend wird ein Granulat Korn gemäß Anspruch 1, ein Verfahren nach Anspruch 11 und eine Verwendung nach Anspruch 14 beschrieben. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung finden sich in den Unteransprüchen.

In einer Ausführungsform kann die Erfindung Granulatkörner bereitstellen, die Bindemittel und Karbonisat umfassen, und wobei der Karbonisatgehalt in den Granulatkörnern 20 Gew.-% oder mehr beträgt, bezogen auf das Gesamtgewicht des Bindemittels und des Karbonisats im Granulat Korn. Es hat sich herausgestellt, dass durch die Vermengung von Bindemittel und Karbonisat in Granulatform leicht homogene Granulatzusammensetzungen bereitgestellt werden können, die für den weiteren Einsatz im Bau geeignet sind.

In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist das Bindemittel im Granulat Korn ausgewählt aus der Gruppe Klinkerzement, Portlandzement, Calciumaluminatzement, Calcium-Sulfo-Aluminat-Zement, Calciumsulfat (Gips), Calciumoxid, Calciumhydroxid, Aschen, Flugasche, Schlacken, Hütten sand, Alkalimetall- oder Erdalkalimetallhydride, -halogenide,

-oxide, -nitrate, -sulfate, -carbonate, -silikate, -phosphate, -fluoride oder deren organische Derivate wie Alkoholate oder Acetaten, Aluminiumphosphatverbindungen, Alumosilikate, Tone, calcinierte Tonerden, Kaolin, Puzzolane, Trass, Tuff, organische Polymere oder Kombinationen davon. Erfindungsgemäß sind diese Bindemittel allesamt geeignet, um mit Karbonisat zu Granulaten verarbeitet zu werden, die dann im Bau eingesetzt zu werden.

In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist das Karbonisat ausgewählt aus der Gruppe Pflanzenkohle, Holzkohle, pyrolysierter Klärschlamm, pyrolysiertes Papier und/oder pyrolysierte Kartonage, pyrolysierte Gärreste, Industrieruße und Kombinationen davon. Erfindungsgemäß sind Karbonisate aus den genannten Quellen bzw. Herstellungsverfahren durchgehend einsetzbar um Granulate mit Bindemitteln zu bilden, die dann im Bau eingesetzt werden können.

In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann der Karbonisatgehalt im Granulatkorn 30 Gew.-% oder mehr betragen, oder 40 Gew.-% oder mehr, oder 50 Gew.-% oder mehr, oder 60 Gew.-% oder mehr, oder 65 Gew.-% oder mehr, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Bindemittels und des Karbonisats im Granulatkorn. Erfindungsgemäß kann je nach Einsatzgebiet homogenes Granulat hergestellt werden mit entsprechend hohen Karbonisatgehalten.

In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung hat das Granulatkorn eine Korngröße im Bereich von etwa 0,1 mm bis etwa 32 mm oder von etwa 0,2 mm bis etwa 2 mm oder von etwa 1,5 mm bis etwa 5 mm oder von etwa 5 mm bis etwa 10 mm oder von etwa 8 mm bis etwa 20 mm oder von etwa 20 mm bis etwa 32 mm oder von etwa 0,1 mm bis etwa 1,5 mm oder von etwa 20 mm bis etwa 25 mm oder von etwa 25 mm bis etwa 32 mm. Für ein Granulat aus einer Vielzahl erfindungsgemäßer Granulatkörner soll damit eine mittlere Korngröße im Bereich von 0,1 mm bis 32 mm sichergestellt sein. Entsprechende Körnungen sind für den Einsatz am Bau am besten geeignet.

In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist das Granulatkorn homogen. Mas spricht in diesem Kontext von einem homogenen Granulatkorn, wenn sich innerhalb des Granulatkorns Bindemittel und Karbonisat gleichmäßig verteilen. In dem Sinne liegt eine gleichmäßige Verteilung vor, wenn die Karbonisatkörner innerhalb einer Bindemittelmatrix im Granulatkorn so verteilt sind, dass keine Regionen mit gegenüber einem Durchschnittsgehalt wesentlich abweichenden Karbonisatgehalten bestehen.

In einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann ein Granulatkorn geschichtet sein. In dieser Hinsicht wird von einer geschichteten Struktur gesprochen, wenn beispielsweise der Kern des Granulatkorns ausschließlich aus Bindemittel oder ausschließlich aus Karbonisat besteht und der Kern von einer Schicht des jeweils anderen Bestandteils bedeckt ist. Auch mehrere Schichtabfolgen werden als geschichtete Struktur angesehen. Insbesondere kann es je nach Einsatzgebiet der Granulatkörner wünschenswert sein, dass sich an der Oberfläche der Granulatkörner eine Bindemittelschicht befindet.

In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung besteht das Granulatkorn im Wesentlichen aus Karbonisat und Bindemittel. Dies ist der Fall, wenn mit Ausnahme von Wasser kein weiterer Bestandteil in einer Menge von 5 Gew.-% oder mehr im Granulatkorn vorhanden ist.

In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung hat das Granulatkorn einen Glühverlust, gemessen nach DIN 18128, von 15% oder mehr. In anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung hat das Granulatkorn einen Glühverlust, gemessen nach DIN 18128, von mehr als 20% oder mehr als 30% oder mehr als 50% oder mehr als 60% oder mehr als 70%. Insbesondere kann dadurch nachgewiesen werden, dass oxydierbarer Kohlenstoff in Form von Karbonisat im erfindungsgemäßen Granulat vorhanden ist und entsprechend der Nachweis für das Binden von CO₂ gebracht werden.

Auch Teil der vorliegenden Erfindung ist ein Herstellungsverfahren für ein Granulat, das Granulatkörner der vorliegenden Erfindung umfasst, wobei das Herstellungsverfahren Verfahrensschritte aufweist, ausgewählt aus Feuchtgranulieren, Sprühtrocknung, Wirbelschichtgranulieren, Schmelzgranulieren oder Kombinationen davon. Es hat sich gezeigt, dass erfindungsgemäße Granulatkörner mit einer Vielzahl von Herstellungsverfahren erhalten werden können.

In einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens erfolgt in einem ersten Schritt eine Karbonatisierung von Biomasse, Pflanzenmaterial, Holz, Klärschlamm, Papier, Kartonage, Gärresten oder Kombinationen davon. Diesem Schritt folgt ein Zusetzen eines Bindemittels mit direkt nachgeschaltetem Granulieren.

In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens erfolgt nach oder während der Karbonatisierung eine Zermahlung und wahlweise eine Siebung des Karbonisats, so dass das Karbonisat eine Korngrößenverteilung hat, so dass $d_{80} \leq 500 \text{ } \mu\text{m}$, oder $d_{80} \leq 100 \text{ } \mu\text{m}$.

Weiterhin ist Teil der vorliegenden Erfindung die Verwendung eines die erfindungsgemäßen Granulatkörner enthaltenden Granulats oder eines Granulats, hergestellt nach dem erfindungsgemäßen Verfahren als Zuschlagsstoff für Baustoffe, Schüttdämmung, Zuschlagstoff in Trockenmörtelprodukten, Akustikbauteile, Zuschlag für akustische Absorber, Zugabe in Crashbeton, Farbstoff, Zuschlagstoff zur Verbesserung der Fließeigenschaften in fließfähigen Baustoffen, Zuschlagstoff für Asphalt, Füller, Pflanzensubstrat, Zuschlag für Hinterbeton, Fugenschüttung, Palisaden, Bettungsmaterial, Baumscheiben, Granulate für den Deich- oder Dammbau, Begrünung für Dächer und Fassaden, Katalysatoren oder Trägermaterial für Katalysatoren, Filter-/Sorption, Filtermaterial für Abgase oder flüssige Abfallströme, Trocknungsmittel, Absorber für Verunreinigungen oder Verschmutzungen oder Kombinationen davon. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die erfindungs-

gemäßen Granulate breit einsetzbar sind und für die genannten Anwendungen geeignet.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

Nachfolgend soll die Erfindung anhand von Figuren ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens näher erläutert werden. Dabei zeigt

Fig. 1 eine Auswahl von Komposit-Granulaten mit unterschiedlichen Korngrößen, erhalten nach dem Ausführungsbeispiel.

