

## **Forschungsthema: “Elektrohydraulische Zerkleinerung von Altbeton – neue Ergebnisse und Perspektiven“**

### **1 Einleitung**

Konstruktions- und Abbruchabfälle haben mit ca. 60 Masse-% einen wesentlichen Anteil am Gesamtabfallaufkommen der Bundesrepublik Deutschland. In Deutschland fielen im Jahr 1999 rund 80 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfälle an (ohne Bodenaushub) /SBA/. Aus den darin enthaltenen 45 Mio. Tonnen Bauschutt wurden etwa 64 % Recyclingbaustoffe hergestellt. Jedoch muss hierbei eher von einem Downcycling gesprochen werden. Die aufbereiteten mineralischen Abbruchabfälle werden vorwiegend im Erd- und Landschaftsbau (ca. ein Drittel), als Trag- bzw. Frostschutzschichten (ca. ein Drittel) und zu einem weiteren Drittel für Sonstiges und Lagerbestände eingesetzt /Kra02/. Hierfür hat sich die Aufbereitung von mineralischen Abbruchabfällen mittels Backen- und Pralldreher etabliert. Der hohe Zementsteingehalt des Sekundärmaterials bringt durch den Verfestigungseffekt aufgrund der Resthydraulizität sogar einige Vorteile mit sich /Nat00/.

Nach der Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton und der DIN 4226-100 ist es schon seit einiger Zeit möglich, rezyklierte Zuschläge für die Herstellung von Beton einzusetzen. In diesem Anwendungsfall stellt sich der hohe Zementsteingehalt der mit konventionellen Zerkleinerungsverfahren aufbereiteten Sekundärzuschläge als Problem dar (höhere Wasseraufnahme und verringerte Kornfestigkeit). Die bekannten konventionellen Zerkleinerungstechniken, die für die Natursteinzerkleinerung entwickelten wurden, beruhen auf mechanische Beanspruchung und sind hinsichtlich des erreichbaren Aufschlussgrades begrenzt. Diese Verfahren bewirken vorwiegend eine Reduzierung der Korngröße, jedoch keine Selektion. Durch die vorliegenden extremen punktuellen Beanspruchungen wird außerdem eine starke Zerkleinerung des Zuschlags hervorgerufen. Eine selektive Trennung von Bindemittel und Zuschlag kann damit nicht erreicht werden.

Durch die Verbesserung und Entwicklung von Aufbereitungsverfahren für mineralische Abbruchabfälle kann die Wiederverwertungsquote weiter gesteigert und vor allem die Qualität der aufbereiteten Recyclingbaustoffe erhöht werden. Die elektrohydraulische Zerkleinerung stellt ein innovatives Aufbereitungsverfahren dar, mit dem die Qualität der Sekundärzuschläge >2 mm wesentlich gesteigert werden kann. Die Zuschläge werden nahezu vollständig und unbeschädigt vom Zementstein befreit.

### **2 Zielstellung des Projektes**

Ziel der Forschungsarbeiten war es, durch gezielte Einstellung des Energieeintrags die bestmögliche Qualität der Fraktionen >2 mm zu erreichen. Dafür mussten zunächst ein optimaler Arbeitsbereich für die Altbetonzerkleinerung festgelegt und wichtige Einflussgrößen ermittelt und untersucht werden. Für die Projektpartner bestehen unterschiedliche Aufgabenstellungen.

An der Universität Magdeburg wird an der Stabilisierung der Energiebereitstellung und der Steigerung der Bauteillebensdauer geforscht. Die baustoff- und recycling-technischen Eigenschaften der Sekundärzuschläge sowie der Einfluss der Betoneigenschaften auf das Zerkleinerungsprodukt stehen für die Forschungsarbeiten an der Universität Weimar im Vordergrund.

### 3 Prinzipdarstellung und Stand der Technik

Bei der hier vorgestellten elektrohydraulischen Zerkleinerung wird die mechanische Energie eines Leistungsschallimpulses, der durch elektrische Entladung erzeugt wird, als Zerkleinerungswerkzeug 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, sodass 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. Die entstehenden Druck- und Zugspannungen übersteigen die Bindungskräfte zwischen erhärtetem Bindemittel und Zuschlag. Die Trennung erfolgt deshalb bevorzugt an den Grenzflächen. Entstehende Risse verlaufen hauptsächlich entlang der Grenzflächen zwischen Zuschlagkorn und Zementstein (Bild 1). 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. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens liegt in der berührungslosen Zerkleinerung.

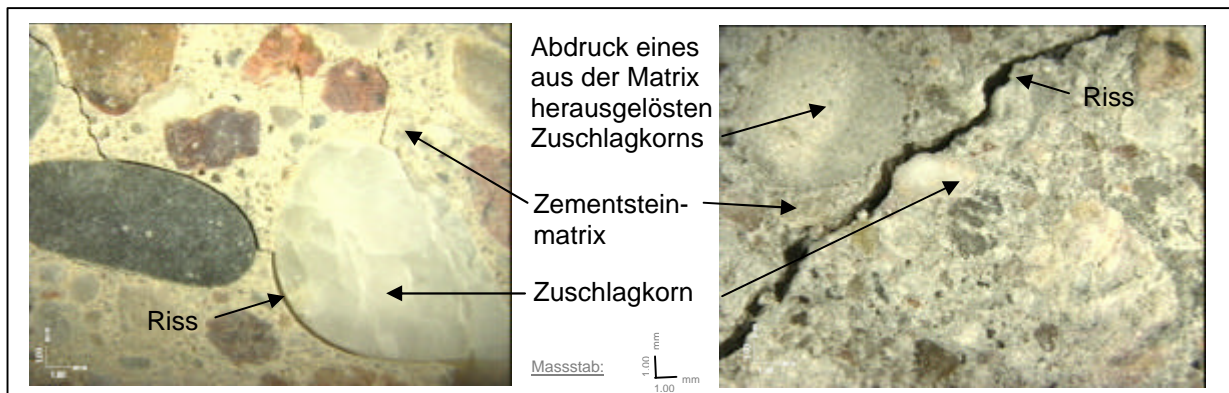


Bild 1: Rissverlauf entlang der Grenzflächen zwischen Zuschlag und Zementstein

#### 3.1 Versuchseinrichtung und -durchführung

Die Zerkleinerungsversuche wurden anfangs mit der an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bereits vorhandenen Versuchsanlage durchgeführt (Bild 2). Später wurde innerhalb des Projektes in Zusammenarbeit mit der Firma PSK GmbH eine neue, verbesserte Versuchsanlage aufgebaut und für die Versuche eingesetzt (Aufgabemenge: 6 kg, Volumen 0,02 m<sup>3</sup>) (Bild 3).

Der Ablauf der elektrohydraulischen Zerkleinerung gliedert sich in 2 Phasen:

- die Vorzerkleinerung, die nach dem gleichen Prinzip im Trockenzustand stattfindet (Bild 2, drittes Bild v.l.) und
- die Aufschlusszerkleinerung, bei welcher der vorzerkleinerte Beton im Nasszustand, d.h. im Wasser liegend behandelt wird (Bild 3).

Nach der Behandlung wird das Ventil geöffnet und das Wasser mit den Feinstbestandteilen der Probe fließt in den Behälter. Die größeren Bestandteile werden durch die obere Öffnung entnommen. Die nasse Probe wird durch Sedimentation, Trocknung, Siebung für die sich anschließenden Analysen vorbereitet.

