



*Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/*

Anette Müller studierte an der Fakultät Bauingenieurwesen der HAB Weimar (1964–1968). Nach der Promotion 1974 folgte 1988 die Habilitation. Seit 1995 leitet Prof. Müller den Lehrstuhl „Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung“ mit den Forschungsschwerpunkten Aufbereitung von Primärstoffen, Abfällen zur Verwertung und Produkten, die Entwicklung und Eigenschaften von Recyclingbaustoffen sowie die Verwertung industrieller Nebenprodukte.

Qualitätskriterien • Quality criteria

Prallzerkleinerung von Betonen mit definierten Eigenschaften

Zusammenfassung: Bauabfälle, die als Recycling-Baustoffe einer Wiederverwertung zugeführt werden sollen, werden in mehreren Verfahrensschritten aufbereitet. Zentrale Bedeutung hat dabei die Zerkleinerung. Sie dient der Korngrößenreduktion. Bei Verbundbaustoffen stellt sie außerdem eine Möglichkeit dar, einen Aufschluss von verbundenen Komponenten zu erreichen. Der Prallbrecher hat sich für die Zerkleinerung von Bauabfällen aus Beton oder auch Mauerwerk bewährt. Dabei hängt das Zerkleinerungsergebnis zum einen von den Beanspruchungsbedingungen ab. Zum anderen ist zu erwarten, dass auch die Betongüte die erreichte Korngrößenreduktion beeinflussen wird. Dieser Frage wird in dem vorliegenden Beitrag nachgegangen. Verschiedene Betonarten wurden in einer Druckluftkanone unter definierten Bedingungen durch eine Prallbeanspruchung zerkleinert, um so die betontechnischen Einflüsse auf die erreichte Korngrößenreduktion und den Aufschluss zu erkennen. Aus den Ergebnissen werden Aussagen zur Abhängigkeit zwischen Zerkleinerbarkeit und Druckfestigkeit des zu zerkleinernden Betons abgeleitet. Schlussfolgerungen für die Aufbereitung von Betonen mit höheren Festigkeitsklassen als eine der Entwicklungslinien im Betonsortiment werden gezogen.

Impact comminution of concretes with defined properties

Summary: Building waste that can be recycled as building material is processed in various steps and comminution has a central importance here. It is required for particle size reduction. As regards composite building materials, comminution furthermore represents the possibility to disintegrate connected components. The impact crusher has proved a success for the comminution of concrete or masonry building waste. On the one hand, the comminution result depends on the stress conditions. On the other hand, it can also be expected that the concrete quality will influence the particle size reduction achieved. This question is investigated in the present article. Various types of concrete were crushed under defined conditions in a impact compressed-air cannon in order to discover the influence of the concrete on the particle size reduction and the disintegration achieved. Statements were made as regards the interdependence between the crushability and the compressive strength of the concrete to be comminuted. Conclusions are drawn for the processing of concretes with higher strength classes as one of the development trends in the range of concretes.



Schornstein-Abbruch in Gera/Deutschland • Demolition of roofs in Gera/Germany

1 Untersuchte Betonarten

Für die Untersuchungen in der Druckluftapparatur wurden Normalbetone aus Kiesen, Splitten und rezyklierten Gesteinskörnungen mit abgestufter Festigkeit – entsprechend der zur Zeit der Herstellung gültigen Bezeichnung als B 25, B 35 und B 45 – hergestellt. Die als Zuschlag verwendeten Rezyklate wurden aus sortenreinen Betonprüfkörpern im Labormaßstab erzeugt. Ebenso wurden ein hochfester Beton und ein Leichtbeton in die Untersuchungen einbezogen (Tabelle 1). Die Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen entsprach für alle Betonarten der Sieblinie A/B mit einem Größtkorn von 16 mm. Bei den Normalbetonen wurden die Zementgehalte konstant gehalten. Die Wasser/Zement-Werte bewegten sich zwischen 0,48 für die Betone der Festigkeitsklasse 45 und 0,6 für die der Festigkeitsklasse 25. Der hochfeste Beton enthielt neben Zement die reaktiven Komponenten Steinkohlenflugasche (SFA) und Mikrosilika (MS). Der Wasser/Zement-Wert wurde auf 0,37 eingestellt, was die Zugabe eines Fließmittels (FM) erforderlich machte. Der Leichtbeton enthielt Blähton als grobe Gesteinskörnung.

