

Optimierung der Prallzerkleinerung im Prallbrecher

Einleitung

Das Recycling von Abbruchbeton, dessen Wiederverwendung und die gleichzeitige Schonung der Natursteinressourcen haben – trotz vielfältiger Bemühungen – noch nicht den Stand erreicht, der unter ökologischen und volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten dringend geboten ist. Bei der Zerkleinerung von Abbruchbeton spielt der Prallbrecher eine wesentliche Rolle, da er maßgeblich Qualität und Eigenschaften der Recyclingprodukte beeinflusst.

Das Ziel der Untersuchungen an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bestand darin, das Gesamtsystem Brecher-Beton-Zerkleinerungsprozess zu optimieren, um die Kosten für die Betonsplittherstellung zu verringern und die Wiederverwendung des Betonsplitts als Zuschlag für Konstruktionsbeton durch Qualitätserhöhung zu steigern. Die noch immer zu minderwertige Qualität der RC-Zuschläge begrenzt den Einsatz mit höheren Anteilen [1]. Mit systematischen Untersuchungen sollten die Zerkleinerungsbedingungen für Abbruchbeton optimiert und die Produktqualität verbessert werden.

Zur Erhöhung der Produktqualität wurden die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis, die obere und untere Spaltweite, das Spaltverhältnis zwischen oberem und unterm Prallwerk und – besonders detailliert – das Feststoffvolumen im Prallraum variiert. Ausgangsmaterial waren im eigenen Institut hergestellte Betonprobekörper unterschiedlicher Betonfestigkeit. Untersucht wurden der Durchsatz, der Energiebedarf, der Verschleiß an den Schlagleisten und die Qualität der Recyclingprodukte (**Bild 1**).

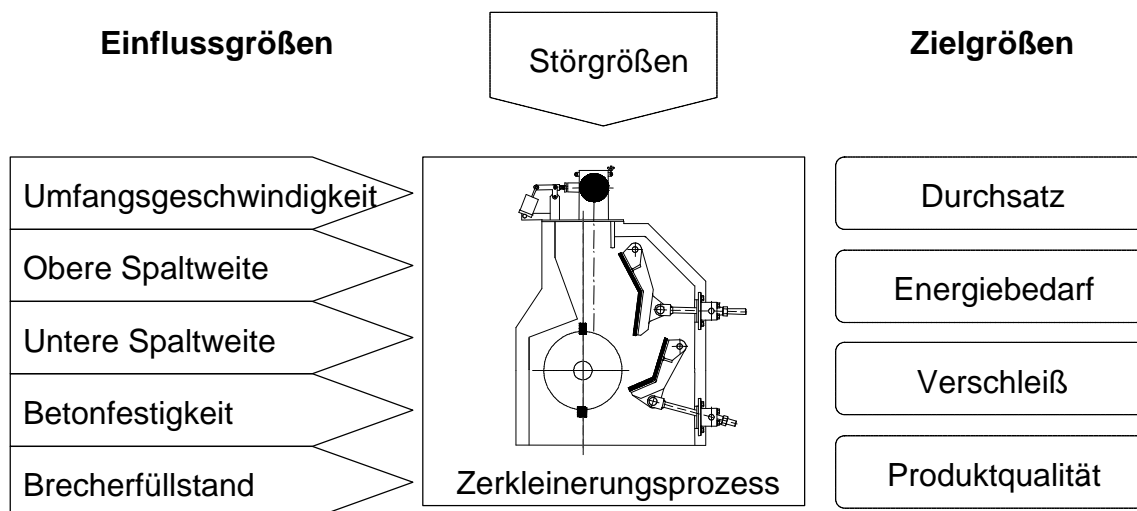


Bild 1: Einfluss und Zielgrößen bei der Betonzerkleinerung

Um den Verschleiß an den Schlagleisten zu verringern und somit die Standzeit des Prallbrechers zu erhöhen, kamen unterschiedliche Schlagleistenformen sowie verschiedene Schlagleistenmaterialien zum Einsatz. Die Industrie beteiligte sich durch Schlagleistenlieferungen und die Bereitstellung betriebsinterner Brecheranlagen an dem Vorhaben.

Versuchsprogramm und Ergebnisse

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf definierte Zielgrößen mit möglichst geringem experimentellen Aufwand untersuchen und bewerten zu können, mussten die Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen bekannt sein. Die bekanntesten Parameter, wie Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis und Spaltweiten am oberen und unteren Prallwerk, wurden empirisch eingestellt.