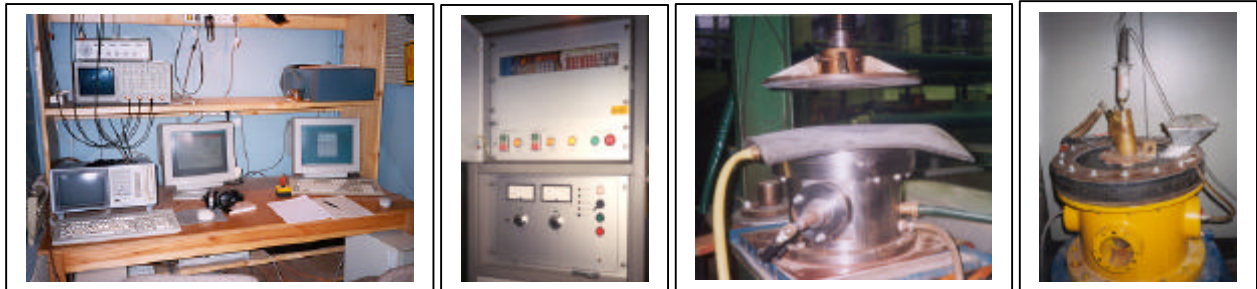


Bild 2: Fotos der vorhandenen Versuchsanlage an der Universität Magdeburg v.l.n.r.: Messkabine, Schaltschrank, Vorrichtung zur Vorzerkleinerung, Gefäß für die Aufschlusszerkleinerung

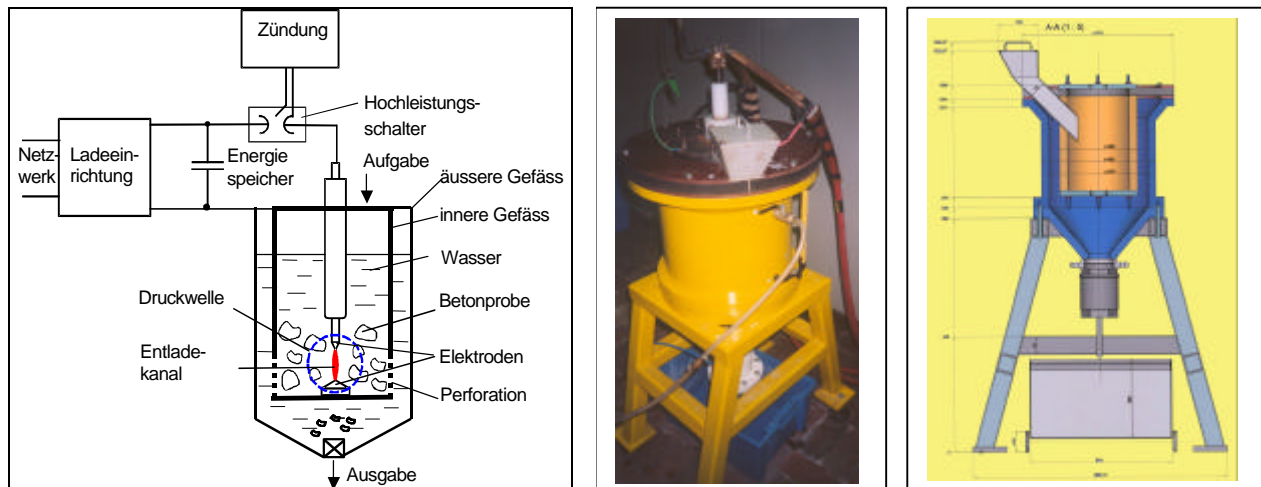


Bild 3: v.l.n.r.: Schematischer Aufbau, Foto und Zeichnung der neuen Versuchsanlage

#### 4 Auswertegrößen zur Beurteilung des Aufbereitungserfolges

Die Auswertegrößen lassen sich einteilen in aufbereitungstechnische und elektrotechnische Kennwerte (Bild 4).

Der Aufbereitungserfolg wurde zum einen durch den Vergleich der Korngrößenverteilungen beurteilt, zum anderen wurden zusätzlich Kennwerte herangezogen, die Aussagen zur Menge des noch anhaftenden Zementsteins und zum Schädigungsgrad der herausgelösten Zuschläge machen. Die Zementsteinmenge, die an den Körnern haftet, kann anhand der Rohdichte beurteilt werden. Wenn man davon ausgeht, dass der reine Zuschlag eine Rohdichte von ca.  $2,6 \text{ g/cm}^3$  und der Zementstein ca.  $1,9 \text{ g/cm}^3$  hat, so gibt die Mischrohdsichte Auskunft zum Aufschluss.

Der Zementsteingehalt macht ebenfalls eine Aussage zum Aufschluss. Dieser wurde in Anlehnung an das Salzsäure-Löseverfahren nach DIN 52170 Teil 1-4 für die untersuchten Fraktionen im Korngrößenbereich 0 bis 16 mm bestimmt.

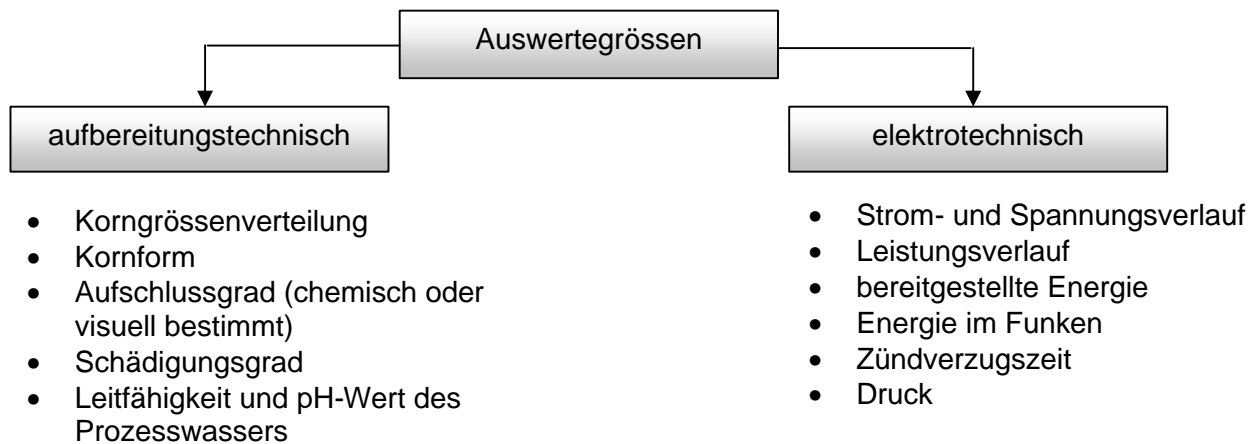


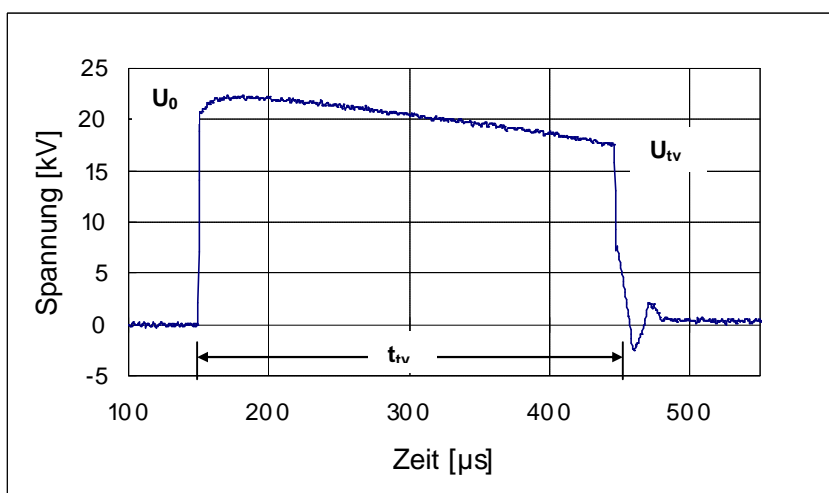
Bild 4: Auswertgrößen zur Beurteilung des Aufbereitungserfolges

Parallel dazu wurde für die Fraktionen 2 bis 16 mm der Aufschlussgrad augenscheinlich durch Auszählung ermittelt. In den Fraktionen >16 mm liegen die Zuschläge nur verwachsen vor und in den Fraktionen <2 mm ist der Zementsteinanteil sehr hoch, der Zuschlaggehalt gering, sodass eine Sortierung nicht lohnenswert ist.