Für die Zerkleinerungsversuche wurden 120 Betonkugeln mit einem Durchmesser von 150 mm produziert. Parallel dazu wurden Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 200 mm

1 Types of concrete investigated

Normal concretes consisting of gravel, chippings and recycled aggregates with graded strengths – according to the designation valid at the time of manufacturing as B 25, B 35 and B 45 – were made for the investigations in the compressed-air unit. The recyclates were produced from pure concrete specimens in the laboratory. In addition, a high-strength and a lightweight concrete were also included in the investigations (Table 1). The particle size distribution of the aggregates used corresponded to the grading curve A/B with a maximum particle size of 16 mm for all types of concrete. The cement content of the normal concretes was kept constant. The water-cement ratio varied between 0.48, for concretes of the strength class 45, and 0.6 for those of the strength class 25. In addition to cement, the high-strength concrete contained the reactive components coal fly ash (SFA) and microsilica (MS). The water-cement ratio was adjusted to 0.37 so that it was necessary to add a superplasticizer (FM). The lightweight concrete contained expanded clay as coarse aggregate.

120 concrete balls with a diameter of 150 mm were produced for the comminution tests. Parallel to this, concrete cubes with an edge length of 200 mm were made to determine the compressive strengths and the apparent density of

hergestellt, an denen die Druckfestigkeiten und die Festbetonroh-dichten ermittelt wurden. Die Betone wiesen zum Zeitpunkt der Zerkleinerung ein Alter von 24 Monaten auf.

Aus der Betontechnik ist bekannt, dass bei Betonen mit gebrochenen Zuschlägen aufgrund der raueren Oberfläche eine Verbesserung des Verbundes zwischen Zuschlag und Zementstein erreicht wird, der bis zu 10 % höhere Druckfestigkeiten bewirken kann. Aus Tabelle 1 ist diese Tendenz abzulesen. So weisen die Betone, zu deren Herstellung Diabassplitt eingesetzt wurde, signifikant höhere Druckfestigkeiten auf. Fraglich ist, ob dieser Effekt auch an den Zerkleinerungsprodukten abgelesen werden kann. In früheren Prallversuchen [2] wurden geringe Unterschiede in den Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte von Kies- und Splittbeton ermittelt. Die Zerkleinerungsprodukte der Splittbetone waren geringfügig gröber.

Zum Vergleich bzw. zur Ergänzung der hier dargestellten Untersuchungen in der Druckluftapparatur wurden Ergeb-

the hardened concrete. At the time of comminution the concretes had an age of 24 months.

It is known from concrete technology that an improved bond between the aggregate and the hardened cement paste is achieved due to the coarser surface in concretes with crushed aggregates, which may lead to increased compressive strengths of up to 10 %. This tendency is shown in Table 1. Thus, concretes that were produced with diabasic chippings had significantly higher compressive strengths. It is doubtful whether this effect can also be determined in the crushed products. During previous impact tests [2] slight differences in the particle size distribution of the crushed products of gravel and chippings concrete were determined. The crushed products of the chippings concrete were slightly coarser.

The results of the comminution of concretes of the strength classes B 15 and B 35 in an impact crusher presented within the framework of the integrated research project "Building materials cycle in solid construction" [1] were used for the

Tabelle 1: Zusammensetzung und Festbetonkennwerte der mit der Prallkanone untersuchten Betone

Table 1: Composition and hardened concrete parameters of the concretes tested with the impact cannon

