

Forschungsthema: “Schallimpulszerkleinerung – ein neues Verfahren zur selektiven Zerkleinerung von Beton“

Im folgenden sollen erste Ergebnisse des DFG-Forschungsprojekts „Leistungsfähigkeit der Schallimpulszerkleinerung für die Präparation von Mörtel- und Betonproben“ vorgestellt werden. Das Projekt ist eine Gemeinschaftsarbeit zwischen dem Lehrstuhl Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar und dem Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Einleitung

Beton ist ein Kompositwerkstoff mit näherungsweise isotropem Gefüge. Er besteht aus dem in der Korngröße abgestuften Zuschlag (80%) und dem Zementstein (20%), der die Verbindung zwischen den Zuschlagkörnern herstellt. Die Selektion der einzelnen Betonbestandteile kann aus zwei Aspekten von Bedeutung sein. Einerseits besteht in der Betonanalytik häufig die Notwendigkeit, die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile von erhärtetem Beton nachträglich zu ermitteln, um Ursachen von Betonschädigungen feststellen zu können. Zum anderen besteht auch im Betonrecycling die Forderung nach effektiven und gleichzeitig schonenden Aufbereitungstechniken, mit denen der Werkstoff Beton aufgeschlossen werden kann. Die konventionellen Zerkleinerungstechniken, beruhend auf mechanischer Beanspruchung sind hinsichtlich des erreichbaren Aufschlussgrades begrenzt. Durch die vorliegenden extremen Beanspruchungen wird außerdem eine starke Zerkleinerung des Zuschlags hervorgerufen.

Die Leistungsschallimpulszerkleinerung stellt ein Zerkleinerungsverfahren dar, welches diese Nachteile überwindet. Die Zuschläge werden nahezu unbeschädigt aus dem Gefüge herausgelöst, so dass ein hoher Aufschlussgrad erzielt werden kann.

Prinzip der Schallimpulszerkleinerung

Bei dem hier vorgestellten Zerkleinerungsverfahren wird die mechanische Energie eines Leistungsschallimpulses, der durch elektrische Entladung erzeugt wird, genutzt. Die in einem Kondensator zwischengespeicherte elektrische Energie wird über eine Unterwasserfunkenstrecke entladen. Nach dem elektrischen Durchschlag der Spannung fließt ein Strom, der zu einer explosionsartigen Aufweitung des Entladungskanals führt, so dass auf das umgebende Medium (Wasser mit dem zu zerkleinernden Material) ein Druck ausgeübt wird. Diese Druckwelle wird als Leistungsschallimpuls bezeichnet und breitet sich im Wasser als kurzweiliger Schall aus. Die Schallwellen werden an Grenzflächen zwischen zwei Medien aufgrund unterschiedlicher Dichten und Schallgeschwindigkeiten reflektiert, gestreut und transmittiert. Je nach Anzahl und Art der an einer Grenzschicht auftreffenden Wellen kommt es zu Überlagerungen der einlaufenden und reflektierten Wellen. Ist die reflektierte Welle der einlaufenden in Art und Amplitude gleich, so verstärken sich diese. Bei der Überlagerung von phasenverschobenen Wellen kommt es zu Auslöschungen der Impulse (Bild 1).

Tritt der Impuls von einem schallweicherem (Zementstein) in ein schallfesteres Medium (Zuschlag) ein (Bild 1-links), so kommt es zwischen einlaufenden und reflektierten Impuls zur Phasenumkehr und somit zu einer Impulsschwächung. Die entstehenden Zugspannungen können die Bindungskräfte zwischen erhärtetem Bindemittel und Zuschlag übersteigen. Dadurch erfolgt eine Trennung bevorzugt an den Grenzflächen.

Im Gegensatz zu mechanischen Zerkleinerungsverfahren erfolgt der Energieeintrag flächenhaft und kann durch die Einstellung der elektrischen Parameter so dimensioniert werden, dass der Zementstein vom Zuschlag abgetrennt wird, ohne dass die Zuschläge zerstört werden.

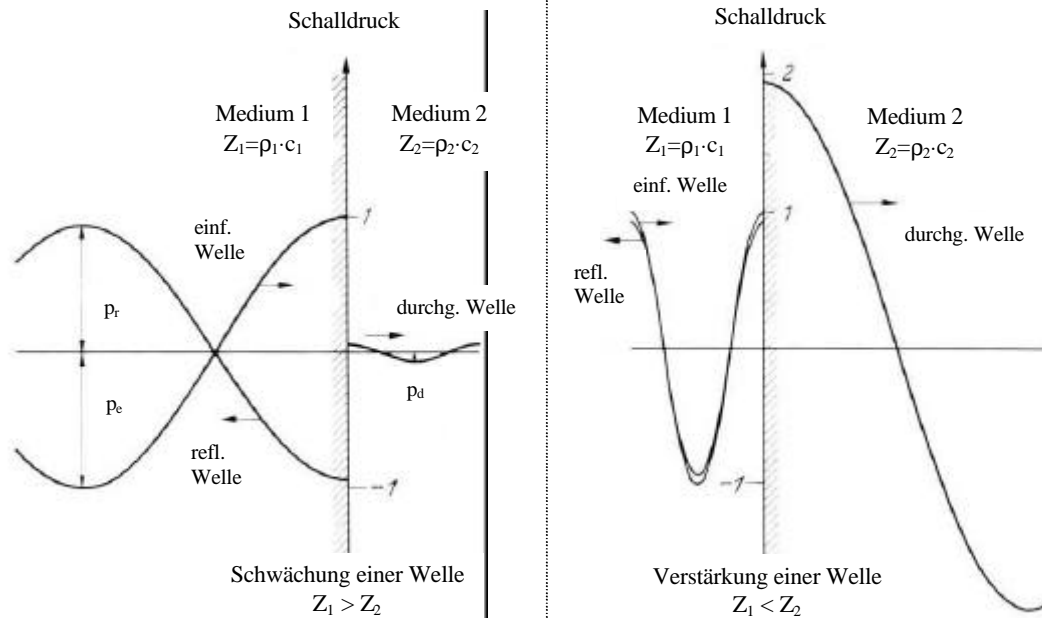


Bild 1: Darstellung der Schwächung und Verstärkung der Wellen an Dichtegrenzschichten /Kra 86/

Entstehende Risse verlaufen hauptsächlich entlang der Grenzflächen zwischen Zuschlagkorn und Zementstein. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens liegt in der berührungslosen Zerkleinerung.

