

Potentiale der Verwertung von Biomasseasche als Zusatzstoff

Steffen Overmann, Anya Vollpracht, Thomas Matschei

*Institut für Baustoffforschung,
RWTH Aachen University,
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen, Germany*

overmann@ibac.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Zur Erfüllung der globalen Klimaziele ist die Zementindustrie bestrebt Portlandzementklinker in zunehmendem Maße durch nachhaltigere Materialien zu ersetzen; im gleichen Kontext steigt die Energieproduktion aus erneuerbaren Energiequellen. Während Kohlenflugasche aus fossilen Brennstoffen in Deutschland durch die fortschreitende Abschaltung der Kohlekraftwerke immer weniger zur Verfügung steht, fallen Biomasseaschen aus pflanzlichen Brennstoffen als erneuerbare Energiequelle vermehrt an und bieten Potential, als Zusatzstoff im Zement bzw. Beton eingesetzt zu werden. Die große Herausforderung hierbei ist, dass die Zusammensetzungen und dementsprechend die Eigenschaften von Biomasseaschen sehr variabel sind. Diese sind vor allem abhängig von der Pflanzenart, den Pflanzenteilen, dem Standort (Verfügbarkeit von Nährstoffen, klimatische Bedingungen), der Vorbehandlung und den Brennbedingungen sowie der betrachteten Fraktion (Bodenaschen, Filteraschen). In Deutschland werden Biomassekraftwerke überwiegend mit Restholz betrieben. Daher wurden in dieser Studie Holzaschen unterschiedlicher Herkunft charakterisiert und auf ihre grundlegende Eignung als Zusatzstoff untersucht. Es ist festzustellen, dass Holzaschen signifikante Unterschiede in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften aufweisen. Die untersuchten Holzaschen zeigen deutlich geringere Reaktivitäten als herkömmliche Steinkohlenflugaschen.

Keywords: Biomasseaschen, Zusatzstoff, Reaktivität

Abstract

To reach the global climate targets, the cement industry is aiming to substitute increasing proportions of Portland cement clinker with more sustainable materials; in the same context, energy production from renewable energy sources is increasing. While the availability of coal fly ash from fossil fuels is decreasing in Germany due to the progressive shutdown of coal-fired power plants, biomass ash from plant fuels is increasingly available as a renewable energy source and has the potential to be used as supplementary cementitious material in cement or concrete. Here, the major challenge is that the compositions and, accordingly, the properties of biomass ashes are very variable. These are mainly dependent on the plant species, the plant parts, the location (availability of nutrients, climatic conditions), the pre-treatment and the burning conditions as well as the considered fraction (bottom ash, filter ash). In Germany, biomass power plants are mainly operated with residual wood. Therefore, wood ashes of different origins were characterized in this study and examined for their basic suitability as an additive. It was found that wood ashes show significant differences in their composition and properties. The wood ashes investigated generally show lower reactivities than conventional hard coal fly ash.

Keywords: biomass ash, supplementary cementitious material, reactivity

1 Einleitung

Die Zementindustrie ist Schätzungen zu Folge für 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich [1]. So fallen beispielsweise ca. 800 kg CO₂ bei der Herstellung einer Tonne Portlandzementklinker an [2]. Die Emissionen erfolgen zum einen durch den hohen Brennstoffverbrauch beim Klinkerbrand mit bis zu 1450 °C. Der größere Anteil wird jedoch chemisch bedingt beim Klinkerbrand durch die Abspaltung von CO₂ aus Calciumcarbonat freigesetzt. Aufgrund des fortschreitenden anthropogen bedingten Klimawandels bestehen daher große Bestrebungen, den Klinkeranteil im Zement durch Einsatz von alternativen Materialien zu reduzieren. Bewährte Ersatzstoffe sind z. B. industrielle Nebenprodukte wie Hütten sandmehl und Steinkohlenflugasche, mit denen die chemisch sowie technisch bedingte CO₂-Freisetzung umgangen sowie auch Energie und natürliche Ressourcen eingespart werden. Aufgrund von Verfahrensumstellungen bzw. Anlagenstillegungen in der deutschen Stahlindustrie und den Kohle kraftwerken wird die Verfügbarkeit von Hochofenschlacke und Flugasche zukünftig jedoch sinken [3]. In Verbindung mit den bestehenden klimapolitischen Zielen ist abzusehen, dass die zu erwartende steigende Nachfrage nach Zusatzstoffen ohne alternative Ersatzmaterialien nicht gedeckt werden kann.