Einflussgrößen (Stellgrößen):

- Umfangsgeschwindigkeit des Rotors
- Untere Spaltweite
- Obere Spaltweite
- Spaltverhältnis
- Brecherfüllstand
- Betonfestigkeit

Zielgrößen (Messgrößen):

- Sieblinie (Korngrößenverteilung)
- Drehmoment (Energiebedarf)
- Drehzahl (Energiebedarf)
- Durchsatz
- Verschleiß an den Schlagleisten
- Belastung der Prallplatten
- Aufschlussgrad

Beim Zerkleinerungsprozess im Prallbrecher treten zahlreiche weitere Faktoren auf, deren vielfältige Wechselwirkungen nicht oder nur schwer zu analysieren sind (Störgrößen). Um überhaupt Aussagen über primäre Einflussgrößen treffen zu können, wurde nach der einfaktoriellen Methode vorgegangen und immer nur ein bekannter Faktor stufenweise variiert und die anderen konstant gehalten. Das Ergebnis gibt die Abhängigkeit der Zielgröße von diesem einen Faktor wieder, die in einem Diagramm dargestellt wird. Um Zerkleinerungsversuche im optimalen Bereich durchführen zu können, müssen zuvor alle optimalen Brechereinstellungen gefunden werden, d. h. für eine gewählte Zielgröße liegen alle konstant gehaltenen Einstellungen bereits auf ihrem Optimalniveau. Da das nicht der Fall war, wurden mittlere Einstellungen innerhalb des Untersuchungsbereiches gewählt. Über die Wirkung einer einzelnen Brechereinstellung (z. B. Umfangsgeschwindigkeit) auf die Zielgröße (z. B. Durchsatz) bei Veränderung anderer Faktoren (z. B. Brecherfüllstand) kann keine Aussage gemacht werden.

Insgesamt wurden über 150 Versuche am Versuchsprallbrecher der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg sowie an Brechanlagen beteiligter Industriepartner durchgeführt. Je Versuch wurden 20 Betonzylinder mit den Abmessungen \varnothing 150 mm, Höhe 200 mm und den Betonfestigkeiten B 25, B 35, B 45 und B 55 zerkleinert. Gemessen und aufgezeichnet wurden die Beschleunigungen am oberen und unteren Prallwerk, das Drehmoment und die Drehzahl des Rotors sowie die je Zeiteinheit zerkleinerte Betonsplittmasse. Bei ausgewählten Versuchen wurden zusätzlich Videoaufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt. Die Prüfung der Betonsplittqualität umfasste die Bestimmung der Korngrößenverteilung und die Prüfung der Druckfestigkeit der mit RC-Splitt hergestellten Probewürfel. Der Aufschlussgrad und die Rissefreiheit der RC-Splittkörner wurde an ausgewählten Proben bestimmt.

Durch die Versuche mit konstantem Massenstrom konnten der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis, des Spaltverhältnisses zwischen oberem und unterem Prallwerk, der Druckfestigkeit des Betons und besonders des Feststoffvolumens im Prallraum analysiert werden. Systematisch wurde zunächst die kritische Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis, anschließend das optimale Spaltverhältnis zwischen oberem und unterem Prallwerk und die Einstellung der Spaltweite am unteren Prallwerk zur Begrenzung des Größtkorns ermittelt. Um mit einer niedrigen Beanspruchungsenergie den Bruch der Primärzuschlagkörner zu vermeiden, wurde die kritische Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis für verschiedene Betonfestigkeiten ermittelt. Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis betrug zunächst 37 m/s und wurde schrittweise um $\Delta v = 2$ m/s auf 25 m/s verringert.

Festgestellt wurde, bei welchen Spaltverhältnissen zwischen oberem und unterem Prallwerk die Korngrößen-Summenverteilung des Betonsplitts der Größenverteilung des Primärzuschlags im zu zerkleinernden Beton bzw. im günstigen Bereich der Regelsieblinien AB nach DIN 1045 entspricht. Die Spaltverhältnisse wurden im Bereich 1...3 mit Schrittweiten von 0,5 variiert. Abschließend wurden das Feststoffvolumen im Brechraum sowie die Betonfestigkeiten der Ausgangsmaterialien variiert.

- **Durchsatz**

Ein hoher Feststoffvolumenanteil im Prallraum kann nur durch einen hohen Brecherfüllstand gewährleistet werden, der sich wiederum günstig auf den Durchsatz auswirkt. Durch Vergrößern des Rotorkreisbogens zwischen den Arbeitsflächen zweier benachbarter Schlagleisten, z. B. durch Entfernen von Schlagleistenpaaren, erhöht sich der Durchsatz, da Brechgut tiefer in den Schlagkreis eindringt. Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis hat nur sehr geringen Einfluss auf den Durchsatz, dagegen ist der Brecherfüllstand die Haupteinflussgröße (**Bild 2**).