Zielstellung und Versuchsprogramm

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, durch gezielte Einstellung der elektrischen Parameter einen höchstmöglichen Aufschlussgrad der Fraktionen > 2 mm zu erreichen. Es sollten erste Ergebnisse zum Einfluss der Betongüte auf den Aufschlussgrad ermittelt werden.

Bei den Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Zerkleinerungsverfahrens wurde in zwei Stufen vorgegangen:

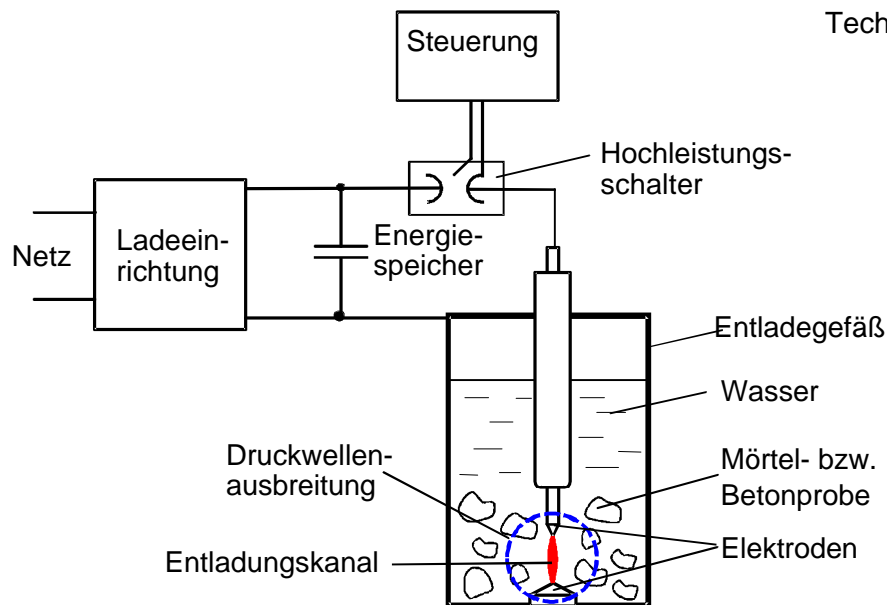
- In Voruntersuchungen wurden die elektrotechnischen Haupteinflüsse auf das Zerkleinerungsprodukt ermittelt. Dazu wurden zunächst reine Gesteinskörnungen, später ein Beton B25 zerkleinert, um die Zerkleinerungswirkung getrennt von der Aufschlusswirkung darzustellen.
- Bei der sich anschließenden Betonzerkleinerung bestand das Hauptziel der Untersuchungen in der Erzielung des höchstmöglichen Aufchlusses der im Zementsteingefüge gebundenen Zuschläge (Kies, Splitt, Sand). Ein vollständiger und 100 prozentiger Aufschluss ist erreicht, wenn keine Zementsteinmatrix mehr an den Zuschlägen anhaftet. Zerkleinert wurden Betone unterschiedlicher Herkunft und Druckfestigkeiten sowie Betone mit systematisch abgestuften Festigkeitswerten.

Die Beurteilung des Aufchlusses der groben Fraktionen 2-16 mm erfolgt augenscheinlich und chemisch. Die eindeutige Beurteilung des Aufchlusses der feinen Fraktionen < 2 mm ist mit diesen Methoden nicht möglich, da sich hier der chemisch gemessene Zementsteingehalt als Summe von Anhaftung und Anreicherung feiner Zementsteinpartikeln ergibt. Folglich kann für die Fraktion < 2 mm keine Aussage zur

Anreicherung gemacht werden. Deshalb liegt das Hauptaugenmerk der Auswertung auf den Fraktionen > 2 mm, zumal sich auch die Richtlinie des DafStb: „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ /Norm 98/ nur auf den Einsatz rezyklierter Zuschläge > 2 mm bezieht.

Versuchseinrichtung und -durchführung

Die Durchführung der Zerkleinerungsversuche wurde mittels der an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg entwickelten Versuchsanlage realisiert (Bild 2).



Technische Daten Entladegefäß:
Aufgabemenge: ca. 6 kg
Volumen: ca. 0,020 m³



Bild 2: Schematischer Aufbau und Foto der Versuchsanlage

Vorgehensweise

Das Vorgehen bei der Analyse des Zerkleinerungsproduktes und der Ermittlung der Bewertungsgrößen ist in Bild 3 dargestellt.

Der Aufbereitungserfolg bei Beton lässt sich nicht allein durch den Vergleich der Korngrößenverteilungen beurteilen. Hierfür wurden zusätzlich Kennwerte herangezogen, die Aussagen zur Menge des noch anhaftenden Zementsteins und zum Schädigungsgrad der herausgelösten Zuschläge machen.

Eine Aussage zum Aufschluss macht der Zementsteingehalt. Dieser wurde in Anlehnung an das Salzsäure-Löseverfahren nach DIN 52170 Teil 1-4 /DIN 80/ bestimmt. Der Aufschluss bewegt sich zwischen folgenden Grenzfällen:

- Vollständiger Aufschluss – an den Partikeln der betrachteten Fraktion haftet kein Zementstein an
- Kein Aufschluss – die Partikel sind Agglomerate aus Zementstein und Zuschlag mit einem Zementsteingehalt, welcher der ursprünglichen Betonzusammensetzung entspricht.

Bei den Schädigungen des Zuschlags kann zwischen einer reinen Korngrößenreduktion und einer Strukturschädigung unterschieden werden. Die Korngrößenreduktion bzw. Strukturschädigung kann nur exakt beurteilt werden, indem die Zementsteinanhaftungen an den Zuschlägen mittels Salzsäure entfernt werden und anschließend die Sieblinie bestimmt wird. Als Kennwert für die Korngrößenreduktion kann dann das Verhältnis charakteristischer Korngrößen des Ausgangszuschlags und des aus dem zerkleinerten Beton herausparierten Zuschlags dienen.

