

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ Technology gGmbH (Zementwerke)
Forschungseinrichtung 1:	VDZ Technology gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
Forschungseinrichtung 2:	Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozess- technik (LEAT) der Ruhr-Universität Bochum
IGF-Vorhaben-Nr.:	20898 N
Bewilligungszeitraum	01.11.2019 – 31.12.2022
Veröffentlicht VDZ-Webseite	<a href="#">(Verfahren zur Schnellprüfung der Qualität von flugfähigen Ersatzbrennstoffen für den Einsatz im Klinkerbrennprozess (vdz-online.de))</a>

Forschungsthema:

## **Verfahren zur Schnellprüfung der Qualität von flugfähigen Ersatzbrennstoffen für den Einsatz im Klinkerbrennprozess**

### **1 Ausgangssituation**

Der Brennstoffeinsatz macht einen wesentlichen Kostenfaktor bei der Zementherstellung aus. Deshalb ist die Zementindustrie bestrebt, fossile Brennstoffe wie Kohle so weit wie möglich durch Alternativbrennstoffe zu ersetzen. Ein zusätzlicher Vorteil besteht in der damit verbundenen Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Alternativbrennstoff-Anteil am gesamten thermischen Energieeinsatz der deutschen Zementindustrie liegt derzeit bei 69 % [VDZ 22]. Dabei besteht das Ziel darin, die Öfen, trotz potentiell inhomogener und variabler Alternativbrennstoff-Eigenschaften, gleichmäßig, mit konstanten Betriebs- und Produktparametern, zu betreiben. Ein solcher Ofenbetrieb ermöglicht eine Maximierung der Ofenkapazität und erleichtert es, die geforderte Klinkerqualität sicherzustellen. Dies setzt idealerweise eine gleichbleibend hohe Qualität des Alternativbrennstoffes voraus - insbesondere hinsichtlich seiner verbrennungstechnischen Eigenschaften. Betreiber berichten allerdings, dass Prozessschwankungen durch niedrige und ungleichmäßige Alternativbrennstoff-Qualitäten häufiger auftreten und dass dies die erreichbaren Einsatzanteile begrenzt.

Zu den gängigen Alternativbrennstoffen zählen vor allem aufbereitete Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen - speziell die flugfähigen heizwertreichen Fraktionen (ca. 50 Mio. GJ/a, ca. 75 % des Energieinputs aus Alternativbrennstoffen). Sie stehen daher im Fokus des Forschungsprojektes. Geläufige Bezeichnungen für diesen Brennstoff sind „Fluff“ oder „Ersatzbrennstoff“ (EBS). Die Herstellung des EBS erfolgt in Abfallaufbereitungsbetrieben durch Mischung verschiedener Abfallströme, Zerkleinerung und Siebung der Materialien, einer

Windsichtung sowie der Beseitigung von Störstoffen (z.B. Eisenmetalle und NE-Metalle). Im Gegensatz zu Kohlenstaub ist die Zusammensetzung von EBS heterogen. Dies zeigt sich in schwankender Zusammensetzung abhängig von Ort, Zeit und EBS-Produzent [BEC 07, MER 14].

Zwei wesentliche EBS-Qualitätsparameter sind die Feuchte und die Flugfähigkeit. Von besonderem Interesse sind darüber hinaus Informationen über die stoffliche Zusammensetzung des EBS (wie hoch ist der Anteil an Kunststoffolie, 3D-Kunststoff, Papier/Pappe, Textil, etc.?), da diese das Flugverhalten und die Verbrennungseigenschaften der Partikel wesentlich bestimmen. Eine hohe Brennstofffeuchte führt zu einer verzögerten Zündung und einer Abnahme der Feuerungswärmeleistung [TOM 13]. Dies wirkt sich tendenziell negativ auf den Freikalk- und Alitgehalt des Klinkers aus. Enthält der Brennstoff viele Brennstoffpartikel, die nur geringe Flugfähigkeit aufweisen (z.B. 3D-Kunststoffe), führt dies dazu, dass diese Partikel der Gasphasenströmung nicht folgen können und schwerkraftgetrieben aus der Flamme ausgetragen werden. Sie treffen unvollständig ausgebrannt in der Nähe des Brenners auf das Klinkerbett und reagieren dort weiter [IGF 18, IGF 22]. Die Folge können lokal reduzierende Brennbedingungen mit daraus resultierender Braunverfärbung des Klinkers sein [IGF 18, IGF 22, BAI 10].