Für den Vergleich der Kornformen (Sphäritäten) der Zerkleinerungsprodukte von elektrohydraulischer und konventioneller Zerkleinerung wurden diese mit dem HAVER CPA 4 (HAVER & BOECKER) optisch vermessen.

In der Tabelle 1 sind die Kennwerte für die Beurteilung des Aufbereitungserfolges detailliert zusammengestellt und erläutert.

Versuchsbegleitend wurde aus dem Spannungs- und Stromverlauf der wirksame Energieeintrag ermittelt. Für das Zerkleinerungsergebnis ist letztendlich nicht die auf dem Kondensator gespeicherte Energiemenge maßgeblich, sondern die im Funken umgesetzte Energiemenge. Diese berechnet sich aus der angelegten Spannung  $U_{tv}$  (Gl. 2) abzüglich der Spannungsabnahme in der Vorentladungsphase. Während der Vorentladung kommt es aufgrund der Abnahme des Wasserwiderstandes zu einem geringen Ladungsträgerabfluss ins Wasser (Bild 5) /Zan00/. Als Kennwert wird die umgesetzte Energie  $W_{tv}$  (Gl. 1) herangezogen.





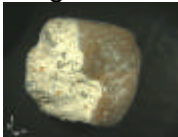

$$W_{tv} = \frac{C}{2} \cdot U_{tv}^2 \quad \text{(Gl. 1)}$$

$$U_{tv} = U_0 \cdot e^{-\frac{t_{lv}}{R_w C}} \quad \text{(Gl. 2)}$$

- $W_{tv}$  umgesetzte Energie (nach Vorentladung) [J]
- $U_0$  Anfangsspannung [kV]
- $U_{tv}$  Spannung nach der Vorentladung [kV]
- $t_{lv}$  Zündverzugszeit [µs]
- $C$  Kapazität [µF]
- $R_w$  Wasserwiderstand [Ω]

Bild 5: Berechnung der Energie  $W_{tv}$  aus dem Spannungsverlauf /Zan00/

Tabelle 1: Kennwerte zur Beurteilung des Aufbereitungserfolges

Nachzuweisender Effekt und Kennwert	Typische Fälle	Erläuterungen
Korngrößenreduktion  Verhältnis der mittleren Partikelgrößen $r_m$  $r_m = \frac{X_{m,Zerkleinerungsprodukt}}{X_{m,Ausgangssublinie,Beton}}$	$r_m = 1$	Idealfall, keine Schädigung der Zuschläge
	$r_m < 1$	geringe Zerkleinerungswirkung, Agglomeratbildung
	$r_m > 1$	zu starke Zerkleinerung, Schädigung der Zuschläge
Selektion von Zuschlag und Zementstein  Rohdichte $r_{Roh}$ [g/cm <sup>3</sup> ]  $r_{Roh} = \frac{m}{V}$	vollständige Selektion $r_{Roh}=2,6 \text{ g/cm}^3$	Zuschlagkörner > 2 mm ohne Zementsteinanhaftungen; Idealfall
	teilweise Selektion $2,6 > r_{Roh} > 1,9 \text{ g/cm}^3$	Zuschlagkörner > 2 mm mit geringen Zementsteinanhaftungen
	keine Selektion $r_{Roh}=1,9 \text{ g/cm}^3$	Agglomeratbildung der Zuschläge > 2 mm
Selektion von Zuschlag und Zementstein  Gehalt an Zementstein pro Fraktion  $c_i$ [%] $c_i = 100 - (\text{HCl Unlösliche})$ (Fraktionen 0 bis 16 mm)	vollständige Selektion $c_i = 0$	Zuschlagkörner > 2 mm ohne Zementsteinanhaftungen; Idealfall
	teilweise Selektion $0 < c_i < c_{\text{Beton}}$	Zuschlagkörner > 2 mm mit Zementsteinanhaftung
	keine Selektion $c_i = c_{\text{Beton}}$	Agglomeratbildung der Zuschläge > 2 mm
Schädigung der Zuschläge  Kornform Sphärizität SPHT $SPHT = U/2 \cdot \bar{\sigma}_p \cdot A$  Formelzeichen: U Umfang der Projektionsfläche A Inhalt der Projektionsfläche	SPHT=1,000	Kreis
	SPHT=1,128	Quadrat
	SPHT=1,260	Ellipse (1:3)
	SPHT=1,303	Rechteck (1:3)
Selektion von Zuschlag und Zementstein  Fraktionsaufschlussgrad $\mu_{AG,i}$  $\mu_{AG,i} = \frac{m_{A,i}}{m_{\text{Gesamt}}} \text{ [%]}$  Gesamtaufschlussgrad $\mu_{AG}$  $\mu_{AG} = \frac{\sum m_{AG,i} \cdot \mu_{3,i} \cdot \mu_{k,i}}{\bar{m}_k} \text{ [%]}$  Formelzeichen: $m_{A,i}$ Masse der aufgeschlossenen Zuschläge $m_{\text{Gesamt}}$ Gesamtmasse der Probe $\mu_{3,i}$ Masseanteil der i-ten Kornklasse $\mu_{k,i}$ Zuschlaggehalt der i-ten Kornklasse $\mu_{k,i}$ mittlerer Zuschlaggehalt der Gesamtprobe (für den untersuchten B25 ergibt sich: $\mu_{k,i}=0,37$ für die Fraktion 2/16 mm)	$\mu_{AG,i} = 100 \%$	vollständiger Aufschluss (Idealfall) 
	$\mu_{AG,i} = 75 \%$	75% der Zuschläge sind zementsteinfrei 
	$\mu_{AG,i} = 50 \%$	50% der Zuschläge sind zementsteinfrei 
	$\mu_{AG,i} < 50 \%$	kein Aufschluss 

## 5 Ergebnisse

Bild 6 gibt eine Übersicht über alle relevanten Einflussgrößen auf die elektrohydraulische Zerkleinerung. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden die in Bild 6 mit „\*“ gekennzeichneten Einflussgrößen untersucht. Bis zum Abschluss der Arbeiten soll der Einfluss aller Größen möglichst quantitativ ermittelt werden.