Parallel dazu gewinnen erneuerbare Energien aufgrund der Klimaziele zunehmend an Bedeutung. In diesem Zusammenhang steigt der Anteil der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen [4]. Die Verbrennung von pflanzlichen Brennstoffen gilt als „CO₂-neutral“, da nur so viel CO₂ freigesetzt wird, wie in der Wachstumsphase aufgenommen wird. Die Asche kann potenziell als reaktiver Zusatzstoff verwendet werden, wenn ein hoher Silizium- oder Calciumanteil besteht und dieser aufgrund geeigneter Verbrennungsbedingungen in amorphem Zustand vorliegt. Reishülsenaschen weisen einen hohen Anteil an amorphem SiO₂ auf und zeigen eine hohe puzzolanische Reaktivität. Ihr Potential als Zusatzstoff ist umfassend untersucht [5,6]. Für Deutschland ist der Einsatz von Reishülsenaschen jedoch nicht relevant, da es für die Baustoffindustrie ökonomisch und ökologisch sinnvoller ist, lokal verfügbare Aschen einzusetzen, d. h. Aschen von Pflanzen, die in den entsprechenden Regionen wachsen. Herausforderung beim Einsatz von Aschen aus pflanzlichen Brennstoffen ist deren vielfältige, variable Zusammensetzung. Z. B. unterscheiden sich Aschen aus verschiedenen Pflanzen sowie aus verschiedenen Pflanzenteilen erheblich in ihrer Zusammensetzung und damit auch in ihren Eigenschaften. Darüber hinaus können sich der Standort in Bezug auf die verfügbaren Nährstoffe auf die Zusammensetzung auswirken. Zudem sind die Zusammensetzung sowie die Verfügbarkeit von den Jahreszeiten abhängig. Weiterhin beeinflusst die Vorbehandlung und die Brennbedingungen die Ascheeigenschaften. Diese Umstände erschweren es, Biomasseasche als standardisierten Zusatzstoff zu etablieren.

Darüber hinaus kann die Substitution von Klinker durch Biomasse-Aschen die Betoneigenschaften, z. B. Wasserbedarf und Verarbeitbarkeit, Porosität und Dauerhaftigkeit sowie mechanische Eigenschaften wie Zug- und Druckfestigkeit verschlechtern [7]. Je nach Brennbedingungen kann ein hoher Anteil an unverbranntem Kohlenstoff vorliegen. Dieser ist verantwortlich für eine extrem hohe spezifische Oberfläche und einen entsprechend hohen Wasseranspruch. Auch andere Komponenten können sich negativ auswirken wie z.B. ein hoher Phosphatgehalt der die Hydratation hemmt. Einige Aschen weisen auch sehr hohe Kaliumgehalte bis > 50 M.-% auf [8].