Vereinfachend kann dieser Kennwert auch aus den charakteristischen Korngrößen des Ausgangszuschlags und des zerkleinerten Betons ermittelt werden. Voraussetzung ist, dass nur die groben Fraktionen > 2 mm betrachtet werden, in denen die Zementsteinanhaftungen < 5 % bleiben und keine Agglomeratbildung stattfindet. Die Mikrostrukturschädigungen lassen sich vereinfacht durch vergleichende Messungen der Wasseraufnahme ermitteln.

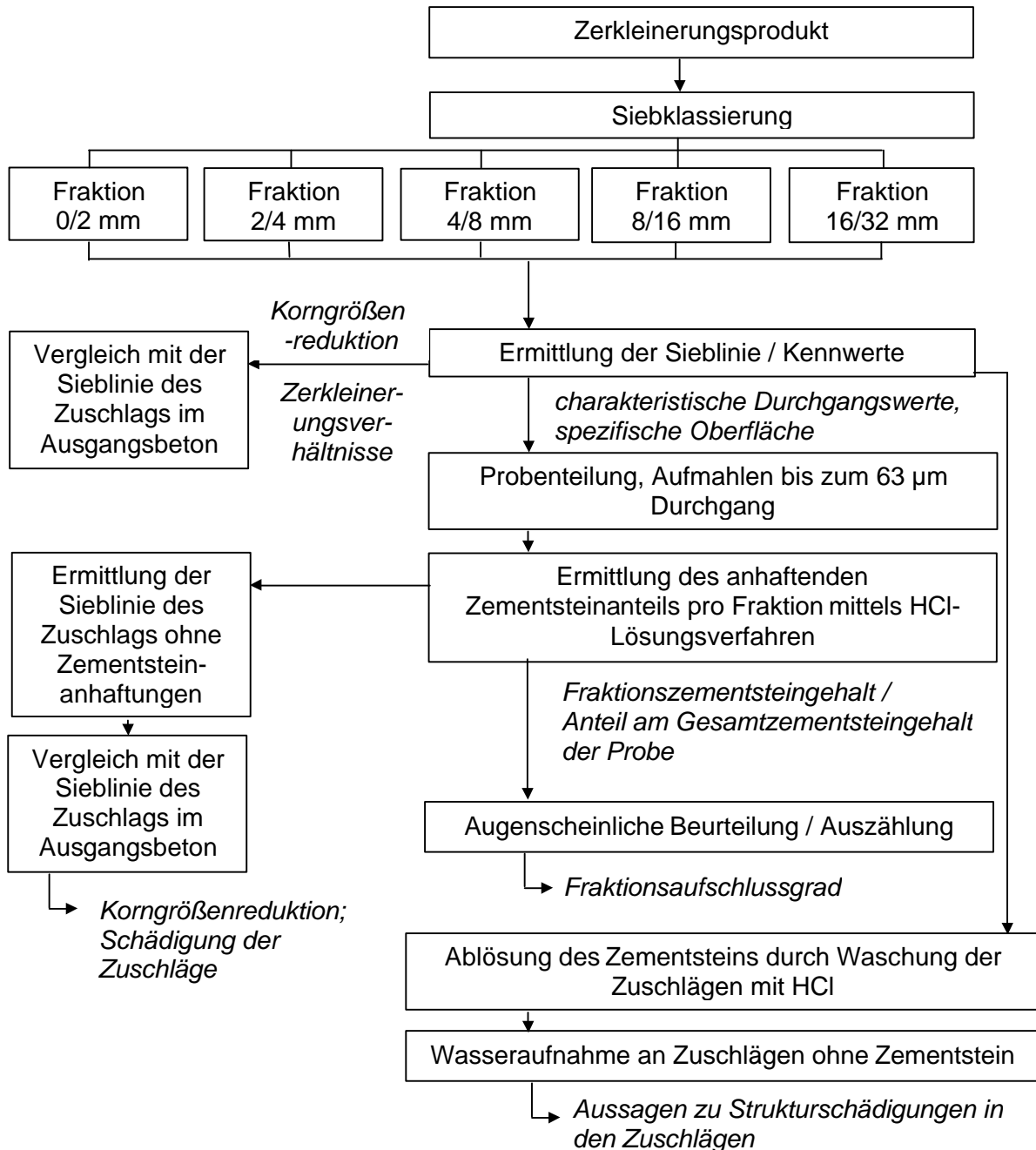











Bild 3: Vorgehensweise bei der Analyse und Bewertung des Zerkleinerungsproduktes

In der Tabelle 1 sind die Kennwerte für die Bewertung der Aufschlusszerkleinerung von Beton zusammengestellt. Ergänzend sind typische „Zustände“ für die erzeugten Sekundärzuschläge und ihre Verwertbarkeit dargestellt.

Tabelle 2: Parameter zur Bestimmung der Separation der Betonbestandteile

Zu bestimmender Effekt und verwendete Parameter	Typische Zustände		
Separation von Zuschlag und Zementstein <i>Zementsteingehalt c_i</i>	vollständige Separation $c_i = 0$		Zuschlagpartikel ohne Zementsteinanhaftungen; Idealfall
	teilweise Separation $0 < c_i < c_{\text{Beton}}$		Zuschlagpartikel mit teilweisen Zementsteinanhaftungen; mit Einschränkungen für die Herstellung von Recycling-Beton einsetzbar
	keine Separation $c_i = c_{\text{Beton}}$		Zuschläge bilden Agglomerate mit der Betonzusammensetzung des Ausgangsbetons; nicht einsetzbar für das Betonrecycling
Korngrößenreduktion der Zuschläge <i>Verhältnisse der charakteristischen Kennwerte</i> $r_m = \frac{x_{m,\text{Ausgang}}}{x_{m,\text{Zerkleinerungsprodukt}}} \text{ und}$ $r_{90} = \frac{x_{90,\text{Ausgang}}}{x_{90,\text{Zerkleinerungsprodukt}}}$	$r_m = r_{90} = 1$		Idealfall, da keine Zuschlagschädigungen
	$r_m < r_{90} < 1$		Geringe Zerkleinerung der Zuschläge; Agglomerate
	$r_m > r_{90} > 1$		Starke Zerkleinerung der Zuschläge; Schädigung der Zuschläge
Schädigung der Zuschläge <i>Verhältnisse der Mittelwerte nach modellhaftem Abzug des Zementsteins im Zerkleinerungsprodukt</i> $r_{m,\text{generiert}} = \frac{x_{m,\text{Ausgang}}}{x_{m,\text{Zerkleinerungsprodukt ohne Zementstein}}}$	$r_{m,\text{generiert}} = 1$		Idealfall, keine Schädigung der Zuschläge in Form von Absplitterungen
Schädigung der Mikrostruktur <i>Verhältnis der Wasseraufnahmen</i> $s = \frac{\text{Wasseraufnahme}_{\text{Zerkleinerungsprodukt}}}{\text{Wasseraufnahme}_{\text{Zuschläge}}}$	$s = 1$		Idealfall
	$s > 1$		Strukturschädigungen