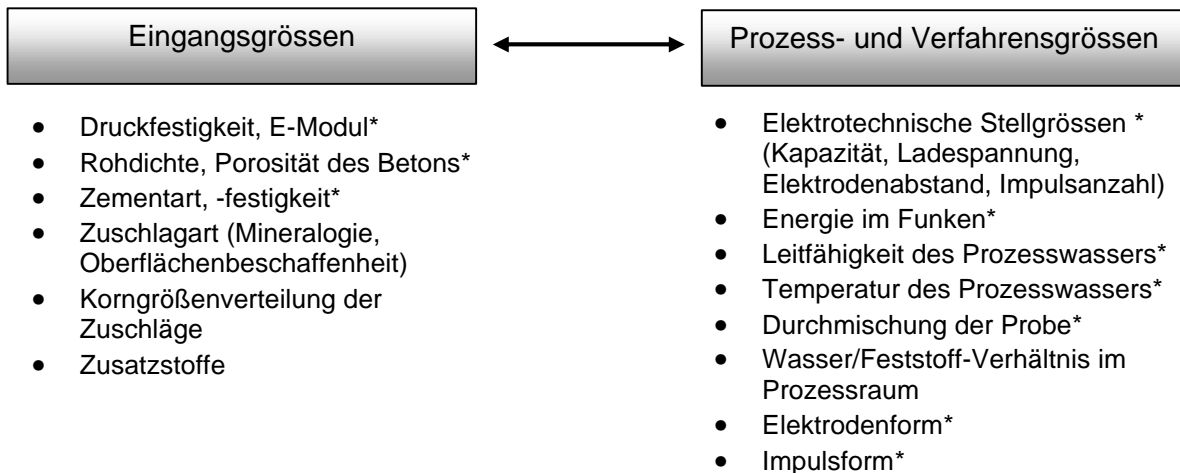


Bild 6: Einflussgrößen auf die elektrohydraulische Zerkleinerung

### 5.1 Einfluss des Energieeintrags auf das Zerkleinerungsprodukt – Festlegung eines optimalen Arbeitsbereichs

#### 5.1.1 Einfluss auf die Korngrößenverteilung des Zerkleinerungsprodukts

Im ersten Schritt wurde ein Beton B25 (siehe Tabelle 3) mit verschiedenen Energien - entsprechend einem vollständigen Versuchsplan der Form  $2^3$  beaufschlagt. Der Energieeintrag lässt sich über die Einstellung der elektrotechnischen Parameter (Tabelle 2) steuern.

Tabelle 2: Untersuchter Bereich der elektrotechnischen Parameter

Parameter	Bereich
Kapazität des Parameters C	6 ... 12 $\mu$ F
Ladespannung $U_0$	20 ... 30 kV
Elektrodenabstand s	10 ... 25 mm
Impulsanzahl n	10 ... 50
Energie im Funken $W_{tv}$	1,2 ... 5 kJ
Druckamplitude $p_{max}$	bis zu 100 MPa

Tabelle 3: Zusammensetzung und Eigenschaften der Betonproben B25

	B25
Zement CEM I 32,5 R	300 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	180 kg/m <sup>3</sup>
w/z-Wert	0,6
Zuschlag (Quarz Kies)	1902 kg/m <sup>3</sup>
Ausgangssieblinie	AB 16
Druckfestigkeit	36 N/mm <sup>2</sup>
E-Modul	33,0 kN/mm <sup>2</sup>

Ziel der Untersuchungen war es, die beste Annäherung der Korngrößenverteilung der Sekundärzuschläge an die Ausgangssieblinie zu erreichen. Bild 7 zeigt einige ausgewählte Korngrößenverteilungen nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung verglichen mit dem günstigen Sieblinienbereich AB16 des Ausgangszuschlags im Beton. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Sieblinie des Zerkleinerungsproduktes über den Energieeintrag gesteuert werden kann.

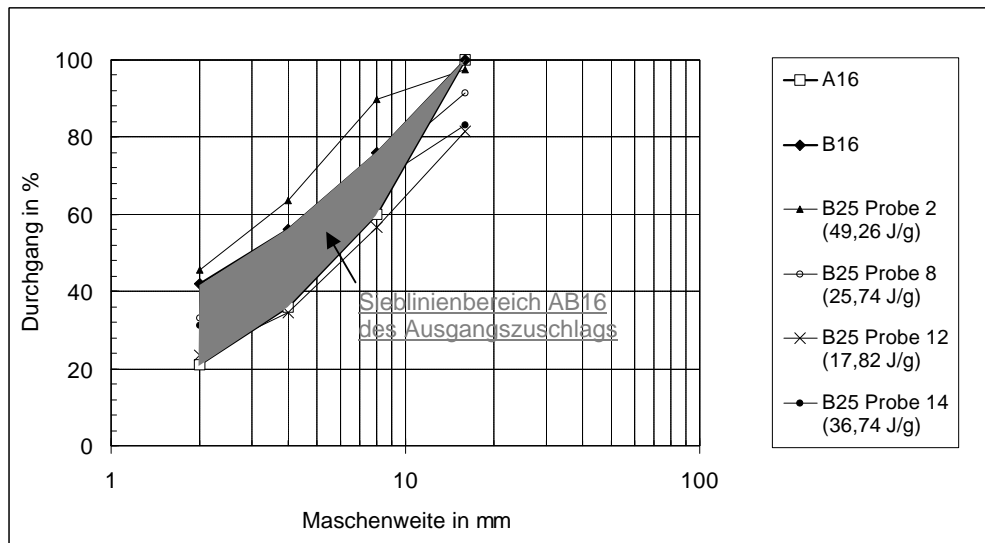


Bild 7: Vergleich ausgewählter Korngrößenverteilungen (Fraktion 2/16 mm) nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung

Bild 8 zeigt die Abhängigkeit der erreichten Korngrößenreduktion (dargestellt als Verhältnis  $r_m$ ) von der umgesetzten Energie im Funken  $W_{tv}$ . Mit steigender Energie nimmt die mittlere Korngröße exponentiell zu. Das Optimum  $r_m=1$  liegt für den untersuchten B25 bei  $W_{tv} = 44$  J/g.

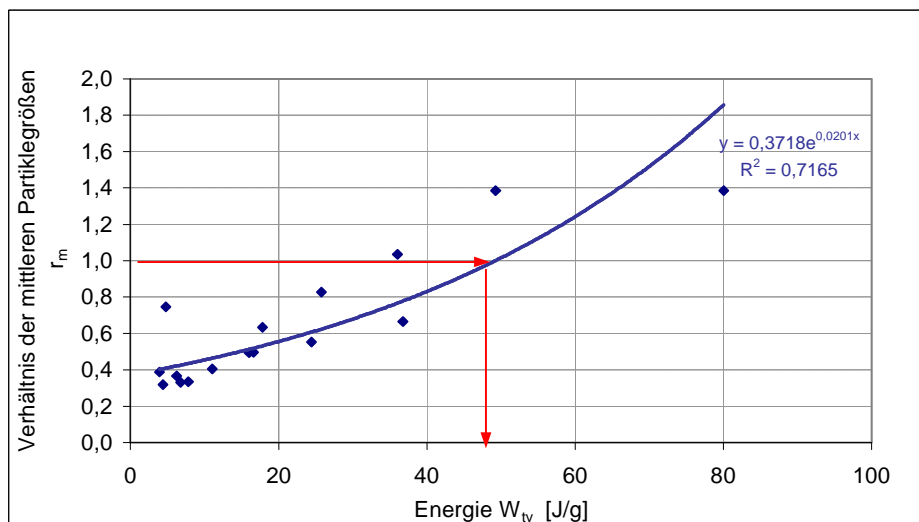


Bild 8: Verhältnis  $r_m$  der mittleren Partikelgrößen in Abhängigkeit von der umgesetzten Energie  $W_{tv}$  (untersuchtes Material: B25)

### 5.1.2 Einfluss auf den Aufschlussgrad des Zerkleinerungsprodukts

Neben einer optimalen Zerkleinerung soll **gleichzeitig** ein hoher **Aufschlussgrad** der Zuschläge erreicht werden. In Bild 9 sind die Fraktionsaufschlussgrade in Abhängigkeit von der eingebrachten Energie dargestellt.

Mit zunehmender Energie nimmt auch der Aufschlussgrad der Fraktionen zu. In den Feinfraktionen 0/1 und 1/2 mm dagegen reichert sich der Zementstein an. Der Gesamtaufschlussgrad ist geringer, weil der Anteil der Zuschläge in den Fraktion 2/4, 4/8 und 8/16 mm im Ausgangsbeton, bezogen auf den Gesamtzuschlaggehalt, relativ gering ist.