Probenbezeichnung / Sample designation	Zusammensetzung / Composition			Festbetonkennwerte / Hardened concrete parameters		
	Zement / Cement CEM I 32,5 [kg/m ³]	Zuschlag / Aggregate [kg/m ³]	w/z-Wert / water-cement ratio	Festigkeit / Strength [N/mm ²]		Rohdichte / Apparent density [kg/m ³]
				7 d	28 d	
Kiesbeton / Gravel concrete		Rheinsand Rheinkies / Sand from the Rhine Gravel from the Rhine				
B 25	300	1842	0,6	32,8	36,1	2343
B 35	300	1894	0,53	35,9	42,0	2383
B 45	300	1936	0,48	43,2	50,0	2403
Splittbeton / Chippings concrete		Rheinsand Diabassplitt / Sand from the Rhine Diabasic chippings				
B 25	300	1997	0,6	32,5	39,4	2435
B 35	300	2053	0,53	42,1	49,3	2524
B 45	300	2098	0,48	51,9	58,3	2483
RC-Beton / RC concrete		Rheinsand Rezyklat / Sand from the Rhine Recyclate				
B 25	300	1843	0,6	33,5	37,7	2266
B 35	300	1895	0,53	39,2	43,8	2254
B 45	300	1936	0,48	44,0	53,0	2231
HPC	SFA+MS +FM	Rheinsand Basaltplitt / Sand from the Rhine Basalt chippings				
	270	1907	0,36	66,7	91,4	2569
LB		Sand, Blähton / Sand Expanded clay				
	350	1239	0,5	44,8	52,9	1783

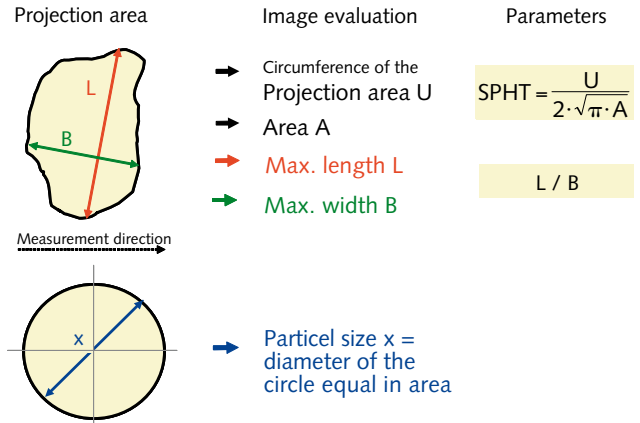




1 Betonbruch gewonnen beim Abbruch des Technikums des Lehrstuhls „Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung“ der Bauhaus-Universität Weimar/Deutschland

Concrete rubble extracted by the demolition of the test centre of the Department of Building Materials Processing and Recycling at the Bauhaus University of Weimar

nisse zur Zerkleinerung von Betonen der Festigkeitsklassen B 15 und B 35 in einem Prallbrecher herangezogen, die im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Baustoffkreislauf



2 Messgrößen und daraus berechnete Parameter der Bildanalyse
Measured variables and parameters of the image analysis

comparison and to complement the here presented investigations in the compressed-air cannon. Concretes of the strength classes B 15 and B 35 were produced for these tests (Table 2). The compressive strength of the concretes produced was determined on cubes with an edge length of 200 mm. Specimens of 500 x 500 x 250 mm, which were reinforced with two steel mats, were used for the comminution tests.

2 Test equipment used

The defined impact comminution of the concrete balls was carried out using the compressed-air cannon at the Institute of Process Engineering of the Otto-von-Guericke University in Magdeburg [3, 4]. With this apparatus it is possible to shoot specimens with a diameter of up to 150 mm and also irregularly shaped specimens onto an impact plate. For this purpose a projectile carrier with the specimen is introduced into a guide tube and accelerated by the suddenly expanded compressed air. The projectile carrier is slowed down at the end of the guide tube and the specimen continues to fly due to its inertia and is comminuted on the impact plate. The velocity of the specimen is measured by means of light barriers. Velocities of between 30 m/s and 60 m/s can be

Tabelle 2: Zusammensetzung und Festbetonkennwerte der im Prallbrecher untersuchten Betone [1]

Table 2: Composition and hardened concrete parameters of the concretes tested in the impact crusher [1]

Probenbezeichnung / Sample designation	Zusammensetzung / Composition			Festbetonkennwerte / Hardened concrete parameters		
	Zement / Cement CEM I 32,5 [kg/m ³]	Zuschlag / Aggregate [kg/m ³]	w/z-Wert / water-cement ratio	Festigkeit / Strength [N/mm ²]		Rohdichte / Apparent density [kg/m ³]
				7 d	28 d	
Kiesbeton Bremen / Gravel concrete from Bremen		Sand Weserkies / Sand Gravel from the river Weser				
B 15	240	1907	0,75		24,8	2,17
B 35	360	1803	0,5		38,1	2,24