Fig. 2 zeigt ein Mikro-CT Bild von Granulaten vor und nach 7 Tage Wasserlagerung;

Fig. 3 zeigt eine grafische Darstellung der Druckfestigkeiten nach 28 Tagen der Mörtelformulierungen aus den nachfolgenden Beispielen;

Fig. 4 zeigt eine grafische Darstellung der Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen der Mörtelformulierungen aus den nachfolgenden Beispielen.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung wird nun mit Bezug auf beispielhafte Ausführungsformen davon und die Figur in Einzelheiten beschrieben.

Die vorliegende Erfindung schlägt eine neue Lösung zur Homogenisierung und Einstellung von Karbonisaten vor, sodass diese im größeren Umfang in Baustoffen genutzt werden können. Ziel ist es, ausgehend von heterogenen Ausgangsstoffen, mittels Granulierung die Bereitstellung eines homogenen Produkts zur Verwertung in Form von CO₂-negativen Komposit-Granulaten zu erreichen.

Dieses Ziel wird erreicht durch die Kombination von bevorzugt mineralischen Werkstoffen (wie z.B. Zement, Branntkalk, Hüttensanden, Flugasche, Kalkstein, Kaolin, Tonerde, usw.) mit einem oder mehreren Karbonisaten. Dadurch kann ein homogenes Produkt erzeugt werden, dessen Interaktionshülle auf die entsprechende Baustoffmatrix angepasst werden kann. Die Kombination erfolgt mittels Granulierung. Die Granulate dagegen haben eine geringere Oberfläche als reine Kohlepartikel und damit einen weniger hohen Wasseranspruch. Ihr Einsatz in Mörtel führt im Vergleich zu reiner Pyrokohle zu einer weniger starken Reduzierung der Fließeigenschaften im frischen Zustand und bedarf somit deutlich weniger Anpassungen.

Die erfindungsgemäßen Granulate können grundsätzlich als Sandersatz in Mörtel oder Beton dienen. Dabei ist es möglich, natürliche Gesteinskörnungen durch sphärisch geformte und formstabile Granulate zu ersetzen, welche aus Zementstein und Kohle bestehen und einstellbare Korngrößen mit Durchmessern im Bereich von > 0 bis 32 mm aufweisen. Dadurch lassen sich Bauteile mit nahezu identischer Festigkeit herstellen wie in Referenzen ohne Substitution von natürlichem Sand.

In unterschiedlichen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann das Granulat hierbei gleichmäßig aufgebaut sein oder verschiedene Schichtenabfolgen beinhalten. Dabei lassen sich durch gezieltes Coating noch während des Granulierungsprozesses verschiedenste Oberflächeneigenschaften auf den Granulaten einstellen (z.B. Hydrophobie, Hydrophilie, Rauigkeit, spez. Oberfläche, usw.), die in unterschiedlicher Weise mit einer Bindemittelmatrix interagieren können, um die Eigenschaften im gesamten Bauteil zu definieren. Diese Eigenschaften lassen sich bei der Granulierung individuell einstellen und auf die jeweilige Anwendung anpassen oder optimieren. Je nach Anwendung kann der Karbonisatgehalt des erfindungsgemäßen Granulats auf 70 Gew. % oder mehr eingestellt werden

In einigen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sind die erhaltenen Granulate in ihrer materialtechnischen CO₂-Bilanz emissionsfrei oder sogar CO₂-negativ, und haben somit einen negativen Emissionseffekt auf einen Werkstoff, in welchen das erfindungsgemäße Granulat eingebracht wird.

Die erfindungsgemäßen Granulate ermöglichen es, Karbonisate unabhängig von ihrer Herkunft uneingeschränkt für den Einsatz in Baustoffsystemen aufzubereiten. Als Karbonisate können eingesetzt werden alle bekannten Variationen, insbesondere Pflanzkohle, Holzkohle, pyrolysiertes Klärschlamm, pyrolysiertes Papier und Kartonage, pyrolysierte Gärreste, Industrieeisenröste und Kombinationen davon.

Die erfindungsgemäßen Granulate ermöglichen es, dass durch den Kohlenstoffanteil des Karbonisats, welches beispielsweise aus Biomasse durch Pyrolyse erhalten wird, der CO₂-Ausstoß der beigemengten Komponenten (z.B. mineralische Bindemittel wie Portlandzement) kompensiert wird. Beispielsweise wird durch Herstellung und Einsatz von 1 kg Portlandzement etwa 0,7 kg CO₂ freigesetzt. Andererseits bindet die Herstellung von 1 kg Karbonisat mit bis zu 99% Kohlenstoff etwa 3,67 kg CO₂. Somit können rechnerisch 191 g Karbonisat die CO₂-Emissionen von einem Kilogramm Portlandzement kompensieren.