## **2 Ziele des Forschungsvorhabens**

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung, der Bau und die Erprobung eines Schnellprüf-Systems für die schnelle Qualitätsprüfung von EBS, beispielsweise bei der EBS-Anlieferung im Zementwerk oder beim Warenausgang des EBS-Aufbereiters. Die Prüfung sollte an EBS-Proben mit einem Probenvolumen von jeweils 5 Litern erfolgen, wobei auf möglichst repräsentative Probenahme zu achten war.

Das Schnellprüf-System besteht aus drei Komponenten:

- einem „Windsichter“ zur Bewertung des Flugverhaltens (Bestimmung des Schwergutgehaltes bei festgelegter Sichtgeschwindigkeit, um daraus auf den 3D-Kunststoff-Gehalt schließen zu können)
- einem „Feuchteprüfer“ zur Bestimmung des Feuchtegehaltes
- einer „optischen Identifikation“ für die Analyse der stofflichen Zusammensetzung/ Material-Fraktionen (Folien, 3D-Kunststoffe, Papier/Pappe, Textil, etc.) durch ein Kamera- und Machine Learning-System.

## **3 Umfang der Untersuchungen**

Das Projekt war in mehrere Arbeitspakete unterteilt:

AP 1: Komponente „Windsichter“ (VDZ): Es wurde ein geeigneter kommerziell verfügbarer Windsichter eingesetzt und eine Standardvorgehensweise für die Sichtanalyse erarbeitet. In Versuchsreihen wurden die wesentlichen Einflussfaktoren / Querempfindlichkeiten für das Sichterergebnis ermittelt und ein Korrekturfaktor bestimmt, mit dem der Einfluss der Feuchte herausgerechnet werden kann.

AP 2: Komponente „Feuchteprüfer“ (LEAT): Ein geeigneter Trockner für die schnelle und sichere EBS-Trocknung wurde konstruiert und getestet. Die Feuchteaufteilung und das Trocknungsverhalten verschiedener Material-Fractionen wurden ermittelt.

AP 3: Komponente „fotooptische Analyse“ (LEAT): Eine Datenbank an Einzelfotografien von EBS-Partikeln mit 1.345 Partikeln wurde aufgebaut. Verschiedene Machine Learning-Algorithmen wurden verglichen und hinsichtlich der Identifikation von unbekanntem Partikeln ausgewählt. Die Identifikation einer Probe mit vielen Partikeln verteilt auf einem Tisch oder auf einem Förderband wurde erfolgreich gezeigt.

AP 4: Die drei Komponenten Windsichter, Feuchteprüfer und fotoptische Analyse wurden zum Schnellprüf-System kombiniert. Dieses wurde getestet und bewertet.

AP 5: Das Design des Windsichters wurde mit Strömungssimulationen überprüft, Empfehlungen zur Betriebsweise wurden erarbeitet und eine Empfehlung für die Prüfsichtgeschwindigkeit gegeben.

AP 6 und AP 8: Das fertiggestellte Schnellprüf-System wurde vom VDZ und LEAT im Rahmen von Betriebsversuchen an Drehofenanlagen in Zementwerken erprobt. Dabei wurden stündlich EBS-Proben genommen und vor Ort mit dem Schnell-Prüfsystem untersucht. Parallel dazu wurde der Zementklinker beprobt. An den Drehofenanlagen wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die EBS-Qualität gezielt verändert wurde. Mögliche Auswirkungen auf die Klinkereigenschaften wurden untersucht. Zudem wurde eine geeignete Sichtgeschwindigkeit festgelegt, um den Zeitaufwand bei der Sichtanalyse zu minimieren.