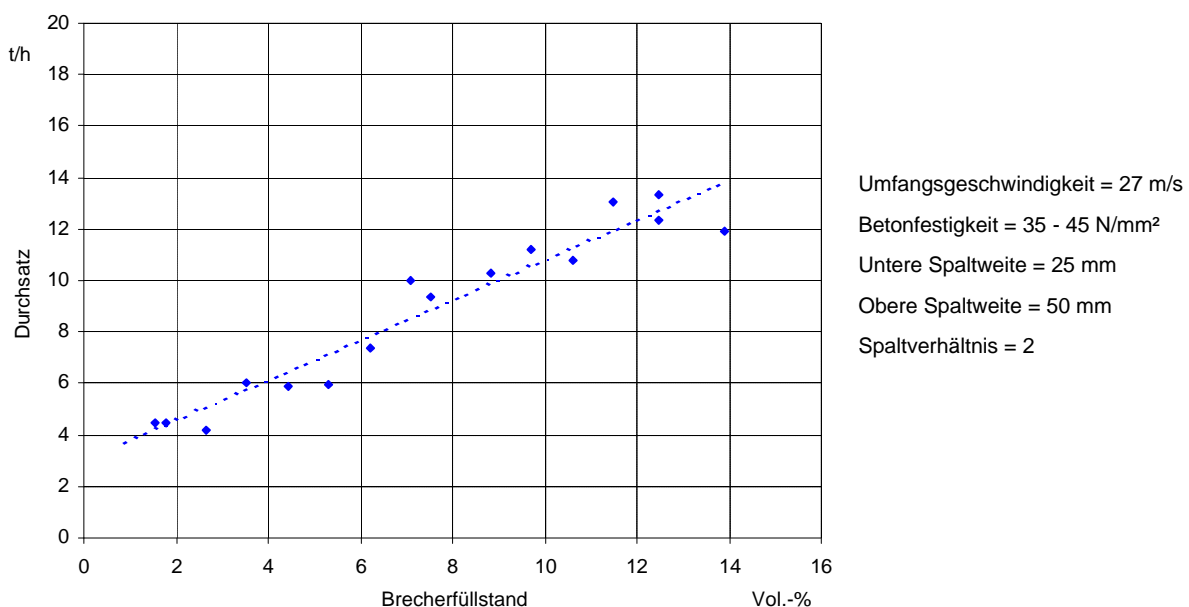


Bild 2: Durchsatz in Abhängigkeit vom Brecherfüllstand

- Energiebedarf

Aussagen über den für die Zerkleinerung von Beton notwendigen Energiebedarf werden spezifisch angegeben, entweder bezogen auf die zerkleinerte Masse Beton oder auf die entstandene Oberfläche. Ziel war das Senken des spezifischen Energiebedarfs durch Minimieren des Feinkornanteils, um hohen Oberflächenzuwachs zu vermeiden. Im Prallbrecher wird der Energiebedarf maßgeblich von der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis beeinflusst. Durch Senken der Umfangsgeschwindigkeit wird der Feinkornanteil im Betonsplitt minimiert und somit der spezifische Energiebedarf herabgesetzt (**Bild 3**). Durch optimierte Rotordrehzahlen kann der Energiebedarf für die Bewegung des Rotors gesenkt werden.