Formelzeichen: c_i Zementsteingehalt pro Fraktion i in %
 c_{Beton} Zementsteingehalt im Ausgangsbeton in %

Versuchsbegleitend wurde aus dem Spannungs- und Stromverlauf der für die Zerkleinerung wirksame Energieeintrag und die Stabilität des Energieumsatzes ermittelt. Nach ZANGE /Zan 00/ ist für das Zerkleinerungsergebnis letztendlich nicht die bei den verschiedenen Parameterkombinationen auf dem Kondensator gespeicherte Energiemenge maßgeblich, sondern die im Funken umgesetzte Energiemenge. Diese entspricht der aus dem Leistungszeitverlauf (P_F) gewonnenen elektrischen Bezugsgröße W_{Fp}/t_{aPF} , die als druckwirksamer Leistungskennwert bezeichnet wird. Dieses Verhältnis (W_{Fp}/t_{aPF}) kann als anlagenunabhängiges Maß der Druckamplitude für Vergleiche genutzt werden (Bild 4). Durch die Wiederholung n der Impulse kommt es zu einer Summenwirkung der

Impulse, weshalb als integrale Bezugsgröße für die insgesamt umgesetzte Energiemenge der Wert $n \cdot W_{FP} / t_{aPF}$ gewählt wurde.

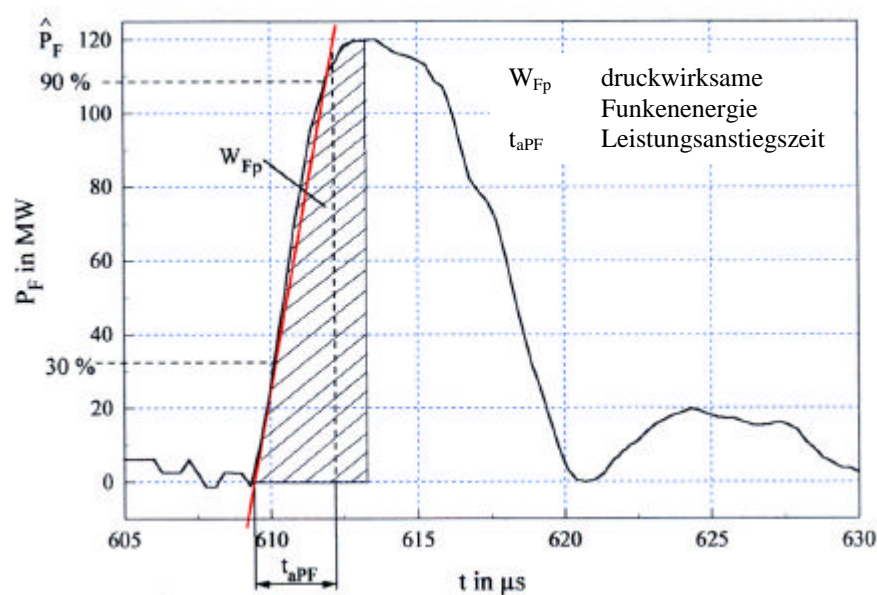


Bild 4: Darstellung der Bezugsgröße W_{FP} / t_{aPF} – druckwirksamer Leistungskennwert /Zan 00/

Ergebnisse

Im folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse zur Betonzerkleinerung dargestellt. Zunächst wurde mittels eines statistischen Versuchsplans der Einfluss der Entladeparameter auf das Zerkleinerungsprodukt untersucht. Dazu wurden die elektrischen Parameter nach einem vollständigen Versuchsplan der Form 2^3 gleichzeitig und zufällig variiert. Ziel der Versuche war es, die bekannte Ausgangssieblinie des Betons so gut wie möglich anzunähern und gleichzeitig einen hohen Aufschluss zu erzielen. Als Zerkleinerungsgut diente ein B25 (Zusammensetzung laut Tabelle 2) mit einer Ausgangssieblinie der Zuschläge im günstigen Sieblinienbereich AB16.

Tabelle 2: Zusammensetzung des Beton B 25

Eigenschaft / Bestandteil	Wert
CEM I 32,5 R [kg/m ³]	300
Wasser [kg/m ³]	180
Zuschlag [kg/m ³]	1902
w/z-Wert	0,6
Gesamtporosität [Vol-%]	13,8
Druckfestigkeit [N/mm ²]	36,0
E-Modul [kN/mm ²]	33,0

In Bild 5 sind die bei unterschiedlichen Entladeparameter-Kombinationen entstandenen Korngrößenverteilungen nach der Zerkleinerung dargestellt.

Die Auswertung des statistischen Versuchsplans ergab, dass die elektrischen Parameter Impulsanzahl n und Ladespannung U_0 sowie deren Wechselwirkung den größten Einfluss auf die Korngrößenreduktion der Zerkleinerungsprodukte haben. Diese Aussage konnte für die Zerkleinerung von reinen Gesteinskörnungen und Beton gleichermaßen festgestellt werden.