In Deutschland wurden 2022 rund 65 % des Endenergieverbrauchs erneuerbarer Energien für Wärme durch biogene Festbrennstoffe erzeugt [4]. Hierbei wird zwischen holzartiger und halmgutartiger pflanzenbasierter Biomasse unterschieden, wobei in Deutschland überwiegend holzartige Biomasse, wie z. B. Waldrestholz, eingesetzt wird [9]. Halmgutartige Biomassen sind z. B. Rückstände von Getreide oder Ölpflanzen. Ihre Nutzung als Brennstoff ist trotz des allgemein guten Brennwertes auf Grund ihrer im Vergleich zu Holz verbrennungstechnisch ungünstigen Eigenschaften (Elementarzusammensetzung) schwieriger [10]. Biomasse wird bspw. in Form von Hackschnitzeln, Pellets oder Halmgutballen in den Ofen gegeben. Dabei gibt es diverse Feuerungssysteme (z. B. Vorofenfeuerungen, Unterschubfeuerungen, Rostfeuerungen, Wirbelschichtfeuerungen) deren Eignung von der Anlagengröße und von der Beschaffenheit des Brennstoffs abhängt [9]. Aktuell findet ein Teil der Aschen bei geeigneter Zusammensetzung Anwendung als Dünger. Der Einsatz als Zusatzstoff für Zement/Beton ist auf Grund der variablen Zusammensetzung noch nicht weitreichend untersucht. In dieser Studie werden Holzaschen aus drei unterschiedlichen Kraftwerken sowie eine vom Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) für Forschungszwecke hergestellte Asche aus Dinkelspelzen als halmgutartiger Verarbeitungsrückstand auf die grundlegende Eignung als Zusatzstoff untersucht.

2 Material und Methoden

2.1 Material

Die untersuchten Aschen stammen aus laufenden Kraftwerken sowie aus einer Versuchsanlage am DBFZ. In Tabelle 1 sind die untersuchten Aschen in Kategorien aufgeteilt. Die Probe HA-DE wurde mit einer Feuchte von ~ 15 M.-% in verschlacktem Zustand angeliefert. Diese wurde anschließend bei $105 \pm 5^\circ\text{C}$ für 5 Tage getrocknet und in einer Kugelmühle auf ca. $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ gemahlen. Die anderen Aschen wurden bereits in trockenem Zustand angeliefert, jedoch wurde eine Teilprobe für die hier durchgeführten Untersuchungen bei $105 \pm 5^\circ\text{C}$ getrocknet, um potentiell adsorbierte Luftfeuchtigkeit zu entfernen. Die Probe DSA wies einen verschlackten Anteil von ca. 10 M.-% auf. Dieser wurde ebenfalls in der Kugelmühle aufgemahlen und mit dem restlichen Feinanteil vermengt. Die Proben HA-DK und HA-UK wiesen bereits eine ausreichende Feinheit auf.

Tabelle 1: Probenübersicht

Bezeichnung	Brennstoff	Art	Brenntemperatur	Ursprungsland
HA-DE	Holzhackschnitzel	Rostfeuerung, Kesselasche	$\sim 650^\circ\text{C}$	Deutschland
HA-DK	Holzpellets	Staubfeuerung, Flugasche	$\sim 900\text{-}1000^\circ\text{C}$	Dänemark
HA-UK	Holzpellets	Staubfeuerung, Flugasche	$\sim 1400\text{-}1500^\circ\text{C}$	Großbritannien
DSA	Dinkelspelzenpellets	Pilotanlage, gesamte Aschefraktion	$\sim 750^\circ\text{C}$	Deutschland

2.2 Methoden

2.2.1 Chemische Zusammensetzung

Der Glühverlust wurde gemäß EN 196-2 bei 950°C im Muffelofen bestimmt. Die chemischen Hauptbestandteile wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse mit einem Panalytical Axios Röntgenfluoreszenzspektrometer. Hierfür wurden Schmelztabletten mit Lithiumtetraborat mit einer Vulcan-Schmelzmaschine 4MA von PD Instruments hergestellt. Zur Analyse des Kohlenstoff- und Sulfatgehalts wurde ein Kohlenstoff/Schwefel-Analysator Eltra CS-2000 verwendet. Freikalk wurde gemäß EN 196-2 mittels Extraktion in Acetessigsäureethylester/2-Buthanol und Titration mit Salzsäure bestimmt.