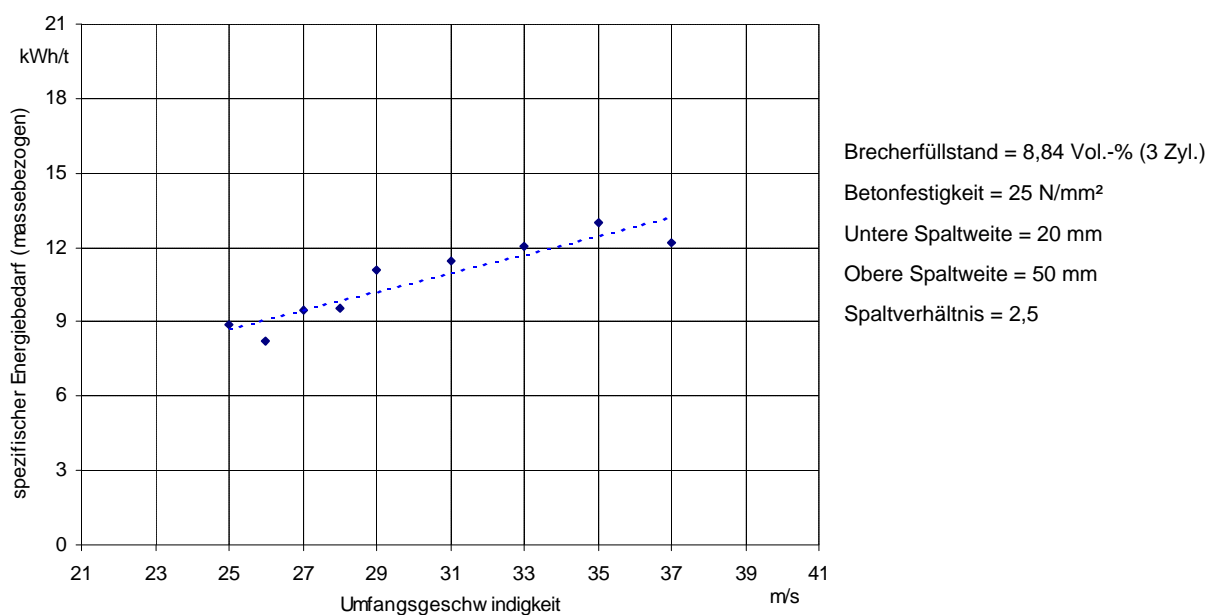


Bild 3: Energiebedarf in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit

Die Festigkeitseigenschaften des Betons und der Feststoffvolumenanteil im Prallraum haben ebenfalls maßgeblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Dabei verhält sich der Energiebedarf umgekehrt proportional zum Feststoffvolumenanteil im Prallraum. Festere Betone sind spröde und zerbersten bei der ersten Beanspruchung durch die Schlagleisten, wodurch die Verweilzeit des Betons im Prallraum und letztendlich der spezifische Energiebedarf sinkt. Der Energiebedarf für die Zerkleinerung von Beton im Prallbrecher ist von den Maschinenparametern Rotorteilung, Spaltweiten und Spaltverhältnis nicht direkt abhängig. Durch kleine Spaltweitereinstellungen wird aber die Verweilzeit des Betons im Prallraum erhöht und somit eine indirekte Abhängigkeit geschaffen. Der auf die zerkleinerte Masse Beton bezogene Energiebedarf steigt somit, je länger der Beton im Brechraum verweilt.

- Verschleiß (Schlagleistenstandzeit)

Der Verschleiß an den Schlagleisten in Pralldrechern wird im Wesentlichen sowohl durch die Wahl der Zerkleinerungsparameter und der Materialfestigkeit als auch durch die Form und das Material der Schlagleisten beeinflusst. Aber auch das Anfahrverhalten des Brechers und der Brecherfüllstand haben großen Einfluss auf die Schlagleistenstandzeit. Der Feststoffvolumenanteil im Prallraum beeinflusst wesentlich die Beanspruchungsart der Schlagleisten (Prall oder Schlag), die Beanspruchungsintensität der Prallplatten sowie die Zahl der Beanspruchungen durch gegenseitiges Zusammenstoßen der Körner. Durch das zufällige Aufeinandertreffen der Bruchstücke im Prallraum wird die kinetische Energie der beschleunigten Teilchen für eine gegenseitige Zerkleinerung aufgebraucht und nicht an die Zerkleinerungswerkzeuge abgegeben. Durch einen hohen Feststoffvolumenanteil im Prallraum wird die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens der Betonbruchstücke erhöht.

Während des Forschungsvorhabens wurden insgesamt ca. 12 t Beton zerkleinert, zu wenig um ein charakteristisches Verschleißbild an den Schlagleisten feststellen zu können. Bei Zerkleinerungsversuchen mit je 20 Betonzylindern betrug die Massenabnahme einer Schlagleiste ca. 40 g pro Tonne Beton. Bei Versuchen mit kontinuierlicher Zerkleinerung von Betonbruch lag der Verschleiß wesentlich niedriger bei 8,5 g/t. **Bild 4** zeigt, dass ein härterer Beton spröder und deshalb verschleißärmer zu zerkleinern ist.

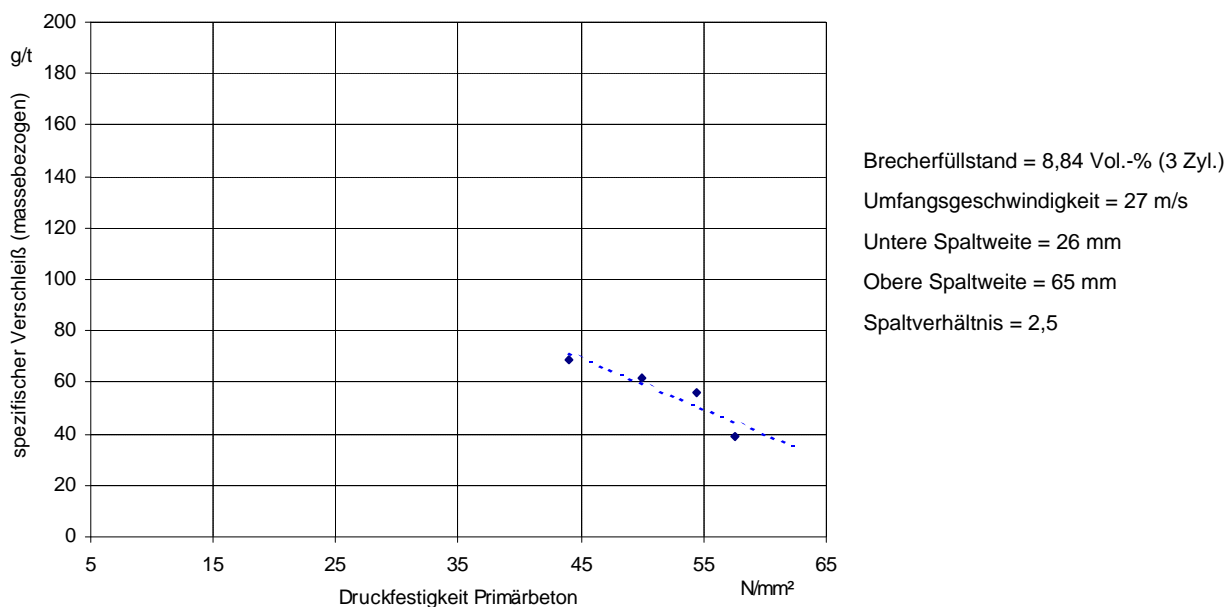


Bild 4: Verschleiß an den Schlagleisten in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Primärbetons