AP 7 und AP 9: Vom LEAT wurden ergänzende CFD-Simulationen der EBS-Verbrennung zur besseren Bewertung der Ergebnisse aus den Betriebsversuchen durchgeführt. So konnte in den Simulationen unter anderem die Feuchte des Brennstoffs variiert werden, was in den Betriebsversuchen nicht möglich war.

AP 10: Es wurde ein Leitfaden erstellt, der die Ergebnisse und wesentlichen Erkenntnisse aus dem Projekt zusammenfasst. Zudem werden Ausführungsanweisungen und Handlungsempfehlungen für den Einsatz des Schnellprüf-Systems gegeben.

#### **4 Zusammenfassung der Ergebnisse**

##### Festlegung eines standardisierten Verfahrensablaufs für das Schnellprüf-Verfahren:

1. Repräsentative EBS-Probenahme aus dem fallenden Brennstoffstrom (2 Probennahmen kurz hintereinander, jeweils mindestens 5 Liter)
2. Bestimmung der Probengewichte
3. Trocknung der ersten Probe zur Bestimmung der Feuchte im Feuchteprüfer
4. Bestimmung des trockenen Probengewichtes
5. Windsichtung der zweiten Probe bei Prüfsichtgeschwindigkeit. Die Sichtung erfolgt bei Umgebungstemperatur. Die Sichterergebnisse werden anschließend anhand des Korrekturfaktors auf den trocknen Zustand umgerechnet.
6. Bestimmung des Gewichtes der Leicht- und Schwerfraktion

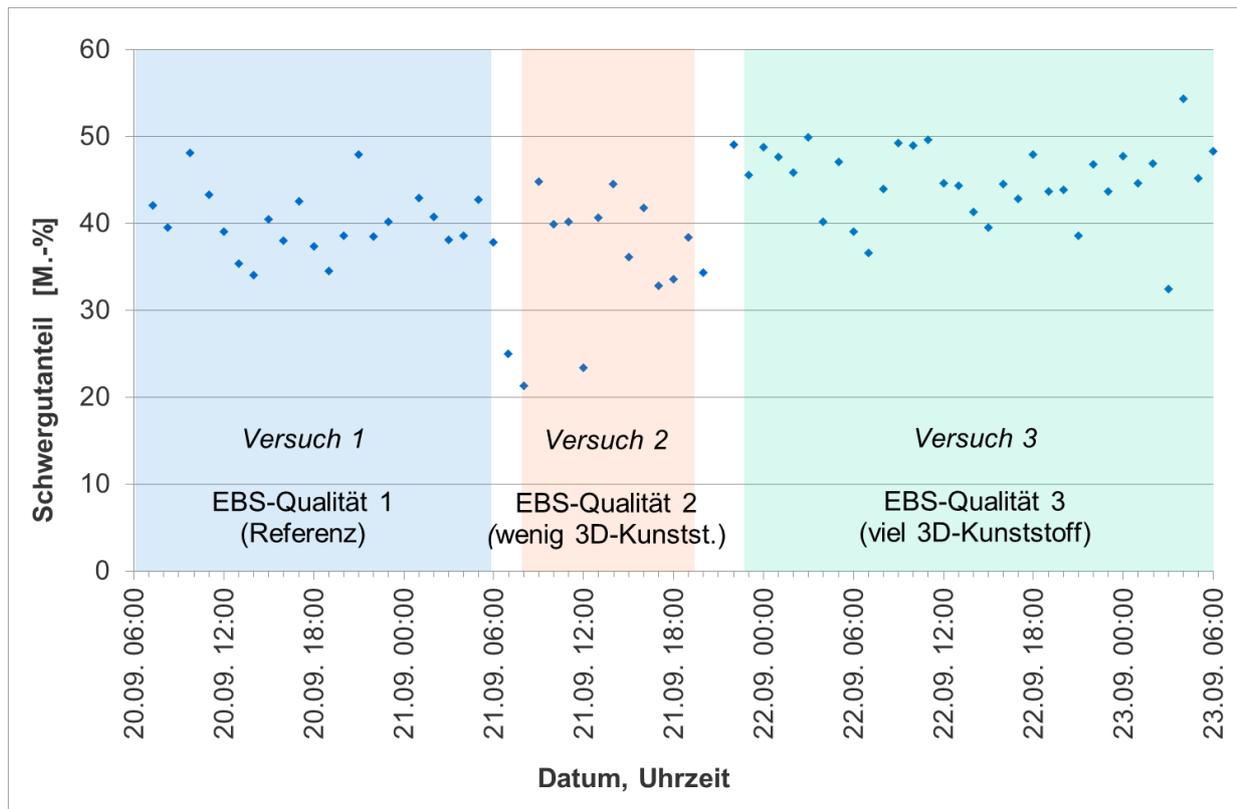
7. Die Leicht- und Schwerfraktion der Sichtung werden auf einem Tisch unter einer Kamera ausgebreitet, sodass sich die Partikel nicht überlappen. Alternativ fallen die Partikel aus dem Sieb mit einer Zentrifugenschleuse auf ein Förderband, das mit einer Kamera ausgestattet ist.