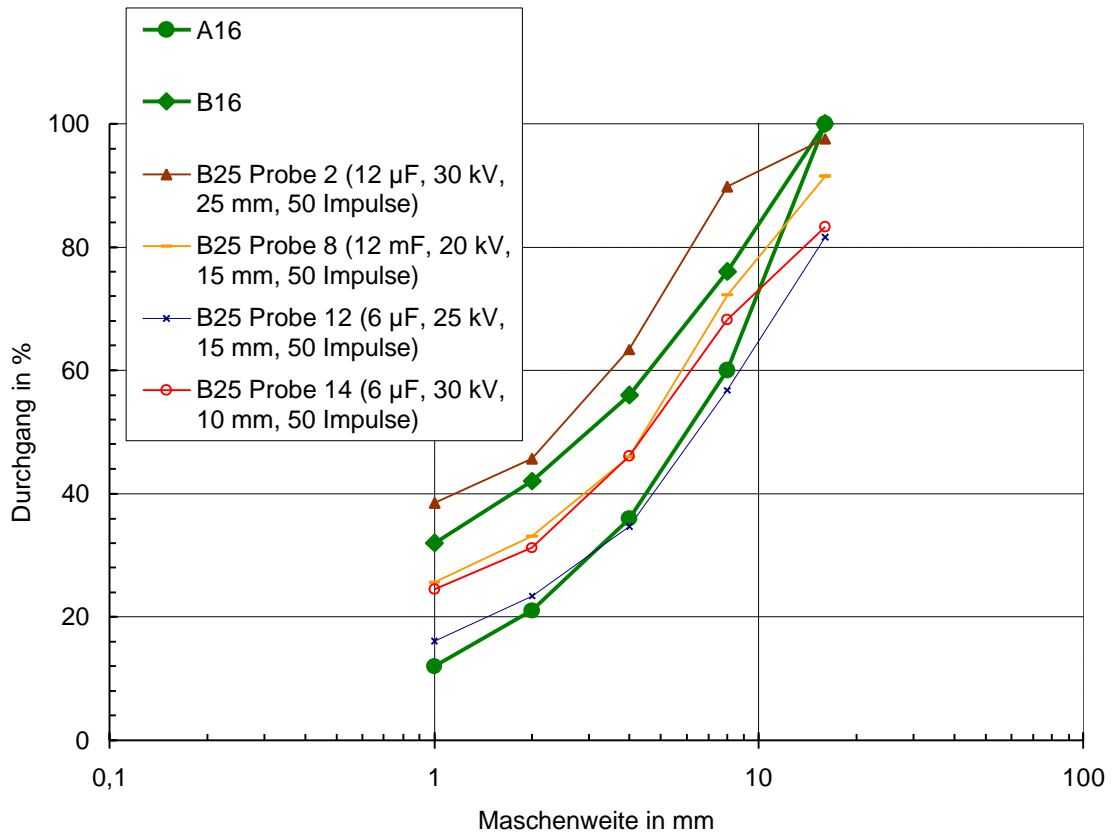


Bild 5: Vergleich ausgewählter Korngrößenverteilungen (Fraktion 2 bis 16 mm) nach der Schallimpulszerkleinerung des Betons B25 mit verschiedenen Entladeparameter-Einstellungen mit den Regelsieblinie A16 und B16

Für die Bewertung des Aufbereitungserfolges von Altbeton B25 können die in den Bildern 6 und 7 dargestellten Fraktionszementsteingehalte und das Verhältnis der mittleren Korngrößen r_m dienen.

Es ergibt sich eine optimale Zerkleinerung bei einem Korngrößenreduktions-Verhältnis $r_m=1$. Daraus lässt sich für den zerkleinerten Beton B25 ein optimaler druckwirksamer Leistungskennwert von ca. 10 kJ/µs abschätzen (Bild 6). Sollen die Zuschläge aufgeschlossen werden, so muss mehr Energie eingebracht werden. Aus Bild 7 ist ersichtlich, dass der Anteil am Gesamtzementsteingehalt mit zunehmendem druckwirksamen Leistungskennwert abnimmt. Bei einem Wert von ca. 13 kJ/µs werden für alle Fraktionen > 1 mm der geringsten Zementsteingehalte erreicht. Es findet eine Differenzierung zwischen den Fraktionen statt, d.h. es muss zwischen einer Anreicherung von Zementstein in der Fraktion < 1mm und einer Abreicherung in den übrigen Fraktionen unterschieden werden.

Für den zerkleinerten B25 konnte der günstige Bereich für Zerkleinerung und Aufschluss zwischen 10 und 13 kJ/µs ermittelt werden. Innerhalb diese Bereichs gilt es, zwischen schonender und effektiver Zerkleinerung zu optimieren.

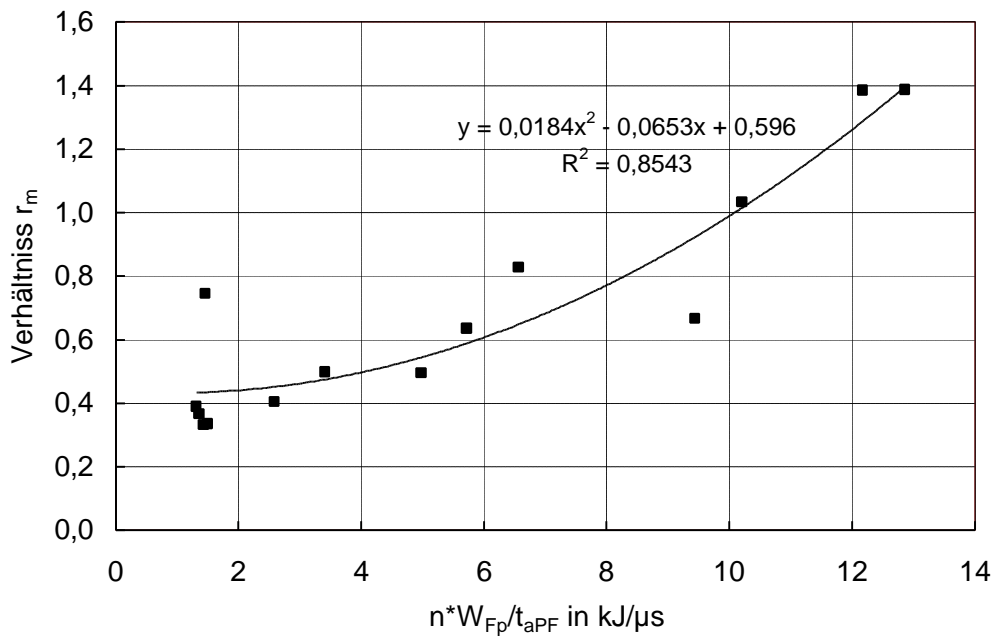


Bild 6: Verhältnis für die Korngrößenreduktion r_m in Abhängigkeit vom Produkt $n \cdot W_{Fp}/t_{aPF}$ (B25, AB16)