Eingesetzt wurden Schlagleisten aus unterschiedlichen Materialien. So kamen herkömmliches Manganhartstahl und gewalztes Grobblech aus Dillidur 400 V (400 BHN) zum Einsatz. Die Schlagleisten konnten wegen zu geringen Verschleißfortschritts nicht vollständig abgenutzt werden, erwiesen sich aber als geeignet für die Betonzerkleinerung.

- Qualität der Recyclingprodukte

Die Qualität der Recyclingprodukte kann mit verschiedenen Prüfverfahren bestimmt werden [DIN 4226-100]. Diese Norm legt auch die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für die Verwendung in Beton und Mörtel fest. Bestimmt wurde die Korngrößenverteilung als Kenngröße zur Beschreibung geometrischer Eigenschaften der Recyclingprodukte. Besonders der Anteil an Brechsand < 2 mm ist von Bedeutung, da dieser unerwünscht ist und nicht für Konstruktionsbeton für Außenbauteile verwendet werden darf [DAfStb-Richtlinie]. **Bild 5** zeigt, dass es auch mit dem Prallbrecher möglich ist, den Feinkornanteil im Betonsplitt durch optimale Umfangsgeschwindigkeiten auf unter 30 M.-% zu senken.

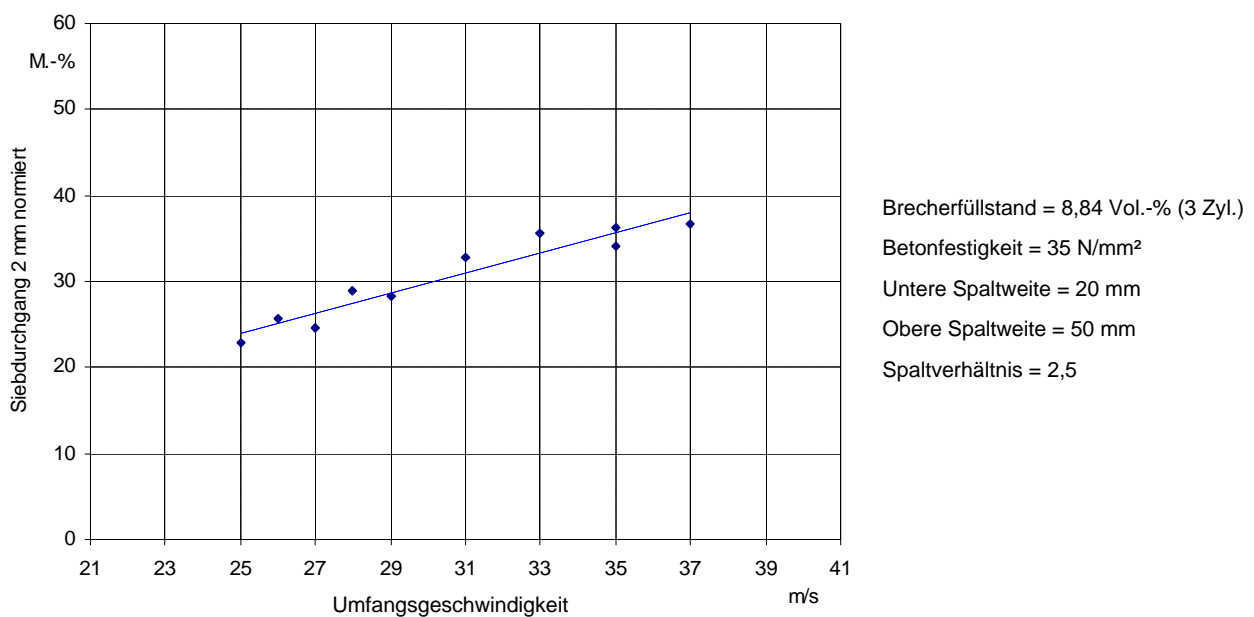


Bild 5: Feinkornanteil (0/2 mm) in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors im Schlagkreis

Die Qualität der Recyclingprodukte wurde zusätzlich mit Hilfe eines Stößelversuches untersucht und mit Primärkörnern verglichen. Um die Festigkeit der Betonsplittkörner zu prüfen, wurde die Fraktion 8/16 mm auf ihren Widerstand gegen Zertrümmerung untersucht und jedes einzelne Zuschlagkorn einmal mit einem Stößel beansprucht. Der Stößel mit einem Gewicht von 783 g wurde aus 25 mm Höhe auf das Zuschlagkorn fallen gelassen (ca. 0,2 J). Durch Siebung wurden anschließend die mengenreichsten Fraktionen bestimmt. Primärkörner wurden durch den Stößel kaum zerstört, die mengenreichste Fraktion 8/16 mm blieb erhalten (**Bild 6**).