Denkbar wäre auch eine Kombination der Windsichtung und Feuchteprüfung in einem Gerät. Die Sichtung könnte mit 60 °C warmer Luft statt mit kalter Luft erfolgen. In der Eingangs- und Ausgangsluft würden jeweils die Temperatur und relative Feuchte gemessen und aus den Messwerten würde die abgetrennte Wassermenge und somit die Brennstofffeuchte abgeleitet.

#### Erkenntnisse aus der Erprobung des Verfahrens im Zementwerk

Die EBS-Qualität konnte mithilfe des Schnellprüf-Verfahrens fortlaufend überwacht werden. Es war zu erkennen, wann eine Qualitäts-Änderung eintrat, insbesondere eine Veränderung der EBS-Feuchte und ein Anstieg des Gehaltes an 3D-Kunststoffen. Letzterer war am Anstieg des Schwergutanteils bei der Sichtanalyse zu identifizieren (siehe **Bild 1** und

Tabelle 1).

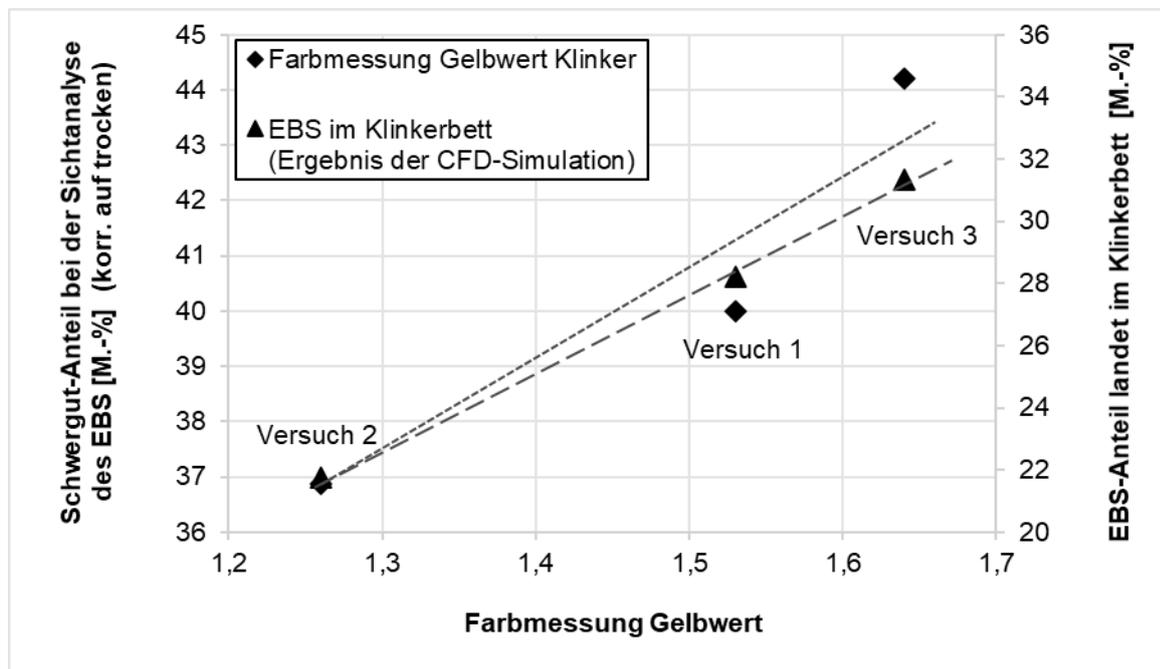


**Bild 1** Ergebnisse der Sichtanalyse von EBS-Proben bei einem Betriebsversuch (Prüfsichtgeschwindigkeit 4,2 m/s; Schwergutanteil korrigiert auf den trockenen Zustand)

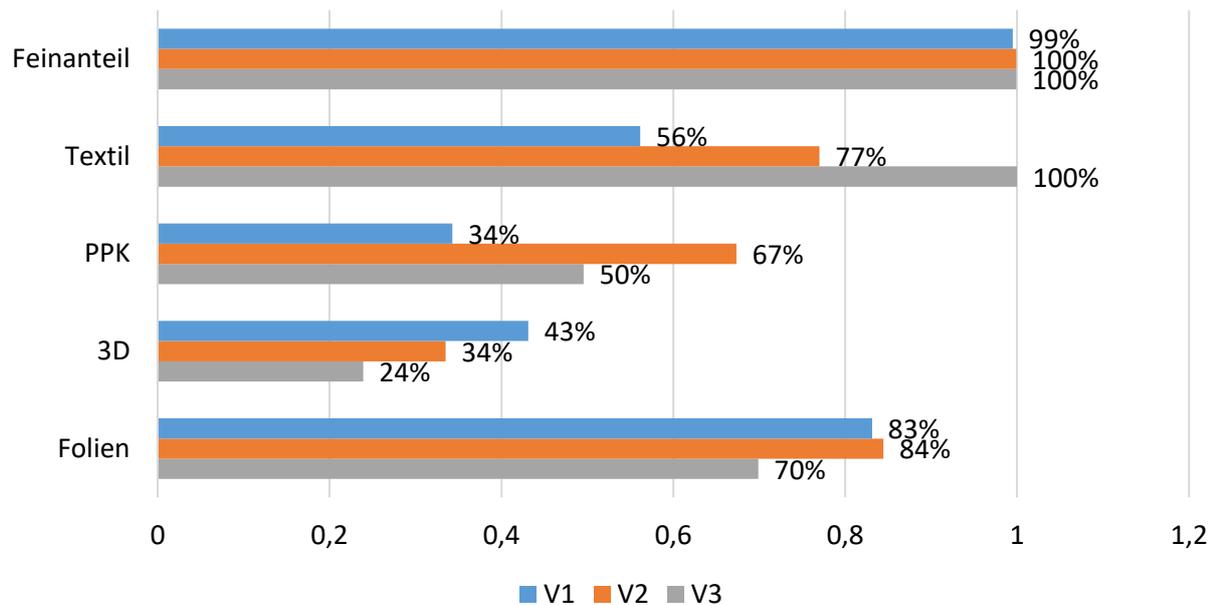
**Tabelle 1** Mittelwerte des Feuchtegehaltes und der Sichtanalysen der Einzelproben über die Versuchszeiträume

Versuch	Feuchteprüfung	Sichtanalyse		
	Feuchtegehalt	Schwergutanteil, (feucht)	Korrektur (feucht auf trocken)	Schwergutanteil (trocken)
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	9,8	42,0	-2,0	40,0
2	13,2	39,5	-2,6	36,9
3	6,7	45,6	-1,3	44,2