2.2.2 Mineralogische Zusammensetzung

Für die mineralogische Charakterisierung wurden die Proben mit einem Achatmörser per Hand auf eine Korngröße $< 63 \mu\text{m}$ gemahlen. Anschließend wurde zur Quantifizierung des amorphen Anteils die Probe mit einem Rutilstandard (20 M.-%) in dem Achatmörser per Hand homogen vermahlen. Die mineralogische Zusammensetzung wurde mit einem Röntgendiffraktometer Panalytical X'Pert Pro mit einem X'Celerator-Detektor bestimmt. Die Daten wurden in einem Bereich von 5 bis $70^\circ 2\theta$ mit einer Schrittweite von $0,0167^\circ 2\theta$ aufgenommen. Zur Bestimmung der quantitativen Zusammensetzung der Proben wurde eine Rietveld-Verfeinerung mit der Software Panalytical Highscore Plus 4.8 durchgeführt.

2.2.3 Physikalische Charakterisierung

Die Korngrößenverteilung wurde mit einem Lasergranulometer (Bettersizer 3000 Plus, Fa. 3P Instruments) bestimmt. Die Messungen erfolgten durch Ultraschalldispersion der Pulver in Isopropanol. Die spezifische Oberfläche wurde mit der BET-Methode mit Stickstoffadsorption bestimmt (Sync 220, Fa. 3p Instruments). Der Blaine-Wert wurde nach DIN EN 196-6 bestimmt. Dazu wurde die Reindichte mit einem Helium-Pyknometer (AccuPyc 1330, Fa. Micromeritics) ermittelt.

2.2.4 Reaktivitätstest

Die Reaktivität der Proben wurde nach ASTM C1897-20 mit isothermer Wärmeflusskalorimetrie (TAM Air, Fa. TA Instruments) bestimmt. Eine Kaliumlösung wurde durch Mischen von 4,00 g Kaliumhydroxid und 20,0 g Kaliumsulfat in 1,00 l deionisiertem Wasser hergestellt. 5,00 g der Probe wurden mit 15,00 g Ca(OH)_2 und 2,50 g CaCO_3 durch Schütteln in einem geschlossenen Gefäß vorge-mischt. Nach Temperierung aller Komponenten bei 40 °C wurden 27,00 g der Kaliumlösung zu den Feststoffen gegeben und mit einem Schermischer bei 1600 U/min für 2 min vermischt. Zur Doppelbe-stimmung wurden ca. 15 g in jeweils zwei Probenampullen eingewogen. Die Proben wurden sofort in das Kalorimeter gesetzt und die Reaktionswärme wurde 7 Tage aufgezeichnet. Für die Auswertung wurden gemäß ASTM C1897-20 die Daten der ersten 75 min verworfen, damit die Lösungswärme der Ausgangsstoffe nicht in das Ergebnis der kumulativen Wärme einfließt.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Chemische Zusammensetzung

Die Ergebnisse der chemischen Charakterisierung der Aschen sind in Tabelle 2 aufgezeigt. Die Dinkelspelzenasche (DSA) weist einen hohen Kohlenstoffanteil auf, jedoch einen geringen Anteil an carbonatbildenden Komponenten wie CaO und MgO. Dies lässt auf einen hohen Anteil an unverbranntem organischem Material schließen. Während die Dinkelspelzenasche einen hohen SiO_2 -Anteil (> 60 M.-%) und einen niedrigen CaO-Anteil (< 3 M.-%) aufweist, ist das Verhältnis bei den Holzaschen ausge-glichener. Al_2O_3 , als weitere potentiell festigkeitsbildende Komponente, macht bei allen Aschen nur einen geringen Anteil aus (≤ 5 M.-%). HA-DK, HA-UK und DSA weisen Chloridgehalte > 0,1 M.-% auf, was potentiell einen korrosionsfördernden Einfluss beim Einsatz in Stahlbetonen haben kann und derzeit bspw. für Steinkohlenflugaschen nach DIN EN 450 nicht zulässig ist.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung

Parameter		HA-DE	HA-DK	HA-UK	DSA
Glühverlust, Atmosphäre	M.-%	3,62	16,49	14,48	16,13
Gesamtschwefel als SO_3		0,13	4,12	1,88	0,72
Gesamtkohlenstoff als CO_2		2,84	15,65	31,32	36,51
Gesamtkohlenstoff als C		0,78	4,27	8,55	9,96
Freikalk als CaO		-	13,08	9,08	1,03
Chlorid		0,004	0,37	0,19	0,26
Na_2O		0,01	0,01	0,62	0,01
K_2O		5,61	10,36	7,11	10,65
MgO		2,23	6,45	4,73	1,28
Al_2O_3		2,61	1,67	5,16	0,29
SiO_2		60,62	12,19	28,65	62,73
P_2O_5		2,65	3,83	2,40	3,35
CaO		19,95	38,33	28,05	2,65
TiO_2		0,17	0,11	0,52	0,02
MnO		0,43	1,29	1,54	0,06
Fe_2O_3		1,47	1,65	3,65	0,22

2.3.2 Mineralogische Zusammensetzung

Die mineralogische Zusammensetzung der Aschen ist in Tabelle 3 aufgezeigt. Aufgrund der komplexen Mineralogie sind die einzelnen Phasen überwiegend in Gruppen zusammengefasst. Es wird ersichtlich, dass die drei Holzaschen sich erheblich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. HA-DE weist im Gegensatz zu den anderen Holzaschen kein Periklas und Freikalk auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Kesselasche zum Abkühlen in ein Wasserbad geleitet wurde. Allerdings sind auch deutlich

geringere Anteile an Portlandit und Carbonaten enthalten. Es ist anzunehmen, dass durch das Abschrecken im Wasser Freikalk zu Calciumhydroxid reagiert ist und ausgewaschen wurde. Verbleibende Anteile des Calciumhydroxids könnten bei der anschließenden feuchten Lagerung mit puzzolanisch reaktiven Bestandteilen der Asche zu röntgenamorphen C-S-H-Phasen reagiert haben. Ein deutlich geringerer Anteil an Sulfaten deutet ebenfalls auf eine Auswaschung hin. Zudem zeigt die Asche HA-DE einen höheren Anteil an Silikaten, wohingegen bei HA-DK und HA-UK Carbonate bzw. carbonatisierbare Minerale (Freikalk und Periklas) als kristalline Phasen dominieren. Die beiden Aschen HA-DK und HA-UK zeigen aufgrund der ähnlichen Feuerungstechnik eine grundlegend ähnliche Zusammensetzung, wobei HA-UK einen signifikant höheren amorphen Anteil ausweist. Dies ist auf die deutlich höheren Brenntemperaturen zurückzuführen (s. Tabelle 1). Die Dinkelspelzenasche DSA weist einen sehr hohen amorphen Anteil von rund 90 M.-% auf, was zunächst auf eine metastabile mineralische Phase und dementsprechend sehr hohes Reaktivitätspotential hindeutet. Die chemischen Daten weisen jedoch auch auf einen erhöhten Anteil unverbrannter Materie hin, die dementsprechend einen Teil der ermittelten amorphen Phase ausmacht.

Tabelle 3: Mineralogische Zusammensetzung

Phasen		HA-DE	HA-DK	HA-UK	DSA
Periklas	wt.-%	-	4,6	2,3	-
Freikalk		-	11,1	7,1	-
Portlandit		0,5	1,7	0,6	-
Carbonate		3,9	27,6	12,4	-
Sulfate		0,4	9,5	7,4	3,0
Phosphate		1,5	2,5	0,3	-
Chloride		-	0,3	0,3	0,3
Silikate		38,4	5,1	3,6	6,5
amorph		55,4	37,7	66,3	90,1

2.3.3 Physikalische Charakterisierung

Die untersuchten physikalischen Parameter sind in Tabelle 4 aufgezeigt. HA-DE weist die geringste spezifische Oberfläche auf, da das Material aus aufgemahlener Kesselasche besteht. DSA weist mit Abstand die höchste spezifische Oberfläche auf Grund des großen Anteils unverbrannten Kohlenstoffs auf. Der Korngrößenbereich aller Proben liegt in einem geeigneten Bereich für den Einsatz als Zusatzstoff. Die teils hohen spezifischen Oberflächen können jedoch zu einem hohen Wasseranspruch und einer schlechten Verarbeitbarkeit im Zementssystem führen.