Die Massen-Verteilungsdichte zeigt das Verhältnis des Massenanteils einer Fraktion zu ihrer Klassenbreite. Die ursprüngliche Fraktion 8/16 mm ist nach der Beanspruchung mit dem Stößel entweder noch erhalten, oder der Massenanteil anderer Fraktionen, bezogen auf die jeweilige Intervallbreite, nimmt zu (Zertrümmerung).

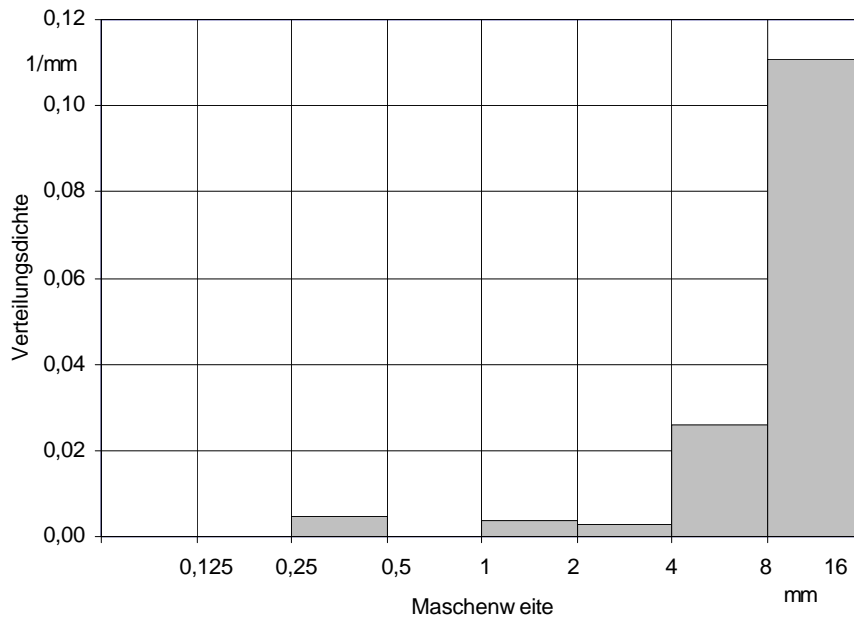


Bild 6: Entstandene Fraktionen nach Beanspruchung mit einem Stößel (Primärkörnungen 8/16 mm)

Die rezyklierten Gesteinskörnungen 8/16 mm wurden mit dem Stößel wesentlich stärker zertrümmert als die Primärkörnungen. Es entstanden viele Feinanteile (**Bild 7**).

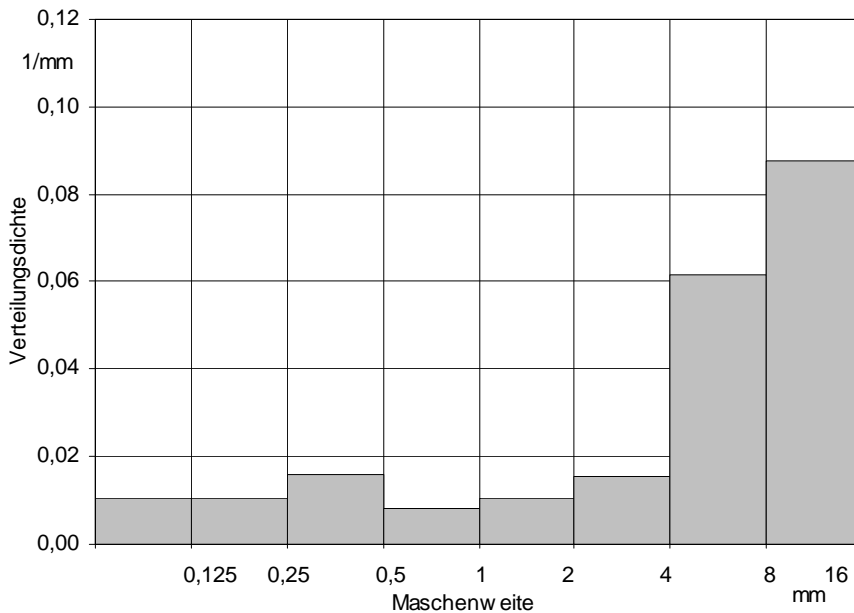


Bild 7: Fraktionen nach Zertrümmerung von rezyklierten Gesteinskörnungen 8/16 mm mit einem Stößel