Im Zusammenhang mit der Erhöhung des 3D-Kunststoff-Anteils wurden Braunverfärbungen im Klinker festgestellt, die mit lokal reduzierenden Brennbedingungen durch EBS-Verbrennung im Klinkerbett in Verbindung zu bringen sind. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Simulationen des Betriebsversuchs, die zeigen, dass ein erheblicher Anteil der 3D-Kunststoffe, nicht in der Gasphase umgesetzt wird, sondern stattdessen im Klinkerbett verbrennt (siehe **Bild 2** und **Bild 3**). Die Diskussion der Ergebnisse im projektbegleitenden Ausschuss ergab, dass Schwankungen der EBS-Qualität als eine der möglichen Ursache für Braunverfärbungen im Klinker anzusehen sind, darüber hinaus aber auch noch andere werkspezifische Faktoren - insbesondere die Rohmaterialzusammensetzung – diesbezüglich eine wichtige Rolle spielen. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass es grundsätzlich möglich ist, das Schnellprüfverfahren zur Optimierung des Klinkerbrennprozesses einzusetzen.



**Bild 2** EBS-Schwergutanteil (gemessen mittels Sichtanalyse, Mittelwert) und EBS-Anteile im Klinkerbett (berechnet mittels CFD-Simulation) in Abhängigkeit von den Gelbwerten des Klinkers (Messung an Klinkerproben, Mittelwert) bei einem Betriebsversuch



**Bild 3** Massenanteil, der in der Gasphase verbrennt (vor dem Auftreffen auf Ofenwand/Klinkerbett) in Prozent nach Materialfraktion (berechnet mittels CFD-Simulation)

#### Erkenntnisse zum Windsichter

- Die beim Betriebsversuch für die Sichtanalyse gewählte Prüfsichtgeschwindigkeit von 4 m/s war geeignet, um Aussagen über die Eigenschaften des eingesetzten EBS zu erhalten, insbesondere um Änderungen zu registrieren. Die Prüfsichtgeschwindigkeit von 7 m/s war hingegen nicht geeignet.
- Die Ergebnisse der fortlaufenden Sichtanalyse schwankten beim Betriebsversuch stark zwischen den stündlich genommenen Einzelproben. Dies lässt darauf schließen, dass die EBS-Zusammensetzung und damit die zugehörigen Eigenschaften ebenfalls stark schwanken. Die Durchführung der EBS-Probenahme hat allerdings ebenfalls einen Einfluss. Um die Schwankungsbreite der Schnellprüf-Ergebnisse zu verringern sollte die Vorgehensweise optimiert werden (z.B. Erhöhung der Probenahmefrequenz, Bildung von Durchschnittsproben über längere Zeiträume, Vergrößerung der Probennahmemenge).
- Um ausreichend hohe Trennschärfe zu erreichen, sollte die Sichterbeladung begrenzt werden, z. B. indem beim verwendeten Sichter eine Aufgabegeschwindigkeit von ca. 30 Sekunden für 5 Liter EBS gewählt wird (entspricht 0,17 Liter/ Sekunde)
- Es wurde festgestellt, dass die EBS-Feuchte einen signifikanten Einfluss auf das Sichterergebnis hat. Für den beim Betriebsversuch eingesetzten EBS wurde folgende Korrekturfunktion für den Schwergutanteil ermittelt:

$$\text{Korrekturwert [M. -\%]} = -0,2 * \text{Feuchtegehalt [M. -\%]}$$

Darüberhinaus wurde festgestellt, dass auch die Feinheit des EBS einen Einfluss auf das Sichterergebnis hat. So bewirkt beispielsweise eine Erhöhung der EBS-Feinheit eine Erhöhung des Schwergutanteils, insbesondere bei sehr niedriger Prüfsichtgeschwindigkeit. Für die Praxis hat dies jedoch vergleichsweise geringe

Bedeutung, da die Schwankungen der Feinheit in der Regel geringer ausfallen als die der Feuchte.