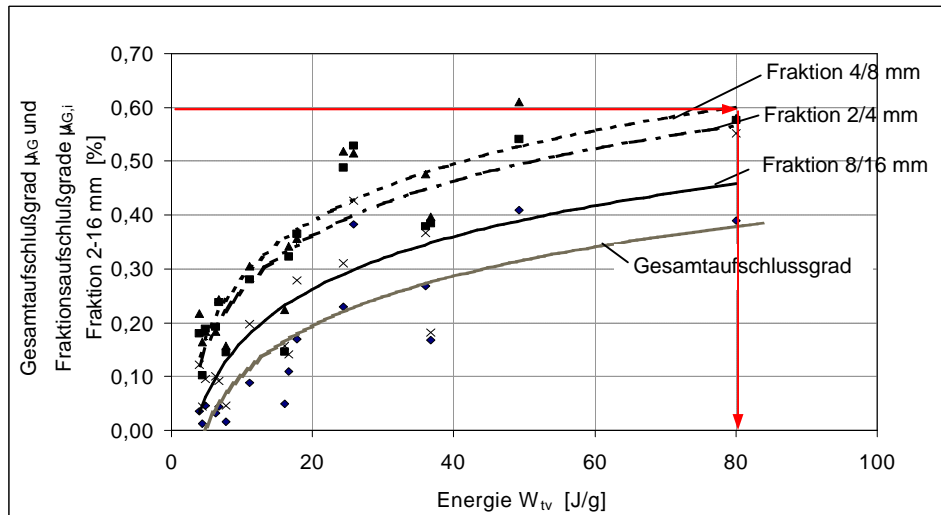


Bild 9: Fraktionsaufschlussgrade  $\mu_{AG,i}$  und Gesamtaufschlussgrad  $\mu_{AG}$  in Abhängigkeit von der umgesetzten Energie  $W_{tv}$  [J/g] (untersuchtes Material: B25)

Bei einem Energieeintrag von  $W_{tv} = 80$  J/g (obere Grenze des untersuchten Energiebereichs) erreicht der Fraktionsaufschlussgrad  $\mu_{AG,i}$  seinen höchsten Wert mit ca. 50 bis 60%. Aus den Ergebnissen für Zerkleinerung und Aufschluss lässt sich für die Altbetonzerkleinerung ein optimaler Arbeitsbereich von 44 – 80 J/g festlegen.

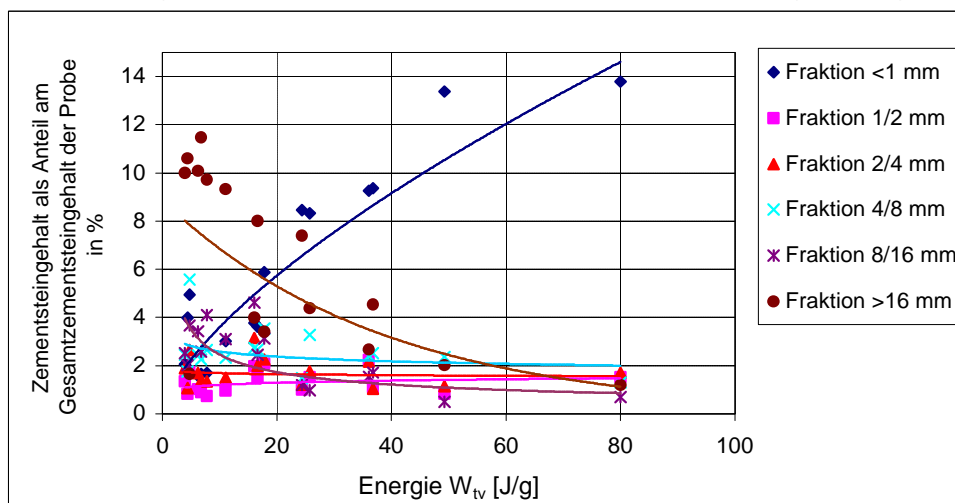


Bild 10: Zementsteingehalte, dargestellt als Anteil am Gesamtzementsteingehalt  $\approx 20$  M.-%

Aus Bild 10 ist ersichtlich, dass der Zementsteingehalt in den Fraktionen 1/2, 2/4, 4/8 und 8/16 mm mit zunehmender Energie stetig abnimmt und sich schon bei geringeren Energien auf einen Wert von  $\approx 2$  Masse-% einstellt. In der Fraktion  $> 16$  mm zeigt sich eine ausgeprägte Abnahme mit steigender Energie  $W_{tv}$ .

Bei geringere Energie liegen im Grobkornbereich  $> 16$  mm noch viele Agglomerate vor, d.h. um den Beton möglichst vollständig aufzuschliessen, ist eine höhere Energie (ab 50 J/g) notwendig.

*In der Fraktion  $< 1$ mm dagegen reichert sich der abgetrennte Zementstein an. Es findet eine Differenzierung zwischen den Fraktionen statt, d.h. es muss zwischen einer Anreicherung von Zementstein in der Fraktion  $< 1$  mm und einer Zementsteinabnahme in den übrigen Fraktionen unterschieden werden. Bei einem Wert von ca. 80 J/g werden für alle untersuchten Fraktionen  $> 1$ mm die geringsten Zementsteingehalte erreicht, bei maximaler Zementsteinanreicherung. Der Ausgangszementsteingehalt beträgt 20 M.-%, wovon sich 14 % in der Fraktion  $< 1$ mm anreichern und die restlichen 6 M.-% auf die Fraktionen  $> 1$ mm verteilen.*

## 6 Einfluss der Betoneigenschaften und Prozessgrößen

### 6.1 Einfluss der Betondruckfestigkeit auf das Zerkleinerungsprodukt und Einfluss der Proben-Durchmischung

In weiteren Versuchen wurde die Druckfestigkeit systematisch variiert, indem in der Rezeptur nur der w/z-Wert und die Zementfestigkeit geändert wurden (Tabellen 4 und 5). Gleichzeitig wurde innerhalb dieser Versuchserie getestet, welchen Einfluss eine Durchmischung der Probe während der Behandlung (im Folgenden als Intervallbehandlung bezeichnet) auf das Zerkleinerungsergebnis hat. D.h., dass parallel zum Versuch mit einer Impulsanzahl  $n=50$  am gleichen Material ein Versuch mit  $n=20/10/20$  Impulsen getestet wurde, wobei nach jedem Intervall der Prozessraum vollständig geleert wurde und die Probe erneut zugeführt wurde. Die Bilder 11 und 12 zeigen, dass die Zerkleinerungsprodukte nach der Intervallbelastung eine günstigere Korngrößenverteilung verglichen mit den Korngrößenverteilungen nach einer Normalbelastung aufweisen, dafür aber einen geringeren Aufschlussgrad. Wobei bezüglich des Aufchlusses kein wesentlicher Unterschied zwischen Normal- und Intervallbehandlung zu erkennen war. Für die Intervallbehandlung ergibt sich Betone mit Druckfestigkeiten von 15 bis 50 N/mm<sup>2</sup> ein etwas geringere Aufschlussgrad. Bei den härtesten Betonen gibt es keinen Unterschied im Aufschluss und auch die Streuung der Ergebnisse ist sehr hoch.

Bei der Zerkleinerung variiertes Betonfestigkeiten (C8/10 bis C55/67) war zu beobachten, dass sich Betone der mittleren Festigkeitsklassen aufgrund ihrer hohen Zähigkeit am schwierigsten zerkleinern lassen. Hochfeste Betone dagegen sind wegen des geringen w/z-Wertes sehr spröde und lassen sich deshalb ebenso wie niedrigfestere Betone leichter zerkleinern.

Grund für das unterschiedliche Zerkleinerungsverhalten der Betonfestigkeiten sind zum einen im elastisch-plastischen Stoffverhalten des Betons zu suchen und zum anderen auf die Veränderung der Grenzschicht zwischen Zuschlag und Zementstein zurückzuführen. Grund könnte auch der Einfluss der Porosität und des Zementsteingehalts auf die Schallausbreitung im Beton sein. Diese zwei sich überlagernde Effekte sind gegenläufig. Die Porosität nimmt mit zunehmender Festigkeit ab, d.h. die Zerkleinerungseffektivität steigt, da an den Luftblasen Energieverluste auftreten. Gleichzeitig steigt mit der Druckfestigkeit der Zementsteinanteil im Beton, was die mögliche Anzahl der Grenzflächen zwischen Zuschlag und Zementstein herabsetzt und somit die Effektivität.