Die Qualität der Recyclingprodukte kann durch den Aufschlussgrad $\mu_{AG,i}$ beschrieben werden. Ist ein Zuschlagkorn weitestgehend unbeschädigt aus der Zementsteinmatrix herausgelöst und besitzt es nicht mehr als 50 % Zementsteinanhaftungen, gilt es als aufgeschlossen. Der Aufschlussgrad wurde an den RC-Fraktionen 8/16 mm durch eine visuelle Beurteilung bestimmt (Auszählung). Verglichen wurden die RC-Fraktionen 8/16 mm aus Zerkleinerungsversuchen mit Brechern der Firmen *FAM Magdeburg* und

Martin Steckert Anlagen- und Verschleißtechnik GmbH sowie der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (**Bild 8**). Erreicht wurden über 50 M.-% aufgeschlossene Zuschlagkörner der Fraktion 8/16 mm, wobei der DAVID-Brecher der Fa. Steckert mit ca. 63 M.-% den höchsten Aufschlussgrad erreichte. Die erreichten Aufschlüsse bestätigen die Ergebnisse bereits vorliegender Untersuchungen an anderen Brechern [5].

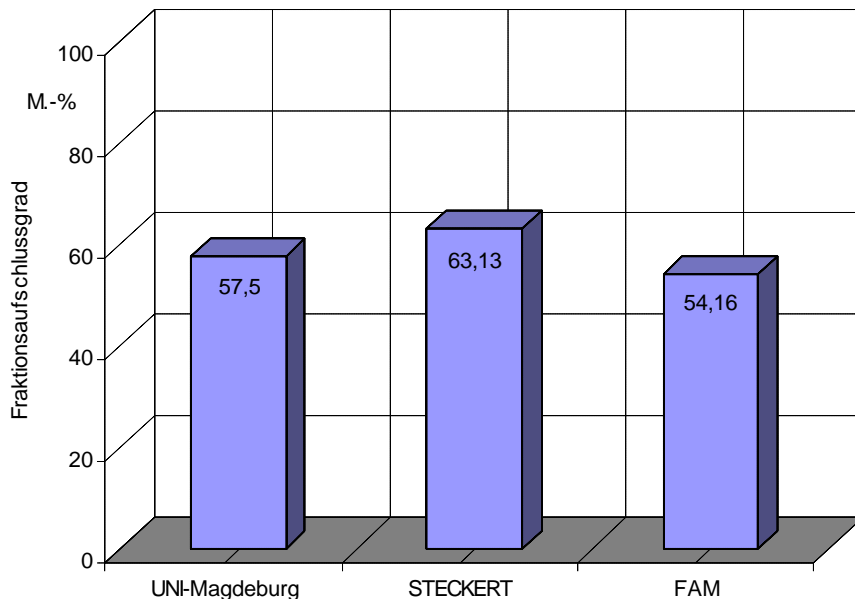


Bild 8: Fraktionsaufschlussgrad nach dem Zerkleinern mit verschiedenen Brechern

Um den Aufschluss der Zuschlagkörner noch näher zu bestimmen, wurden die Körner in *völlig aufgeschlossen*, *teilweise aufgeschlossen* und *nicht aufgeschlossen* unterteilt. Immerhin konnten bis zu 35 M.-% der Fraktion 8/16 mm völlig aufgeschlossen werden, d. h. das ursprüngliche Kieskorn wurde vollständig aus dem Zementsteinverbund herausgelöst (**Bild 9**). Kleinere Fraktionen wurden an dieser Stelle nicht untersucht.