#### Erkenntnisse zum Feuchteprüfer

- Im Feuchteprüfer wird die relative Feuchte und Temperatur von Ansaug- und Abluft gemessen. Aus den integralen Messungen der Differenz der Wasserbeladung der Luftströme lässt sich die abgetrennte Wassermasse bestimmen.
- Konvektionstrocknung mit 60 °C warmer Luft ist eine schnelle (15-20 Minuten) und sichere Methode der Trocknung zur Feuchtebestimmung bei EBS.
- Das Trocknungsverhalten gibt nur bedingt Aufschluss über die stoffliche Zusammensetzung der Brennstoffe. Ein hohes Verhältnis Trockenzeit/Feuchte ist typisch für einen EBS mit viel PPK und Textilien, ein niedriges für viel Folie und 3D-Kunststoffe.
- Simulationen mit Variation der EBS-Feuchte haben gezeigt, dass insbesondere für hohe Feuchten (>20 %) die Temperaturverteilung im Ofen gestört wird. Sie haben auch gezeigt, dass Änderungen der EBS-Feuchte nur in begrenztem Umfang zu Änderungen im Flugverhalten der EBS-Partikel im Drehrohrofen führen, vorwiegend nur für die Fraktion der Textilien.

#### Erkenntnisse zur fotooptischen Analyse

- Eine Datenbank mit 1.345 Fotos von einzelnen Partikeln mit Zuordnungen in Folie, 3D-Kunststoffe, Papier, Schaumstoff und Gummi wurde angelegt.
- Mit der Datenbank und den Machine Learning-Methoden können unbekannte Partikel identifiziert werden.
- Das neuronale Netz „Xception“ bietet eine höhere Genauigkeit bei der EBS-Identifizierung als klassische Machine Learning-Werkzeuge wie „Random Forest Classifier“, „Farbhistogramme“ oder „Hu-Texturen“.
- Die optische Identifizierung ist in der Lage, für nicht überlappende Partikel mit einer Zuverlässigkeit von 71 % die Material-Fraktionen der Partikel richtig zuzuordnen.
- Fotografien eines kontinuierlich laufenden Förderbandes sind ausreichend für die optische Identifizierung, wenn die Partikel sich dort nicht überlappen.
- Transfer Learning reduziert den Trainingsaufwand des neuronalen Netzwerks.
- Partikel überlappungsfrei zu fotografieren bleibt eine Herausforderung, die entweder einen manuellen Eingriff oder eine mechanische Trennung erfordern.

#### Einsatzmöglichkeiten für das Schnellprüfverfahren im Zementwerk

Das Schnellprüf-Verfahren kann eingesetzt werden

- für die Wareneingangskontrolle im Zementwerk (hierfür ist der Auf- bzw. Ausbau eines Systems zur möglichst repräsentativen EBS-Probenahme bei Anlieferung erforderlich)
- um neue EBS-Qualitäten, die von Lieferanten angeboten werden, hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zu bewerten
- zur Ursachenanalyse bei abweichendem Ofenbetrieb (Klinkereigenschaften, Prozesstemperaturen, Feuerfestschäden, etc.). Hierfür ist eine ausreichend hochfrequente und repräsentative EBS-Probenahme vor Aufgabe auf den Ofen erforderlich.

## 5 Literatur

- [BAI 10] Baier, H, Disruptive Substances and the burning behaviour of solid alternative fuels, Zement-Kalk-Gips (6) 2010, S.58 – 67
- [BEC 07] Beckmann M., Ncube S.: Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften, ISBN: 3928673505, 2007
- [IGF 18] AIF/IGF-Forschungsvorhaben-Nr.: 18862 N Steigerung des Ersatzbrennstoffeinsatzes in der Hauptfeuerung von Zementdrehrohröfen, Abschlussbericht, Bochum, 2018
- [IGF 22] IGF -Forschungsvorhaben-Nr.: 20691 N; Untersuchung der Wechselwirkung von Brennstoffpartikeln und Zementklinker mit dem Ziel der Erhöhung des Ersatzbrennstoffeinsatzes, Abschlussbericht, Düsseldorf, 2022
- [MER 14] Mersmann M.: Burning alternative fuels in cement kilns, ZGK International, Vol. 6, S. 44–49, 2014
- [TOM 13] Thomé-Kozmiensky K.J., Beckmann M.: Energie aus Abfall, Band 10, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN: 978-3-935317-92-4, 2013
- [VDZ 22] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2021, Düsseldorf, 2022

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr. 20898 N der VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.