Tabelle 4: Zusammensetzung der untersuchten Betone mit variiertem Druckfestigkeit

Betonfestigkeitsklasse	Zuschlag 0/2	Zuschlag 2/4	Zuschlag 4/8	Zuschlag 8/16	Zement (Zementfestigkeit)	Wasser
C 4/5	606,6	284,3	388,6	616,0	195 (CEM I 32,2R)	195
C 8/10	595,7	279,3	381,7	605,1	234,9 (CEM I 32,5R)	195
C 12/15	584,9	274,2	374,8	594,1	274,7 (CEM I 32,5R)	195
C 20/25	568,3	266,4	364,1	577,2	336,2 (CEM I 32,5R)	195
C 30/37	565,1	264,9	362,0	573,9	348,2 (CEM I 42,5R)	195
C 35/45	539,3	252,8	345,5	547,7	443,2 (CEM I 42,5R)	195
C 45/55	527,3	247,2	337,8	535,5	487,5 (CEM I 52,5R)	205
C 55/67	580,3	267,1	405,3	589,5	388 (CEM I 42,5R)	152

Tabelle 5: Eigenschaften der untersuchten Betone mit variiertem Druckfestigkeit

Betonfestigkeitsklasse	w/z-Wert	Festbetonrohichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Festbetonreindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	berechnete Porosität [%]	28-Tage-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
C 4/5	1	2,237	2,83	17,67	13,2
C 8/10	0,83	2,242	2,87	30,31	21,8
C 12/15	0,71	2,32	2,84	24,30	37,3
C 20/25	0,58	2,21	2,85	22,46	37,6
C 30/37	0,56	2,311	2,85	23,51	48,6
C 35/45	0,44	2,21	2,82	21,63	56,0
C 45/55	0,42	2,326	2,79	19,35	66,2
C 55/67	0,39	2,3954	-	-	61,98

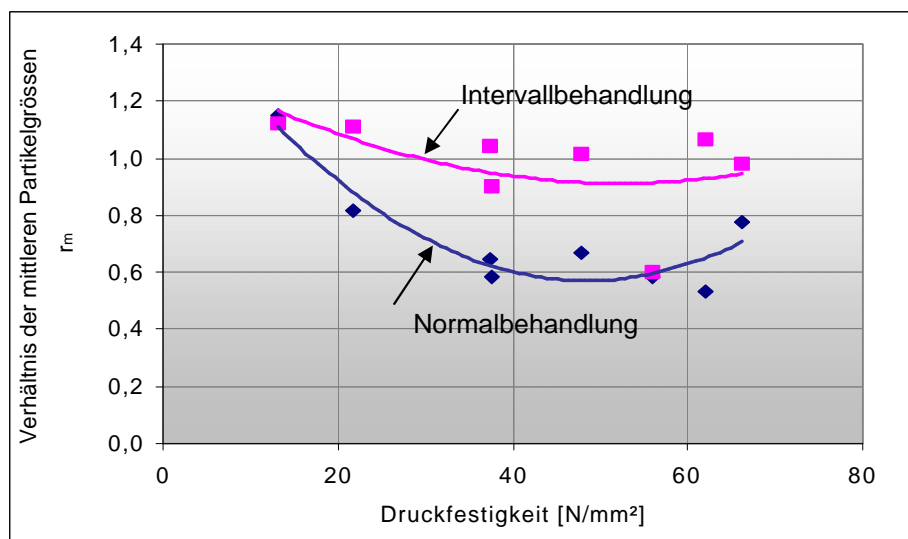


Bild 11: Darstellung des Verhältnisses  $r_m$  für Betone mit variierten Druckfestigkeiten nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung ( $W_{tv} = 25 \text{ J/g}$ )

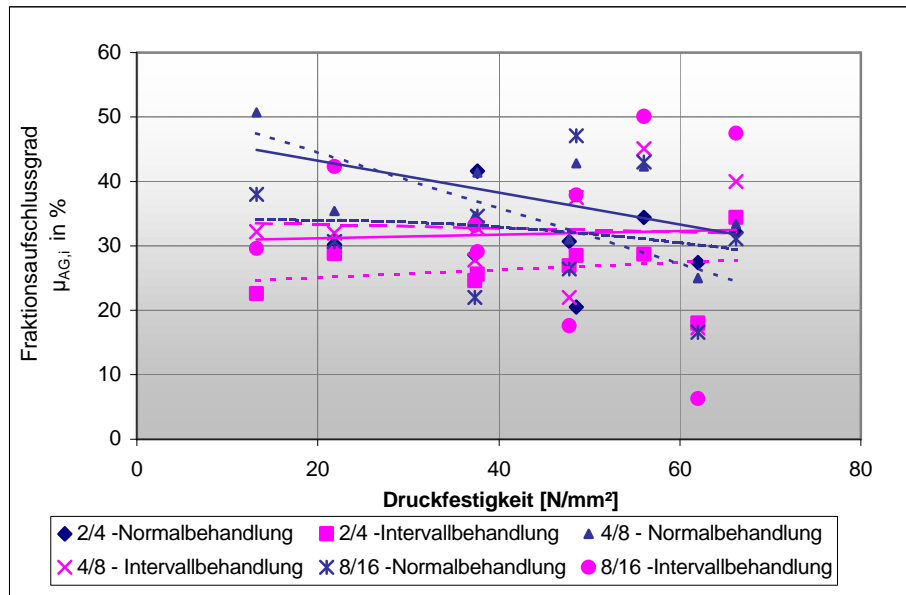


Bild 12: Darstellung des Fraktionsaufschlussgrades der Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/16 mm für Betone mit variierten Druckfestigkeiten nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung ( $W_{tv} = 25 \text{ J/g}$ )

## 6.2 Einfluss des verwendeten Zementes auf die Leitfähigkeit des Prozesswassers und die Zerkleinerungswirkung

Die Leitfähigkeit des Prozesswassers hat signifikanten Einfluss auf die Unterwasserfunkenentladung. Die Verluste während der Vorentladungsphase nehmen mit steigender Leitfähigkeit zu, da der Wasserwiderstand durch die vermehrten leitfähigen Ionen geringer wird. In der Folge steht für die Zerkleinerung weniger Energie zur Verfügung. Für einen Beton mit Portland Zement CEM I (Tabelle 6 und 7) steigt die Leitfähigkeit mit zunehmender Impulsanzahl, d.h. Verweildauer des Betons im Wasser, von  $548 \mu\text{S/cm}$  auf  $2933 \mu\text{S/cm}$  (Bild 13).

Die verwendete Zementart hat zum einen Einfluss auf die Beschaffenheit der Grenzschicht und zum anderen auch auf die Leitfähigkeit des Prozesswassers. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen wurden in einer Studienarbeit /Mül02/ Betone mit unterschiedlichen Zementarten hergestellt und elektrohydraulisch zerkleinert.