Die Bindung von CO₂ im erfindungsgemäßen Granulat wird auch durch einen Glühverlust, gemessen nach DIN 18128, im Bereich von 15% oder höher nachgewiesen.

Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass die erfindungsgemäßen Granulate im Gegensatz zu pulverisierten Karbonisaten bei Transport, Lagerung und Umgang keinen Kohlestaub von sich geben, so dass die Nachteile bezüglich Gesundheit am Arbeitsplatz oder Explosionsgefahr aufgewogen werden. Somit sind die erfindungsgemäßen Granulate auch als Siloware lagerbar, und können bei Abfüllung, Verpackung und Einsatz leichter gefördert und dosiert werden.

Ein weiterer Vorteil des Granulats ist dessen feuchte-regulierende Eigenschaft durch eine reversible Wasser- bzw.

Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe. Die Kapazität ist über Auswahl der Materialien/Rohstoffe, insbesondere der Karbonisate sowie die Prozessparameter und damit Größe, Dichte und Porosität einstellbar.

Die erzielte Formstabilität der erfindungsgemäßen Granulate ist eine Grundvoraussetzung für die weitere Verwendung in verschiedenen Baustoffen. Aufgrund der Wasseraufnahmefähigkeit von Biokohle könnte es auch zu Volumenzunahmen kommen. Eine Quellung von einzelnen Bestandteilen in Baustoffen ist meistens mit Schwierigkeiten verbunden, so dass ein mögliches Quellverhalten der Granulate eine entscheidende Rolle spielt und dem entsprechend unterbunden werden muss. Durch das erfindungsgemäße Granulat wird eine Quellung im Gegensatz zu freier Kohle so weit unterbunden, dass diese den Normen entsprechend in Baustoffen eingesetzt werden können.

Mögliche Methoden für die Homogenisierung sind Feuchtgranulieren, Sprühtrocknung, alternativ das Wirbelschicht- bzw. Schmelzgranulieren.

Bei der bevorzugten Feuchtgranulation wird eine Flüssigkeit, in der Regel Wasser, der Pulvermischung diskontinuierlich oder kontinuierlich im laufenden Mischprozess zugeführt. Bei Verwendung eines Binders kann dieser als Feststoff oder Flüssigkeit hinzugegeben werden.

Das Wirbelschichtverfahren wird ähnlich gehandhabt wie die Feuchtgranulation.

Beim Schmelzgranulieren wird der Binder durch erhöhte Temperatur während der Granulierung verflüssigt, bevor das erhaltene Granulat bei Umgebungstemperatur wieder erhärtet.

Es wurde festgestellt, dass durch die beschriebenen unterschiedlichen Verfahren Karbonisate unabhängig von deren Herkunft und Herstellungsmethode uneingeschränkt für den Einsatz in Baustoffsystemen geeignet sind. Es zeigt sich auch, dass die Menge an eingesetzten Karbonisaten in Baustoffen dadurch nicht mehr auf Grund der stofflichen

Eigenschaften beschränkt sind und somit ein höherer Füllgrad erzielt und der klimapositive Effekt maximiert werden kann.

Die erfindungsgemäßen Granulatkörner können in einer breiten Anwendungspalette zum Einsatz kommen. Dazu gehören bautechnische Anwendungen, der Garten- und Landschaftsbau sowie der Einsatz als funktionale Trägerpartikel.

Im bautechnischen Bereich können die erfindungsgemäßen Granulate eingesetzt werden als Zuschlagsstoff für Baustoffe, Schüttdämmung, Zuschlagstoff in Trockenmörtelprodukten, Akustikbauteile, Zuschlag für akustische Absorber, Zugabe in Crashbeton, Farbstoff, Zuschlagstoff zur Verbesserung der Fließeigenschaften in fließfähigen Baustoffen, Zuschlagstoff für Asphalt, oder als Füller.