Tabelle 4: Physikalische Parameter

Probe	Reindichte	Blaine	BET	PSD		
				D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
	g/cm ³	cm ² /g		µm		
HA-DE	2,67	4960	21450	0,7	9,6	51,6
HA-DK	2,82	9930 ¹	24790	1,6	16,0	49,4
HA-UK	2,59	4502	140000	3,6	32,1	102
DSA	2,17	4294	419000	10.3	42.6	96.9

¹Wert oberhalb des bestimmaren Bereiches

2.3.4 Reaktivitätstest nach ASTM C1897-20

Bild 1 zeigt den Wärmefluss sowie Bild 2 die kumulative Wärmefreisetzung im Verlauf der Zeit. HA-DK zeigt zu Beginn den höchsten Wärmefluss, der anschließend am schnellsten wieder sinkt. Die initiale Wärmefreisetzung ist auf die freiwerdende Hydratationsenergie von Freikalk und Periklas zurückzuführen, die beim Kontakt mit Wasser zu Calcium- bzw. Magnesiumhydroxid reagieren. Auch nach 75 min wird noch Reaktionswärme aus diesem Prozess frei und verfälscht den Absolutwert der kumulativen Wärmefreisetzung im Hinblick auf puzzolanische Reaktionen. Der verhältnismäßig schnelle Abfall des Wärmeflusses deutet darauf hin, dass maximal eine sehr geringe puzzolanische Reaktivität vorliegt. Die Probe HA-UK weist ebenfalls Freikalk und Periklas auf, weshalb sich in den ersten Stunden des Versuches ebenfalls die Wärmeentwicklung dieser Phasen auf das Ergebnis auswirkt. Die etwas höhere Wärmefreisetzung im weiteren Verlauf weist jedoch auf eine etwas höhere puzzolanische Reaktivität hin. HA-DE zeigt keine bzw. eine sehr geringe Reaktivität trotz des relativ hohen amorphen Anteils (~ 55 M.-%). Wie in Abschnitt 2.3.1 diskutiert, können durch Feuchtigkeit und dem Vorhandensein von Calciumhydroxid potentielle puzzolanisch reaktive Anteile bereits zu röntgenamorphen C-S-H-Phasen reagiert haben.

Die Dinkelspelzenasche zeigt als einzige der untersuchten Aschen eine gute Reaktivität, die im Bereich von Steinkohlenflugaschen liegt.

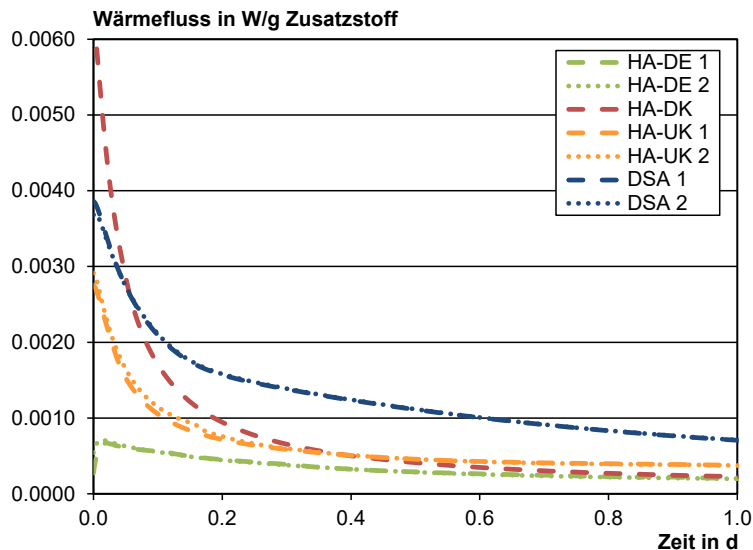


Bild 1: Wärmefluss als Funktion der Zeit bis zu einem Tag im Reaktivitätstest nach ASTM C1897-20