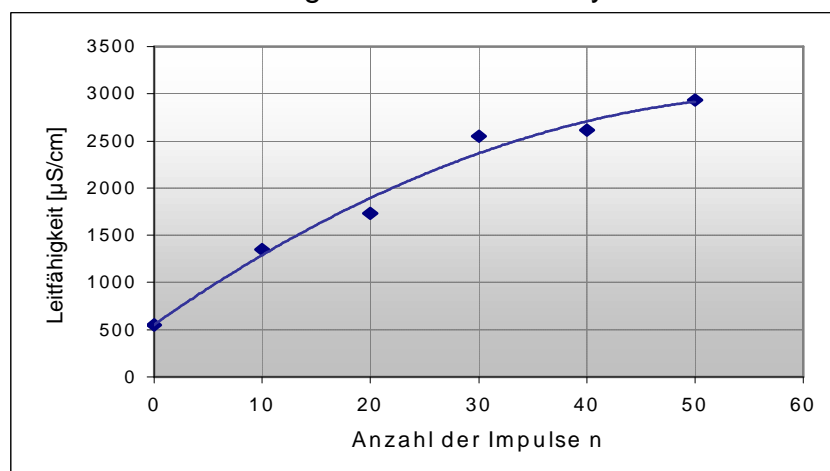


Bild 13: Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Impulsanzahl n (Material: Beton 1, Tabelle 4) /Mül02/

In Tabelle 6 sind die Rezepturen der sechs verschiedenen Betone enthalten. Die verwendeten Zementarten werden in Tabelle 7 genauer erläutert.

Die Zunahme der Leitfähigkeit ist in erster Linie auf die Zunahme an Hydroxidionen ( $\text{OH}^-$ ) und Calciumionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ) in der Lösung zurückzuführen, da diese die höchsten äquivalente Ionenleitfähigkeit besitzen.

Tabelle 6: Rezepturen der untersuchten Betone /Mül02/

Beton (mit)	Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	Mikrosilika [kg/m <sup>3</sup> ]	Zuschlag <sup>2)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
1 (CEM I)	331	192	-	1813
2 (CEM I (NA))	331	192	-	1813
3 (CEM II/B-S)	331	192	-	1803
4 (CEM II/A-LL)	331	192	-	1803
5 (CEM II/A-D)	301	192	30 <sup>1)</sup>	1808
6 (CEM III)	331	192	-	1803

1) verwendet: 60 kg/m<sup>3</sup> Silicasuspension „EMSAC 500 DOZ (SF)“ von Woermann, dadurch Reduzierung des Zugabewassers um 30 kg/m<sup>3</sup>

2) Fraktionsanteile: 0/0,5: 14 %; 0,5/1: 8 %; 1/2: 9,5 %; 2/4: 14,5 %; 4/8: 22 %; 8/16: 32 %

Tabelle 7: Verwendete Zementarten (nach DIN EN 197-1) /Mül02/

Bezeichnung	Name	Kennzeichnung	Produzent
CEM I	Portlandzement	EN 197-1-CEM I 32,5R	Karsdorfer Zement
CEM I (NA) <sup>1)</sup>	Portlandzement	EN 197-1-CEM I 32,5R-(NA)	HZ Burg-Lengenfeld
CEM II/B-S	Portlandhüttenzement	EN 197-1-CEM II/B-S 32,5R	Karsdorfer Zement
CEM II/A-LL	Portlandkalksteinzement	EN 197-1-CEM II/A-LL 32,5R	Karsdorfer Zement
CEM II/A-D <sup>2)</sup>	Portlandsilicastaubzement	EN 197-1-CEM II/A-D 32,5R	Karsdorfer Zement
CEM III	Hochofenzement	EN 197-1-CEM III/B 32,5N-NW/HS/NA	Karsdorfer Zement

1) laut Hersteller nicht ausdrücklich als NA-Zement ausgewiesen

2) manuelle Zugabe von 10 M.-% Silicastaub zu CEM I

Es ist allgemein bekannt, dass Calciumhydroxid, auch Portlandit genannt, in grossen Mengen an der Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein zu finden ist. Dieses wird mit zunehmenden Aufschluss des Betons durch das  $\text{Ca}^{2+}$ -ungesättigte Wasser gelöst. Bei Betonen mit Portlandzement oder Portlandzement mit inerten Zusätzen kann die Leitfähigkeit des Prozesswassers als Maß für die Effektivität der Zerkleinerung herangezogen werden. Eine hohe Leitfähigkeit hat einen geringen Aufschluss der Zuschläge zur Folge, wobei dieses Ergebnis nicht verallgemeinert werden kann, da noch weitere Einflussgrößen, wie w/z-Wert, Zuschlagart, Korngrößenverteilung der Zuschläge, Zusatzstoffe und Alter auf die Grenzschicht wirken. Hier werden sich weitere Untersuchungen anschliessen.

Bei der Zerkleinerung des Betons mit Hochofenzement konnte die höchste Zerkleinerungseffektivität festgestellt werden, was auf den geringen Calciumhydroxid-Gehalt zurückzuführen ist.

Der Einfluss der Alkalien im Zement und somit des pH-Wertes in der Porenlösung des Betons hat nur relativ geringen Einfluss auf den Zerkleinerungsprozess.

## 7 Vergleich der elektrohydraulischen Zerkleinerung mit mechanischen Zerkleinerungsverfahren

Um die Qualität der Zerkleinerungsprodukte unterschiedlicher Zerkleinerungsverfahren vergleichen zu können, wurde in einer Studienarbeit /Räß02/ ein realer Abrissbeton mittels Backenbrecher, Prallbrecher und elektrohydraulischer Zerkleinerung aufbereitet. Hierbei wurden jeweils bekannte günstige Einstellungen gewählt.

Die Sieblinie des nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung entstandenen Sekundärzuschlags befindet sich im günstigen Sieblinienbereich AB16. Die Zerkleinerungsprodukte der mechanischen Zerkleinerung mittels Backen- und Prallbrecher sind dagegen wesentlich gröber und liegen ausserhalb dieses Bereichs (Bild 14).

Sehr interessant ist der Vergleich der Fraktionsaufschlussgrade (Bild 15). Hier wird der Vorteil der elektrohydraulischen Zerkleinerung sehr gut deutlich – der Aufschluss der Sekundärzuschläge nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung bewegt sich zwischen 40 % in den feineren Fraktionen und 70 % in den gröbereren Fraktionen. Im Gegensatz zu den konventionellen Zerkleinerungstechniken, bei denen der geringere Aufschlussgrad von max. 30 % mit zunehmender Korngröße noch abnimmt, steigt der Aufschlussgrad für das Produkt der elektrohydraulischen Zerkleinerung stetig an.

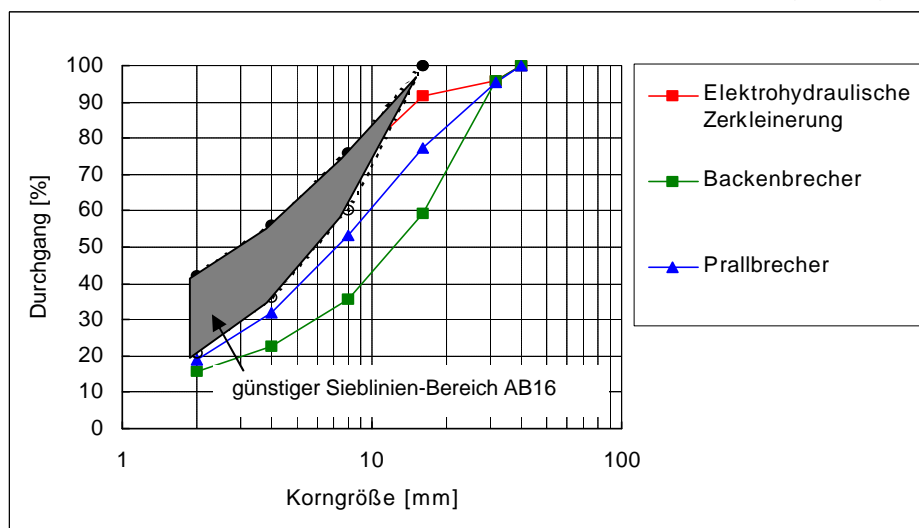


Bild 14: Vergleich der Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte von Backen-, Prallbrecher und elektrohydraulischer Zerkleinerung /Räß02/