Tabelle 3: Parameter der Prallzerkleinerung
Table 3: Parameters of the comminution by impact

	Masse Betonkugel / Weight Concrete ball [kg]	Prallgeschwindigkeit / Impact speed [m/s]			Kinetische Energie / Kinetic energy [J]		
Kiesbeton							
B 25	4,138	35,9	47,3	55,1	2666,6	4627,6	6281,5
B 35	4,209	35,2	43,7	50,4	2604,1	4012,8	5340,8
B 45	4,244	36,8	45,9	53,2	2878,9	4466,1	6007,3
Splittbeton							
B 25	4,301	35,0	43,3	51,3	2633,9	4028,2	5659,4
B 35	4,458	36,1	45,2	54,5	2903,2	4543,8	6620,7
B 45	4,386	35,5	45,0	53,0	2740,7	4410,4	6111,8
RC-Beton							
B 25	4,002	34,1	46,1	54,5	2324,0	4258,7	5939,8
B 35	3,981	37,3	46,1	56,6	2764,9	4237,6	6388,0
B 45	3,940	36,0	46,2	54,4	2549,3	4198,8	5827,8
HPC	4,537	39,6	46,2	52,4	3551,4	4837,1	6236,7
LB	3,149	35,0	46,3	50,6	1932,4	3370,4	4031,3

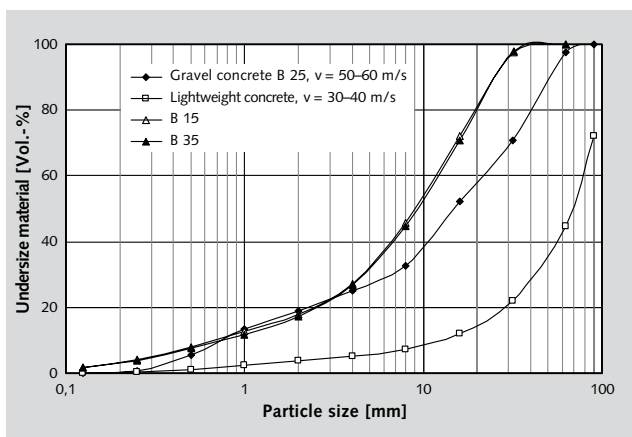
im Massivbau“ [1] vorgelegt wurden. Für diese Versuche wurden Betone der Festigkeitsklassen B 15 und B 35 hergestellt (Tabelle 2). Die Druckfestigkeiten der erzeugten Betone wurden an Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm bestimmt. Für die Zerkleinerungsversuche wurden Probekörper der Abmessungen 500 x 500 x 250 mm³ eingesetzt, welche mit zwei Stahlmatten bewehrt waren.

2 Verwendete Versuchsaapparatur

Die definierte Prallzerkleinerung der Betonkugeln erfolgte unter Verwendung der Druckluftkanone am Institut für Verfahrenstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magde-

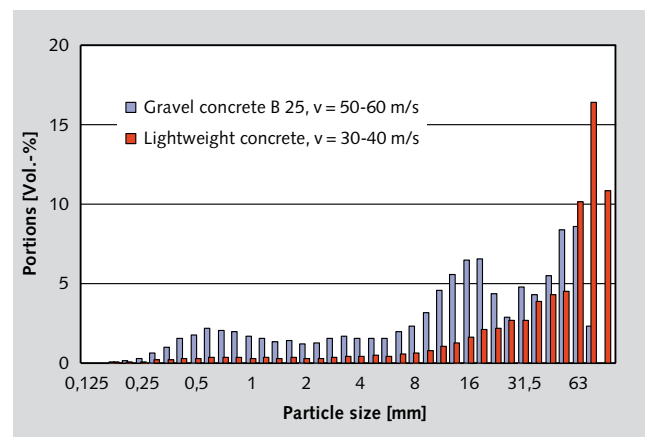
achieved. Table 3 shows the weight of the concrete specimens calculated on the basis of the apparent density of the hardened concrete and the specimen diameter, the measured velocities and the calculated kinetic energy of the specimens.