Gesamtzementsteingehalt ≈ 20 M.-%

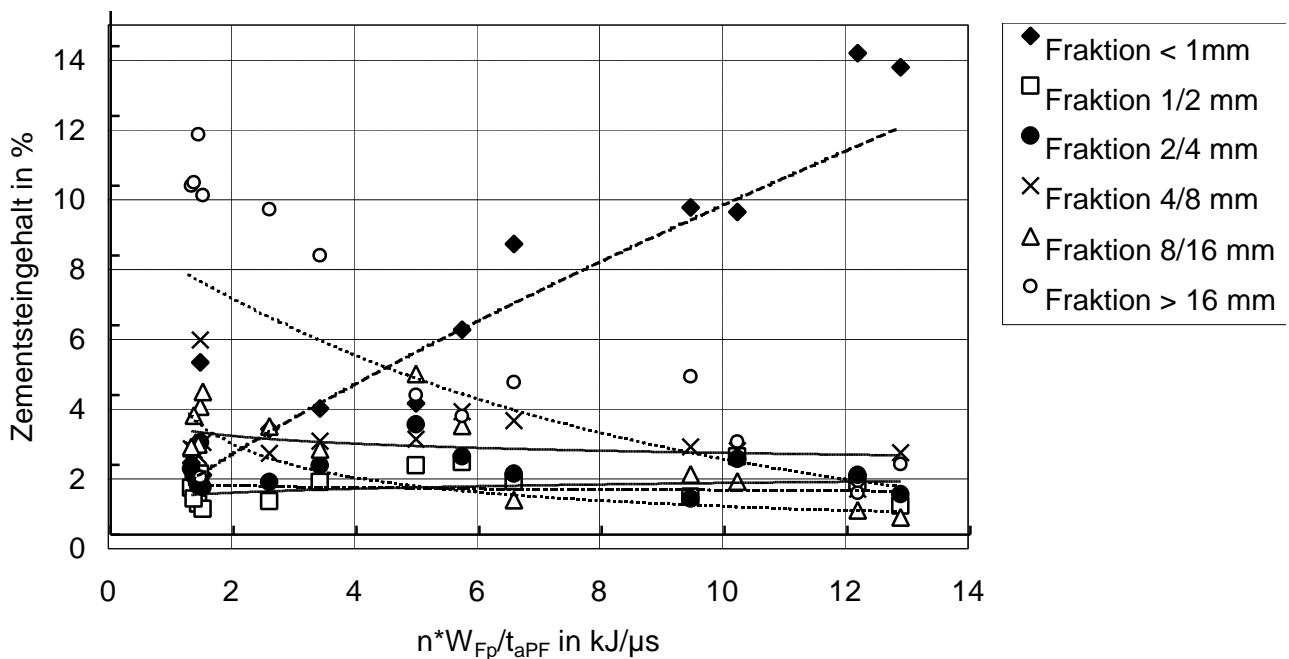


Bild 7: Anteil des Zementsteins pro Fraktion am Gesamtzementsteingehalt der Probe in Abhängigkeit vom Produkt $n \cdot W_{Fp}/t_{aPF}$ (B25, AB16)

Der Vergleich der Wasseraufnahmen des Ausgangszuschlags und des vom Zementstein befreiten Zerkleinerungsprodukts sollte Hinweise auf eine mögliche Mikrostrukturenschädigung der Zuschläge geben. Bisher konnte kein eindeutiger Beweis für eine erhöhte Wasseraufnahme der durch Schallimpulse zerkleinerten Zuschläge, die auf Mikrorißbildung hinweisen, geliefert werden. Weitere Versuche dazu werden sich anschließen.

Bei der Zerkleinerung von Betonen unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzungen fiel auf, dass offensichtlich keine alleinige Beziehung zwischen Druckfestigkeit und Zerkleinerungsverhalten besteht. So ließ sich beispielsweise ein hochfester B105 genauso gut wie ein B25 zerkleinern (Bild 8). Der B55 konnte im untersuchten Bereich der Entladeparameter nur schwer zerkleinert werden.

Die Ursachen für die unterschiedliche Wirkung der Schallimpulszerkleinerung sind im elastisch-plastisch-viskosen Stoffverhalten des Betons zu suchen. Tendenziell lassen sich Betone der mittleren Festigkeitsklassen aufgrund ihrer hohen Zähigkeit am schwierigsten zerkleinern. Hochfeste Betone dagegen sind wegen des geringen w/z -Wertes sehr spröde und lassen sich deshalb leicht zerkleinern, wogegen niedrigfestere Betone aufgrund der geringen Druckfestigkeit leicht zu zerkleinern sind.

In weiteren Versuchen wurde die Druckfestigkeit systematisch variiert, indem in der Rezeptur nur der w/z -Wert und die Zementfestigkeit geändert wurden. Es konnte festgestellt werden, dass es im Prozessraum während der Entladung zu keiner vollständigen Vermischung der Probe kommt. Aus diesem Grund wurde ein Proben-Durchfluss in Form einer Intervallbelastung getestet. Parallel zur Impulsanzahl von 50 wurde zum Vergleich ein Intervall von 20/10/20 Impulsen gewählt, wobei nach jedem Intervall der Prozessraum vollständig geleert wurde und die Probe erneut zugeführt wurde. Die Zerkleinerungsprodukte nach der Intervallbelastung weisen eine günstigere Korngrößenverteilung verglichen mit den Korngrößenverteilungen nach einer Normalbelastung auf (Bild 9). Weitere Versuche an Betondruckfestigkeiten von 35 – 55 N/mm² werden sich anschließen.