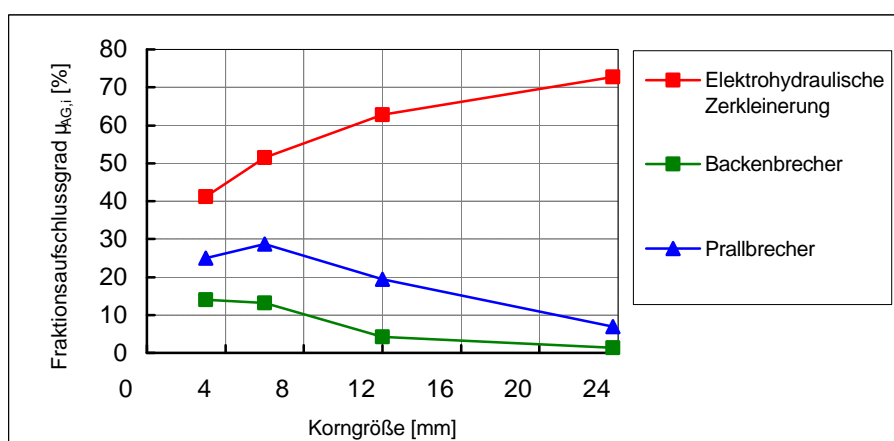


Bild 15: Vergleich der Fraktionsaufschlussgrade  $\mu_{AG,i}$  der Zerkleinerungsprodukte von Backen-, Prallbrecher und elektrohydraulischer Zerkleinerung /Räß02/

Auch die Schädigung bzw. Zerstörung der Zuschläge ist geringer, wie sich durch die Messung der Kornform nachweisen lässt (Bild 16).

Zur besseren Verständlichkeit, soll hier noch einmal auf die Grenz-Sphärizitäten hingewiesen werden. So beträgt bei einer Ellipse im Verhältnis 1:3 die Sphärizität 1,260 und bei einem Rechteck im Verhältnis 1:3 sogar 1,303. Die ermittelten Sphärizitäten der Sekundärzuschläge lagen alle unterhalb dieser beiden Werte, was die Anforderungen in DIN 4226 zur Kornform von Betonzuschlag erfüllt.

Die Sphärizitäten der mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung erzeugten Sekundärzuschläge liegen bis auf Kornfraktion 16/31,5 immer unter denen der beiden Brechanlagen, was auf eine gleichmäßigere und rundere Kornform schließen lässt.

Die höheren Werte in der Kornfraktion 16/31,5 sind auf den unvollständigen Aufschluss zurückzuführen. Dieses Problem kann aber durch eine wiederholte Zerkleinerung wesentlich verbessert werden.

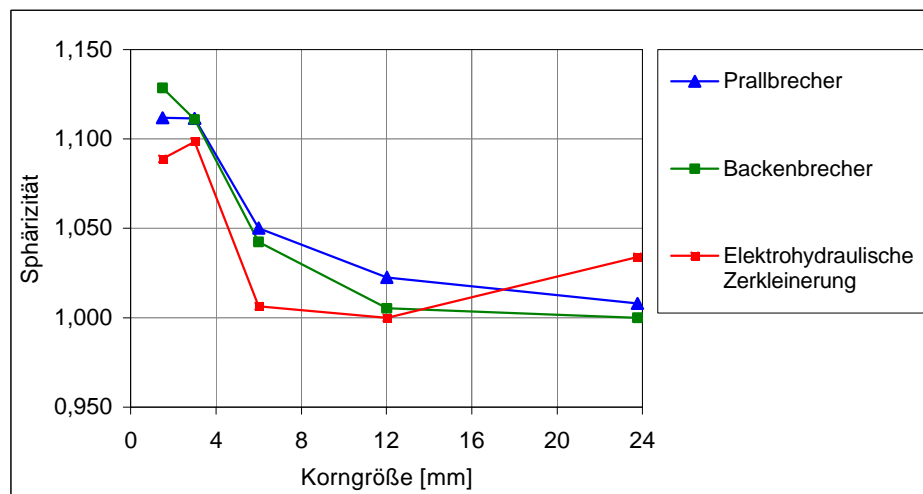


Bild 16: Vergleich der Sphärizitäten der Sekundärzuschläge von Backen-, Prallbrecher und elektrohydraulischer Zerkleinerung /Rä302/

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Qualität, d.h. der Aufschluss und die Nichtbeschädigung der Sekundärzuschläge kann mittels der elektrohydraulischen Zerkleinerung beträchtlich verbessert werden. Es sind je nach Betonart etwa 40 – 70 % sauber aufgeschlossene Zuschläge >2 mm herstellbar, was bedeutet, dass die Zuschläge in ihrer ursprünglichen Qualität wiedergewonnen und für die Herstellung von Konstruktionsbeton eingesetzt werden können. In den derzeit laufenden Untersuchungen wird der Einfluss der Betonbestandteile auf den Vorgang der elektrohydraulischen Zerkleinerung detailliert untersucht, um das Prozessverständnis zu vertiefen und auf dieser Basis die Effektivität zu steigern.

Die Grundlagenforschungen werden bis Ende 2003 abgeschlossen sein. Danach gilt es, die beschriebene Technik schrittweise in einen größeren Maßstab zu übertragen. Damit leisten diese Forschungsarbeiten einen Beitrag zur höherwertigen Wiederverwertung der Zuschläge im Hochbau.

## Literatur

- /SBA/ Statistisches Bundesamt: Erhebung über die Aufbereitung und Verwertung von Bauschutt, Baustellenabfällen, Bodenaushub und Straßenaufbruch 1998. Bonn, April, 2002
- /Kra02/ Krass, K.; Jungfeld, I.; Trogisch, H.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999 – Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straßen und Autobahn, Heft 1, 2002, S. 22-30
- /Nat00/ NATAATMADJA, A.: The performance of recycled crushed concrete aggregates, Unbound Aggregates in Road Construction, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 2000, S. 109-115
- /Zan00/ Zange, R.: Anwendungsbezogenes Prozessmodell der Wandlung elektrischer Energie in Energie des Leistungsschallimpulses. Dissertation O-v-G-Universität Magdeburg, 2000
- /Kra86/ Krautkrämer J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. überarb. Aufl. , Springer-Verlag, Berlin, 1986
- /DIN52170/ DIN 52170 T.1 –4: Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton. Februar 1980
- /Mül02/ Müller, M.: Untersuchungen zum Einfluss des Zementes auf die Betonzerkleinerung mittels Schallimpulsen. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- /Räß02/ Räß, S.: Vergleich zwischen den Zerkleinerungsprodukte des Verfahrens der Schallimpulszerkleinerung und konventionellen Zerkleinerungsverfahren für Altbeton. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- /DAfStb98/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DafStb Richtlinie Teil 1 und Teil 2: Beton mit rezykliertem Zuschlag. August 1998
- /Dor97/ Dorner, H.W.: Quantitative Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton. In: ConChem-Journal, 5. Jhg., Nr. 3, 1997, S. 85-103
- /DIN4226/ Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel: Teil 1: Zuschlag mit dichtem Gefüge, 1983 und Teil 100: rezyklierte Gesteinskörnungen, 2002

## Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller; Dipl.-Ing. E. Linß  
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystraße 7  
99423 Weimar  
e-mail: anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de oder elske.linsz@bauing.uni-weimar.de  
Tel.: 03643/5846-06 oder -98

Prof. Dr.-Ing. G. Wollenberg; Dr.-Ing. H.-P. Scheibe  
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und EMV  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Postfach 4120  
39016 Magdeburg  
e-mail: guenter.wollenberg@e-technik.uni-magdeburg.de oder  
Heinz-Peter.Scheibe@e-technik.uni-magdeburg.de  
Tel.: 0391/67-18636 oder -11086