The clearest differences in weight are between the high-strength concrete and the lightweight concrete. The concrete with recycled aggregates is somewhat lighter than the concretes of natural aggregates. Due to the variation of the impact speed, a sufficiently wide overlapping range is achieved for the energies with which the concrete specimens are loaded.



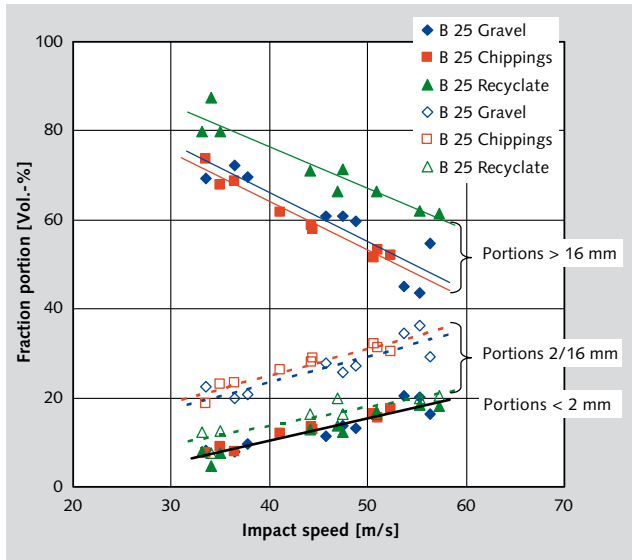
3 Durchgangssummenkurven des feinsten Zerkleinerungsprodukts aus Beton B 25 und des größten Zerkleinerungsprodukts aus Leichtbeton im Vergleich zu den Prallbrecherzerkleinerungsprodukten aus den Betonen B 15 und B 35

Cumulative size distribution curves of screen underflow of the finest comminution products of the concrete B 25 and the coarsest comminution product of the lightweight concrete compared to the impact crusher comminution products of the concretes B 15 and B 35



4 Fraktionsanteile des feinsten Zerkleinerungsprodukts aus Beton B 25 und des größten Zerkleinerungsprodukts aus Leichtbeton
Fraction portions of the finest comminution products of concrete the B 25 and of the coarsest comminution product of the lightweight concrete





5 Fraktionsanteile für die Betone der Festigkeitsklasse B 25 (Kiesbeton $\beta_{D, 28 d} = 36,1 \text{ N/mm}^2$, Splittbeton $\beta_{D, 28 d} = 39,4 \text{ N/mm}^2$, RC-Beton $\beta_{D, 28 d} = 37,7 \text{ N/mm}^2$)
 Fraction portions of the concretes of the strength class B 25 (gravel concrete $\beta_{D, 28 d} = 36,1 \text{ N/mm}^2$, chippings concrete $\beta_{D, 28 d} = 39,4 \text{ N/mm}^2$, RC concrete $\beta_{D, 28 d} = 37,7 \text{ N/mm}^2$)