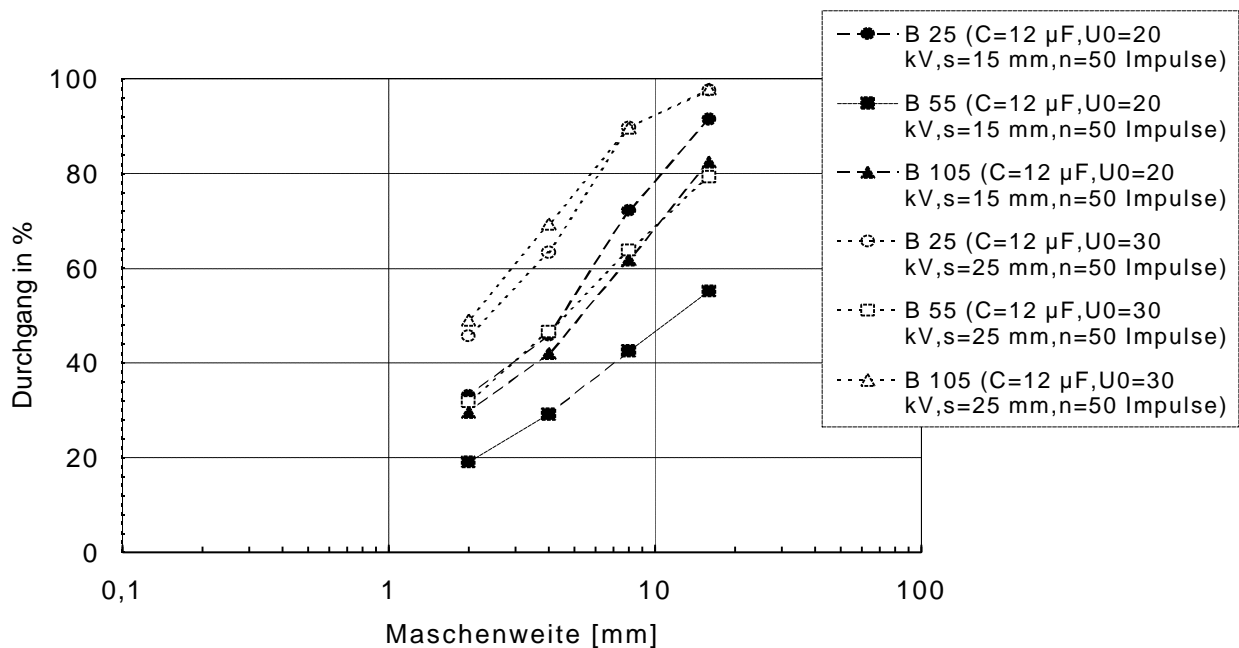


Bild 8: Vergleich der Korngrößenverteilungen nach der Schallimpulszerkleinerung verschiedener Betonfestigkeiten bei den Einstellungen $C=12\mu F$, $U_0=20kV$, $s=15mm$, $n=50$ und $C=12\mu F$, $U_0=30kV$, $s=25mm$, $n=50$

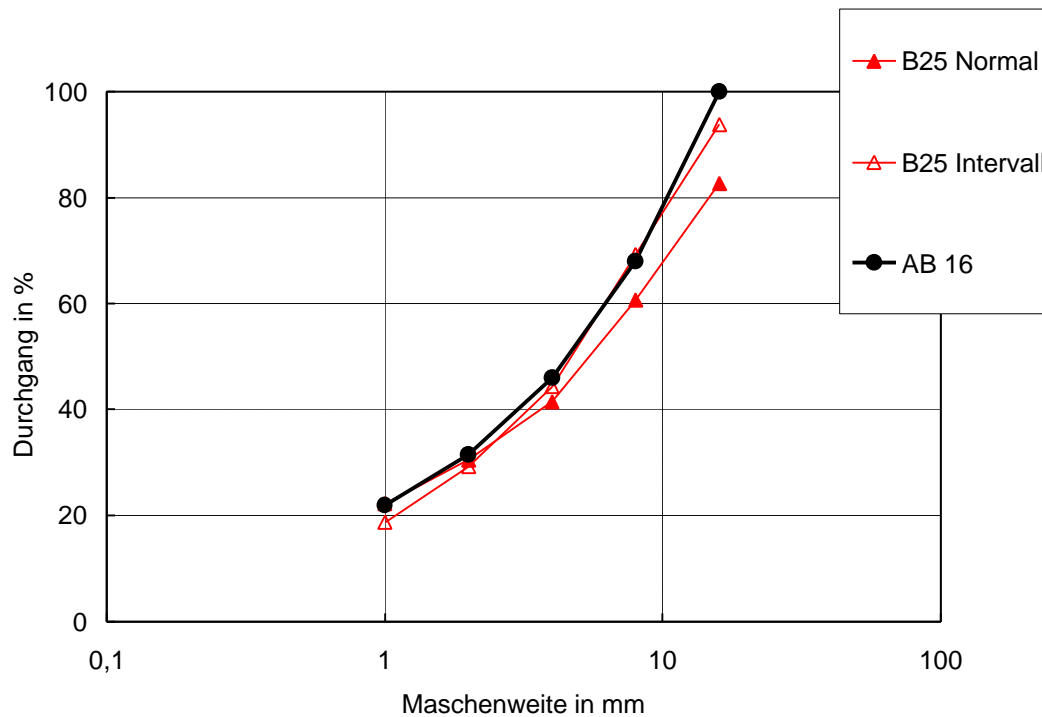


Bild 9: Vergleich der Korngrößenverteilungen nach der Schallimpulszerkleinerung Von B25 bei den Einstellungen *Normal* $C=12\mu F$, $U_0=20kV$, $s=15mm$, $n=50$ und *Intervall* $C=12\mu F$, $U_0=30kV$, $s=25mm$, $n=20/10/20$ mit der Ausgangssieblinie AB16

Vorteile der Schallimpulszerkleinerung verglichen mit konventionellen mechanischen Zerkleinerungsverfahren

Das Zerkleinerungsprodukt weist eine hohe Qualität auf, gekennzeichnet durch einen etwa vier mal höheren Aufschlussgrad, verglichen mit herkömmlichen Zerkleinerungsverfahren (beispielsweise Backen- und Prallbrecher) und eine sehr gute Separation der Betonbestandteile. Damit sind einerseits die Voraussetzungen für eine hochwertige Wiederverwertung der Zuschläge ohne Einschränkungen erfüllt. Andererseits kann dadurch eine leichtere und genauere Analyse der Festbetonbestandteile Zuschlag und Zementstein ermöglicht werden. Das folgende Bild 10 zeigt das entstandene Kornband nach der Schallimpulszerkleinerung für einen Beton B25.