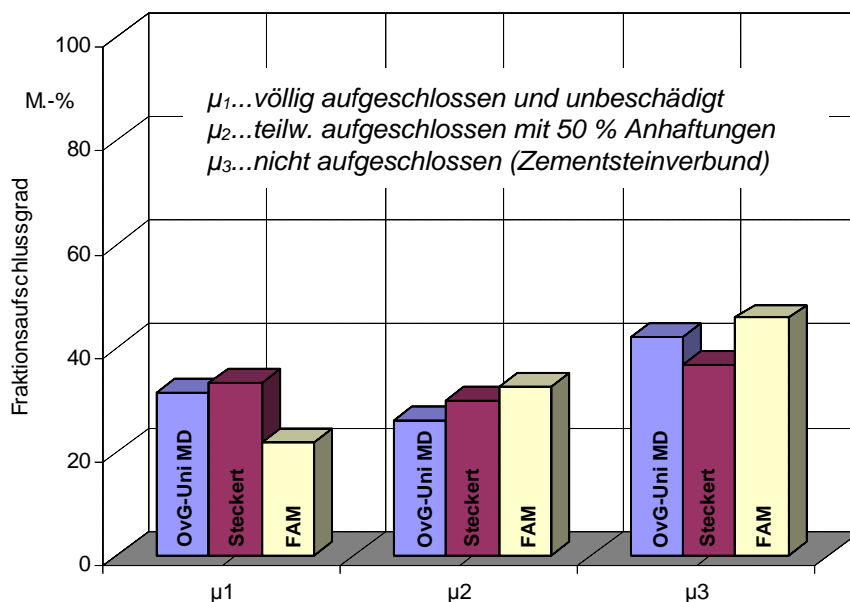


Bild 9: Fraktionsaufschlussgrade unterteilt in weitere Klassen m_1 , m_2 , m_3 ,

Im Landesmaterialprüfamt Sachsen-Anhalt wurden weitere Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen bestimmt (**Tabelle 1**): die Kornrohichte, der Schlagzertrümmerungswert, der Widerstand gegen Zertrümmerung nach dem Los-Angeles-Prüfverfahren, der Feinanteil nach dem Sandäquivalent-Verfahren, der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel und der Gehalt an säurelöslichen Chloriden [3].

Tabelle 1: Einhaltung der Regelanforderungen nach DIN 4226-100 [7]

	RC-Körnung	Regelanforderungen nach DIN 4226-100
Kornrohichte [g/cm ³]	2,60	mind. $2 \pm 0,15$
Schlagzertrümmerungswert [M.-%]	29,1	max. 32
Widerstand gegen Zertrümmerung [-]	37	max. 50
Feinanteile < 0,016 mm [M.-%]	17	max. 22
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel [M.-%]	7,2	max. 4,0
Säurelösliche Chloride [M.-%]	0,01	max. 0,04

Zusammenfassung und Ausblick

Das von der Stiftung Industrieforschung geförderte Forschungsvorhaben wurde von einem Arbeitskreis mit Vertretern von Firmen (Brecherhersteller, Gießereien, Betreiber von Baustoff-Recyclinganlagen) und Forschungseinrichtungen (Universitäten, Industrieverbände, Prüfämter) begleitet. Vorrangige Ziele der Weiterentwicklung von Prallbrechern für das Baustoffrecycling sind eine optimale Betonzerkleinerung zur Verbesserung der Produktqualität des Betonsplitts als Voraussetzung für geschlossene Stoffkreisläufe sowie eine bessere Leistungsausnutzung, eine höhere Verfügbarkeit und niedrigere Kosten der eingesetzten Maschinen. Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens sollen wissenschaftlich-technische Voraussetzungen für die praktische Umsetzung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes geschaffen werden.

Ziel muss es sein, den Anteil an hochwertigem Betonsplitt > 2 mm weiter zu erhöhen und den Anteil an unerwünschtem Brechsand < 2 mm zu vermindern. Nur so können Deponieraum und Ressourcen geschont werden. Hochwertiger Betonsplitt kann im Gemisch mit Naturzuschlägen zu Konstruktionsbeton verarbeitet werden. Der Markt bietet zwar spezielle Aufbereitungsanlagen für Betonbruch, aber der Brecher als Herzstück jeder Anlage ist noch zu wenig an das Zerkleinern von Beton angepaßt. Die Erfahrungen aus der Hartgesteinzerkleinerung sind nicht ohne weitere Untersuchungen auf die Betonzerkleinerung übertragbar. Die für Beton notwendige Zerkleinerungsenergie beträgt nur einen Bruchteil der durch die rotierenden Schlagleisten verursachten Beanspruchungsenergie. Bei der Zerkleinerung von Beton in den Recyclinganlagen entsteht noch zu viel Staub und minderwertiger Betonbrechsand, die „Ausbeute“ an hochwertigem Betonsplitt ist zu gering. Weiterer Untersuchungsbedarf besteht in der technischen Realisierung des Rückgewinns ursprünglichen Naturzuschlags.

Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie – Beton mit rezykliertem Zuschlag; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1998
- [2] MELLMANN, G.: Prüfbericht V.II 1/300101001 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin, Fachgruppe VII.1: Baustoffe; Projektgruppe VII.102 Technologie der Baustoffe, Jan. 2001
- [3] NEUMANN, J.: Untersuchungsbericht 2/223/056 des Landesmaterialprüfamt Sachsen-Anhalt, Fachgruppe Straßenbauprüfung, Arbeitsgebiet Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Zuschlag für Beton
- [4] POPPY, W.; JESCHKE, H.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Betonrecycling: Prallbrecher- und Produktoptimierung sowie Verschleißminimierung an den Schlagleisten. Förderung durch die Stiftung Industrieforschung, Nov. 2002
- [5] POPPY, W.; WACHSMANN, St.: DFG-Sonderforschungsbereich 385 „Baustoffrecycling“. Berichtsband zum Kolloquium des DFG-Sonderforschungsbereichs, Teilprojekt 1.3: Mechanische Zerkleinerungsmaschinen
- [6] DIN 4226-100 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel; Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen
- [7] KRÜGER, M.: Prüfung von Recyclingkörnungen aus der Betonzerkleinerung. Studienarbeit am Lehrstuhl für Baumaschinentechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Juli 2002