Im Garten- und Landschaftsbau können die erfindungsgemäßen Granulate eingesetzt werden als Pflanzensubstrat, Zuschlag für Hinterbeton, Fugenschüttung, Palisaden, Bettungsmaterial, Baumscheiben, Granulate für den Deich- oder Dammbau, oder in der Begrünung für Dächer und Fassaden.

Der Einsatz der erfindungsgemäßen Granulate als Träger ist vorstellbar als Katalysatoren oder Trägermaterial für Katalysatoren, in Filter-/Sorptionsanlagen, als Filtermaterial für Abgase oder flüssige Abfallströme, als Trocknungsmittel, oder als Absorber für Verunreinigungen oder Verschmutzungen.

Außerdem Teil der vorliegenden Neuerung sind etwaige Kombinationen hier beschriebener Merkmale und/oder Abgrenzungen, insofern sie sich nicht gegenseitig ausschließen. Die Beschreibung der Neuerung betrifft bestimmte Ausführungsformen der Neuerung mit dem Ziel, diese zu veranschaulichen. Der zuständige Fachmann wird erkennen, dass weitere Modifikationen und Äquivalente der hier beschriebenen Ausführungsformen möglich sind. Solche Modifikationen und Äquivalente stellen auch einen Teil des Gesamtumfangs der beschriebenen Neuerung dar.

BEISPIEL 1

Ein Portlandzement-gebundenes Granulat aus einem Karbonisat (Holzkohle mit einem Kohlenstoffanteil von 90 -92 Gew.-%) wurde wie folgt hergestellt: 1 kg Portlandzement (42,5 N) wurde mit 2 kg Holzkohle in einem Mischer unter Zugabe von 1,65 kg Wasser feucht granuliert. In Abhängigkeit von Zeit und Geschwindigkeit wurde Granulate mit unterschiedlichen Körnungen erhalten, wie in Fig. 1 dargestellt.

Unabhängig von der Korngröße der Granulate berechnet sich die stoffliche CO₂-Bilanz wie folgt. 1 kg Zement (OPC) emittiert ca. 0,7 kg CO₂ und 2 kg Kohle (Karbonisat besteht zu ca. 91% aus Kohlenstoff) bindet ca. 6,68 kg CO₂ - In der Bilanz werden mit dieser Rezeptur bezogen auf Binder und Kohle 5,98 kg CO₂ in Form von Kohlenstoff gebunden. Entsprechend werden ca. 1,99 kg CO₂ pro kg Granulat gebunden. Bei dieser Berechnung wurde das hinzugegebene Wasser nicht in die Massenbilanz mit einbezogen.

Bei einer 7-tägigen Lagerung der erhaltenen Granulate in Wasser hat sich gezeigt, dass die Größe der Granulate stabil bleibt. Dies wird illustriert durch Fig. 2. Die Abweichungen im Differenzbild (Mitte) sind auf Feinpartikel zurückzuführen, die sich während der Lagerung bewegt haben.

BEISPIEL 2

Beispiel 2 betrifft die Herstellung von Mörtelformulierungen mit dem erfindungsgemäßen Granulat. Eine Standard-Mörtelrezeptur wurde angewendet, um den Einfluss eines teilweisen Ersetzens von Sand durch Biokohle oder die erfindungsgemäßen Granulate zu prüfen. Die Standard-Mörtelrezeptur (Referenzbeispiel RB1) bestand aus 450 g Zement, 1350 g Sand und 225 g Wasser. In den Vergleichsbeispielen VB1 und VB2 und den Erfindungsbeispielen EB1 und EB2 wurden jeweils 5 und 10 Gew. % Sand durch identische Massen Kohle bzw. erfindungsgemäßes Granulat ersetzt. In Tabelle 1 sind die Mörtelzusammensetzungen der Referenz sowie der Vergleichsbeispiele und Erfindungsbeispiele zusammengefasst (ohne Wasser).