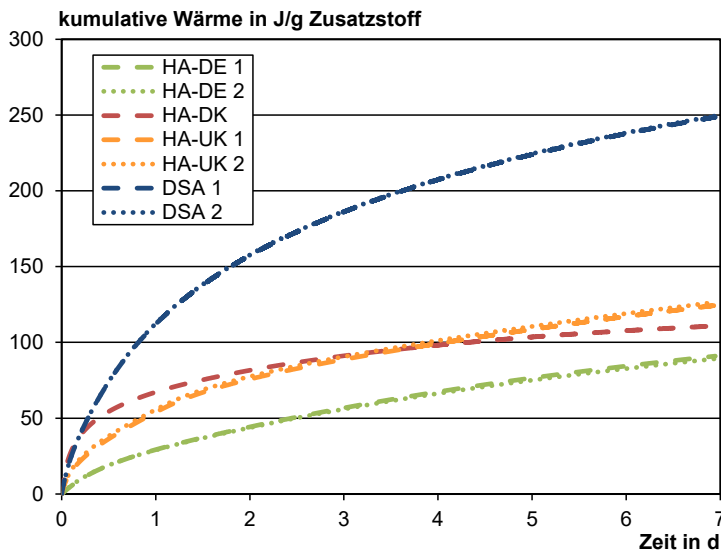


Bild 2: kumulative Wärme als Funktion der Zeit im Reaktivitätstest nach ASTM C1897-20

3 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurden Holzaschen aus drei unterschiedlichen Kraftwerken sowie eine vom Deutschen Biomasseforschungszentrum für Forschungszwecke hergestellte Dinkelspelzenasche auf ihre grundlegende Eignung als Zusatzstoff untersucht. Es ist festzustellen, dass Holzaschen je nach Ursprung signifikante Unterschiede in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften aufweisen. Alle untersuchten Holzaschen zeigen deutlich geringere Reaktivitäten als herkömmliche Steinkohlenflugaschen. Es steht offen, ob die puzzolanische Reaktivität von Holzaschen durch eine Anpassung der Brennprozesse verbessert werden kann.

Die Dinkelspelzenasche zeigt eine gute Reaktivität, vergleichbar mit herkömmlichen Steinkohlenflugaschen. Die Ergebnisse deuten allerdings auf einen erhöhten Anteil von unverbranntem Kohlenstoff hin. Der Brennprozess bietet somit noch Potential zur Optimierung. Es ist allerdings nicht klar, ob sich die im Labor optimierten Brennbedingungen im Industriemaßstab realisieren lassen.

4 Quellen

- [1] R.M. Andrew, Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018, *Earth Syst. Sci. Data* 11 (2019) 1675–1710.
- [2] Hübner, T., Guminski, A., Roon, S. und Rouyrre, E., *Energiewende in der Industrie Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energie-sektor: Branchensteckbrief der Zement- und Kalkindustrie*, 2019.
- [3] F.2. Umweltbundesamt III, *Dekarbonisierung der Zementindustrie*, 2020.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), *Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019*, 2020.
- [5] S.A. Endale, W.Z. Taffese, D.-H. Vo, M.D. Yehualaw, *Rice Husk Ash in Concrete*, *Sustainability* 15 (2023) 137.
- [6] A. Siddika, M.A.A. Mamun, R. Alyousef, H. Mohammadhosseini, *State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete*, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 33 (2021) 294–307.
- [7] M. Cabrera, J.L. Díaz-López, F. Agrela, J. Rosales, *Eco-Efficient Cement-Based Materials Using Biomass Bottom Ash: A Review*, *Applied Sciences* 10 (2020) 8026.
- [8] F. Matalkah, P. Soroushian, S. Ul Abideen, A. Peyvandi, *Use of non-wood biomass combustion ash in development of alkali-activated concrete*, *Construction and Building Materials* 121 (2016) 491–500.

- [9] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Leitfaden Feste Biobrennstoffe, 2014.
- [10] Lukas Schenke, Entwicklung eines Kugelrosts zur Verbrennung von Biomassepellets aus Weizenstroh in Kleinfeuerungsanlagen. Dissertation, Aachen, 2020.