Bild 10: Beispiel der entstandenen Kornfraktionen nach der Schallimpulszerkleinerung (B25, AB16)

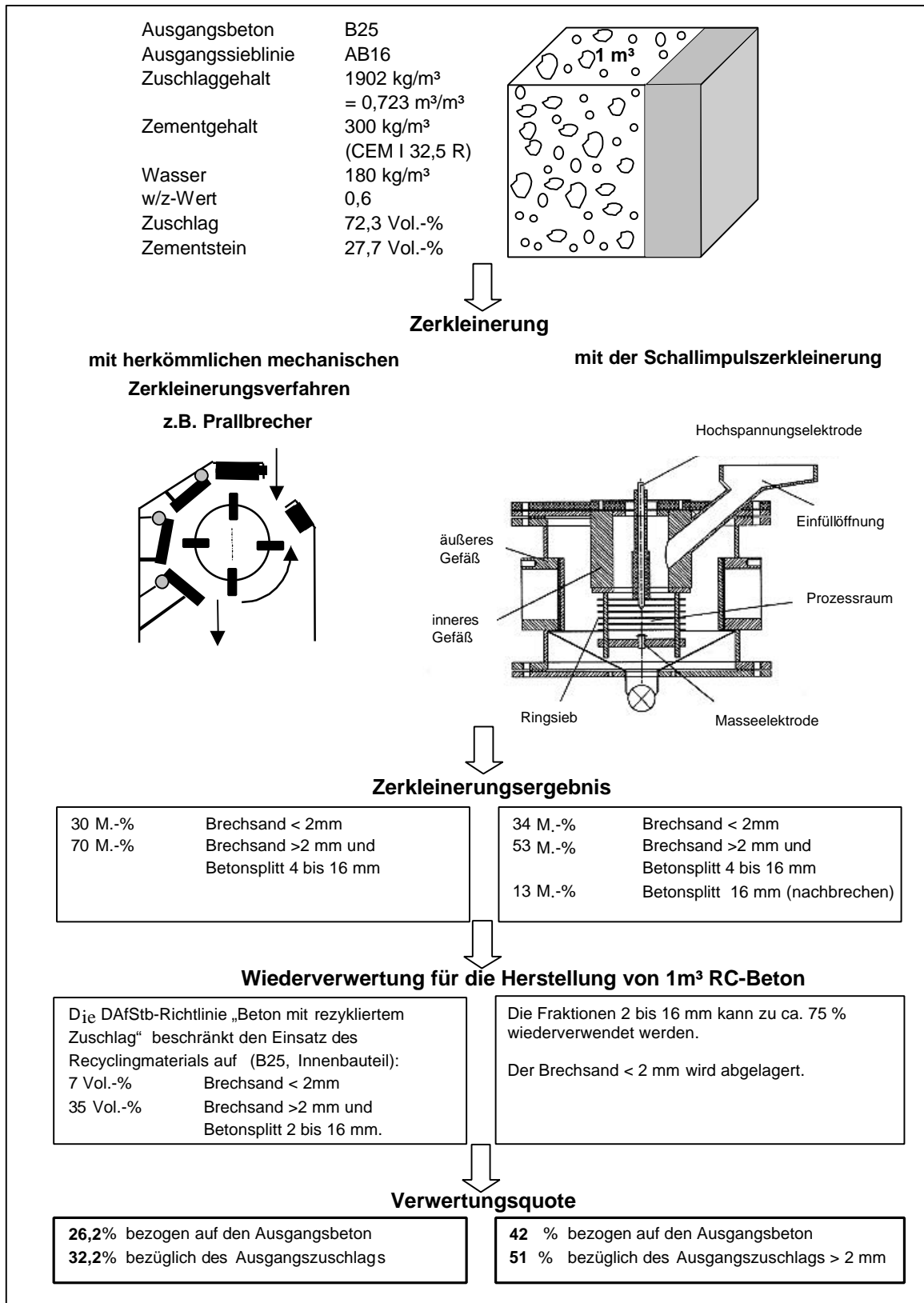


Bild 11: Vergleich Verwertungsquoten und -bilanzen für 1 m³ Beton von herkömmlichen mechanischen Zerkleinerungsverfahren und der Schallimpulszerkleinerung /Mül 98/

Mit dem Verfahren der Schallimpulszerkleinerung lässt sich die Verwertungsquote für die Zerkleinerung von Beton um 16 % von 26 % (bei mechanischer Zerkleinerung) auf 42 % steigern (Bild 11).

Fragestellung für nachfolgende Untersuchungen ist:

Welchen Einfluss hat die Beschaffenheit der Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein und das Betonalter auf die Wirkung der Schallimpulse?

Hierfür werden systematisch variierte Betonzusammensetzungen zerkleinert und analysiert.

Zusammenfassung

Die Vorteile des Schallimpulsverfahrens gegenüber den herkömmlich angewendeten Zerkleinerungsverfahren wurden für unterschiedliche Betone nachgewiesen. Die hohe Qualität der Zerkleinerungsprodukte ist einerseits erkennbar an einem wesentlich höheren Zementstein-Anreicherungsseffekt in der Sandfraktion <1 mm und andererseits an der weitestgehenden Nichtbeschädigung der Zuschläge. Der Anreicherungsseffekt des Zementsteins kann für die Probenpräparation genutzt werden, um Zementart und -gehalt im Gegensatz zu den gängigen Betonanalyseverfahren (Lösungsverfahren) unabhängig von der mineralischen Zusammensetzung der Zuschläge zu bestimmen.

Es sind mindestens 50 – 75 % zementsteinfreie Zuschläge > 4 mm herstellbar, was bedeutet, dass die Zuschläge in ihrer ursprünglichen Qualität wiedergewonnen und eingesetzt werden können.

Literatur

- /Zan 00/ Zange, R.: Anwendungsbezogenes Prozessmodell der Wandlung elektrischer Energie in Energie des Leistungsschallimpulses. Dissertation O-v-G-Universität Magdeburg, 2000
- /Kra 86/ Krautkrämer J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. überarb. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1986
- /DIN 80/ DIN 52170 T.1 –4: Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton. Februar 1980
- /Mül 98/ Müller, Ch.: Anforderungen an Werkstoffe für kreislaufgerechtes Bauen. Vortrag auf dem 20. Aachener Baustofftag, Aachen, März 1998
- /Norm 98/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DafStb Richtlinie Teil 1 und Teil 2: Beton mit rezykliertem Zuschlag. August 1998

Verfasser:

Dipl.-Ing. E. Linß; Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung,
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystraße 7, 99423 Weimar

Prof. Dr.-Ing. G. Wollenberg; Dr.-Ing. H.-P. Scheibe
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und EMV, O.-v.-G.-Universität Magdeburg
Postfach 4120, 39016 Magdeburg