Tabelle 1:

	RB	VB1	VB2	EB1	EB2
Zement (CEM 1 42,5)	450 g	450 g	450 g	450 g	450 g
Sand	1350 g	1282 g	1215 g	1282 g	1215 g
Kohle (L7307)	0	68 g	135 g	0	0
Granulat (Beispiel 1)	0	0	0	68 g	135 g

Die hergestellten Rezepturen wurden in Mörtelprismen verwendet und 28 Tage nach deren Herstellung auf ihre Druckfestigkeit (DF) bzw. Biegezugfestigkeit (BZF) gemäß DIN EN 196-1 geprüft. Zudem wurden die CO₂-Bilanzen der Rezepturen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Fig. 3 und 4 dargestellt. Für die Berechnung der CO₂-Bilanz wurden als Basis Werte von +0,7 kg CO₂ pro kg Zement, 3,34 kg CO₂ pro kg Kohle und -1,99 kg CO₂ pro kg Granulat angenommen. Sand wird als CO₂-neutral angenommen.

Tabelle 2:

	RB	VB1	VB2	EB1	EB2
CO ₂ -Bilanz	0,315 kg	-0,09 kg	- 0,135 kg	0,18 kg	0,046 kg
Volumen	1,242 L	1,581 L	1,830 L	1,384 L	1,475 L
CO ₂ -Bilanz pro m ³	253,6 kg	56,9 kg	-73,8 kg	130,1 kg	31,2 kg
DF	46 MPa	15 MPa	12 MPa	36 MPa	33,5 MPa
BZF	10 MPa	4 MPa	3 MPa	8 MPa	7 MPa

Die Substitution von Sand sowohl durch Granulate als auch durch reine Kohle führt zu einer Senkung der Druck- als auch Biegezugfestigkeit in den Prüfprismen aus Mörtel gegenüber der Referenz mit reinem Quarzsand. Die Zugabe von reiner Kohle hatte im Vergleich zur Zugabe der Granulate deutlich niedrigere Druck- sowie Biegezugfestigkeit als auch eine signifikant stärkere Reduzierung der Verarbeitbarkeit zur Folge. Zur Anpassung der Fließeigenschaften erfolgte sowohl

in den Ansätzen mit Granulaten als auch mit reinen Kohlen eine Zugabe von zusätzlichem Wasser. Dies hatte einen vergleichsweise höheren w/z-Wert in der Rezeptur zur Folge, was schließlich zu einem Abfall der Festigkeit in den Mörtelprismen führte. In den Rezepturen mit loser Kohle als Sandersatz war die Verarbeitbarkeit deutlich schlechter als beim Mörtel, der Granulate enthielt, weshalb in diesen der Wasseranspruch signifikant höher war. Dies ist eine Erklärung für die im Vergleich deutlich geringeren Festigkeitswerte.

Durch den teilweise Ersatz von Sand durch Granulate konnte die CO₂-Bilanz der Mörtelformulierungen drastisch verbessert werden, während die Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften sich in einem annehmbaren Bereich bewegten. Demgegenüber erzielte der Einsatz von Kohle zwar eine noch bessere CO₂-Bilanz, allerdings hatten die erhaltenen Mörtelformulierungen inakzeptable mechanische Eigenschaften. Auf Grund der geringeren Schüttdichte der Granulate gegenüber der Kohle haben die erhaltenen Mörtelformulierungen auch eine geringere Dichte.

Selbstverständlich ist die Erfindung nicht auf die dargestellten Ausführungsformen beschränkt. Die vorstehende Beschreibung ist daher nicht als beschränkend, sondern als erläuternd anzusehen. Die nachfolgenden Ansprüche sind so zu verstehen, dass ein genanntes Merkmal in zumindest einer Ausführungsform der Erfindung vorhanden ist. Dies schließt die Anwesenheit weiterer Merkmale nicht aus. Die nachfolgenden Ansprüche sind nicht so zu verstehen, dass ein genanntes Merkmal oder eine genannte Merkmalskombination in jeder Ausführungsform der Erfindung vorhanden ist. Sofern die Ansprüche und die vorstehende Beschreibung „erste“ und „zweite“ Ausführungsformen definieren, so dient diese Bezeichnung der Unterscheidung zweier gleichartiger Ausführungsformen, ohne eine Rangfolge festzulegen.

Ansprüche

1. Granulatkorn, umfassend Bindemittel und Karbonisat, wobei der Karbonisatgehalt im Granulat 30 Gew.-% oder mehr beträgt, bezogen auf das Gesamtgewicht des Bindemittels und des Karbonisats im Granulat.
2. Granulatkorn gemäß Anspruch 1, wobei das Bindemittel ausgewählt ist aus der Gruppe Klinkerzement, Portlandzement, Calciumaluminatzement, Calcium-Sulfo-Aluminat-Zement, Calciumsulfat (Gips), Calciumoxid, Calciumhydroxid, Aschen, Flugasche, Schlacken, Hüttensand, Alkalimetall- oder Erdalkalimetallhydride, -halogenide, -oxide, -nitrate, -sulfate, -carbonate, -silikate, -phosphate, -fluoride oder deren organische Derivate wie Alkoholate oder Acetaten, Aluminiumphosphatverbindungen, Alumosilikate, Tone, calcinierte Tonerden, Kaolin, Puzzolane, Trass, Tuff, organische Polymere oder Kombinationen davon.
3. Granulatkorn gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei das Karbonisat ausgewählt ist aus der Gruppe Biomasse, Pflanzenkohle, Holzkohle, pyrolysiertes Klärschlamm, pyrolysiertes Papier und Kartonage, pyrolysierte Gärreste, Industrieruße und Kombinationen davon.
4. Granulatkorn gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Karbonisatgehalt im Granulat 40 Gew.-% oder mehr beträgt, oder
wobei der Karbonisatgehalt im Granulat 50 Gew.-% oder mehr beträgt, oder
wobei der Karbonisatgehalt im Granulat 60 Gew.-% oder mehr beträgt, oder
wobei der Karbonisatgehalt im Granulat 65 Gew.-% oder mehr beträgt, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Bindemittels und des Karbonisats im Granulat.

5. Granulatkorn gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche mit einer Korngröße im Bereich von 0,1 mm bis 32 mm.
6. Granulatkorn gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei das Granulatkorn homogen ist.
7. Granulatkorn gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei das Granulatkorn unterschiedlich aufgebaute Schichten aufweist.
8. Granulatkorn gemäß Anspruch 7, wobei sich im Kern des Granulatkorns Karbonisat befindet und an der Oberfläche des Granulatkorns Bindemittel befindet.
9. Granulatkorn gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bestehend im Wesentlichen aus Bindemittel und Karbonisat.
10. Granulatkorn gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, das einen Glühverlust von 15% oder mehr aufweist, gemessen nach DIN 18128.
11. Herstellungsverfahren für ein Granulat, umfassend Granulatkörner aus irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend Feuchtgranulieren, Sprühtrocknung, Wirbelschichtgranulieren, Schmelzgranulieren oder Kombinationen davon.
12. Verfahren gemäß Anspruch 11, wobei in einem ersten Schritt eine Karbonatisierung von Pflanzenmaterial, Klärschlamm, Papier, Kartonage, Gärreste oder Kombinationen davon erfolgt und diesem Schritt ein Zusetzen eines Bindemittels mit direkt nachgeschaltetem Granulieren erfolgt.
13. Verfahren gemäß Anspruch 12, wobei nach oder während der Karbonatisierung eine Zermahlung und wahlweise eine

Siebung des Karbonisats auf erfolgt, so dass das Karbonisat eine Korngrößenverteilung hat, so dass $d_{80} \leq 500 \mu\text{m}$, oder $d_{80} \leq 100 \mu\text{m}$.

14. Verwendung eines Granulatkorns aus einem der Ansprüche 1 bis 10 oder Verwendung eines Granulats, hergestellt nach dem Verfahren aus Anspruch 11 bis 13 als Zuschlagsstoff für Baustoffe, Schüttdämmung, Zuschlagstoff in Trockenmörtelprodukten, Akustikbauteile, Zuschlag für akustische Absorber, Zugabe in Crashbeton, Farbstoff, Zuschlagstoff zur Verbesserung der Fließeigenschaften in fließfähigen Baustoffen, Zuschlagstoff für Asphalt, Füller, Pflanzensubstrat, Zuschlag für Hinterbeton, Fugenschüttung, Palisaden, Bettungsmaterial, Baumscheiben, Granulate für den Deich- oder Dammbau, Begrünung für Dächer und Fassaden, Katalysatoren oder Trägermaterial für Katalysatoren, Filter-/Sorption, Filtermaterial für Abgase oder flüssige Abfallströme, Trocknungsmittel, Absorber für Verunreinigungen oder Verschmutzungen oder Kombinationen davon.