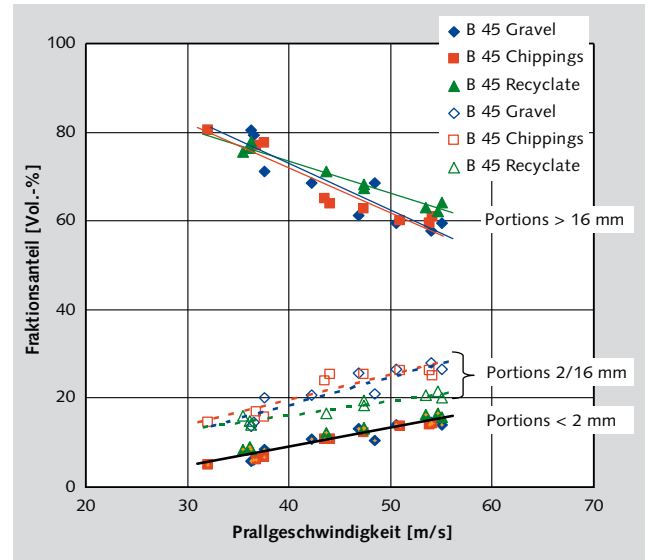
burg [3, 4]. Mit dieser Apparatur ist es möglich, Probekörper bis zu einem Durchmesser von 150 mm, aber auch unregelmäßig geformte Probekörper auf eine Prallplatte zu schießen. Dazu wird ein Geschossträger, der den Probekörper aufnimmt, in ein Führungsrohr eingebracht und durch schlagartig entspannte Druckluft beschleunigt. Am Ende des Führungsrohres wird der Geschossträger abgebremst, der Probekörper fliegt infolge seiner Trägheit weiter und wird an der Prallplatte zerkleinert. Die Geschwindigkeit des Probekörpers wird mittels Lichtschranken gemessen. Es können Geschwindigkeiten zwischen 30 m/s und 60 m/s realisiert werden. In der [Tabelle 3](#) sind die aus der Festbetonrohddichte und dem Probendurchmesser berechneten Massen der Betonprobekörper, die gemessenen Geschwindigkeiten und die daraus berechnete kinetische Energie der Probekörper zusammengestellt.

Die deutlichsten Masseunterschiede bestehen zwischen dem hochfesten Beton und dem Leichtbeton. Der Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen ist etwas leichter als die Betone aus natürlichen Gesteinskörnungen. Durch die Variation der Prallgeschwindigkeiten wird erreicht, dass ein genügend breiter Überlappungsbereich für die Energien, mit welchen die Betonkörper beansprucht werden, existiert.

Die in [1] beschriebenen Prallversuche, die hier zum Vergleich herangezogen werden, fanden in einem Prallbrecher mit einem Rotordurchmesser von 1000 mm und einer Rotorbreite von 1250 mm statt.

3 Methoden zur Beurteilung der Zerkleinerungsprodukte

Die Produkte des Zerkleinerungsvorgangs wurden im Hinblick auf die Korngrößenverteilung, die Kornform und die Rohddichte beurteilt.

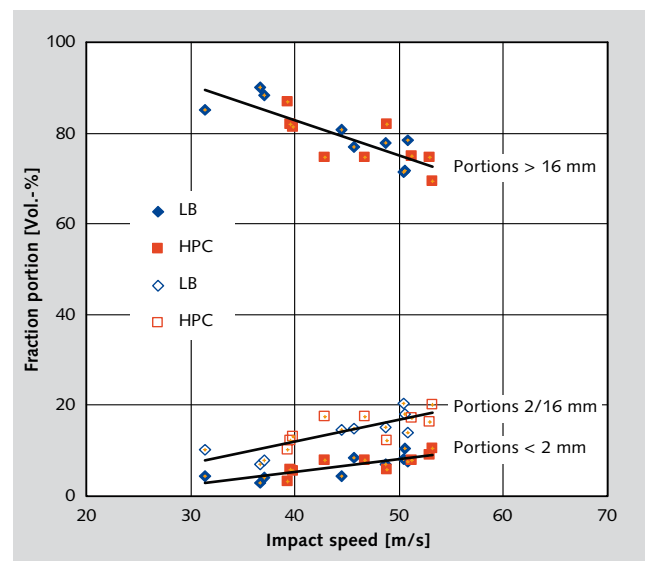


6 Fraktionsanteile für die Betone der Festigkeitsklasse B 45 (Kiesbeton $\beta_{D, 28 d} = 50,0 \text{ N/mm}^2$, Splittbeton $\beta_{D, 28 d} = 58,3 \text{ N/mm}^2$, RC-Beton $\beta_{D, 28 d} = 53,0 \text{ N/mm}^2$)
 Fraction portions of the concretes of the strength class B 45 (gravel concrete $\beta_{D, 28 d} = 50,0 \text{ N/mm}^2$, chippings concrete $\beta_{D, 28 d} = 58,3 \text{ N/mm}^2$, RC concrete $\beta_{D, 28 d} = 53,0 \text{ N/mm}^2$)

The impact tests described in [1], used in this case for comparison, were carried out in an impact crusher with a rotor diameter of 1000 mm and a rotor width of 1250 mm.

3 Methods for the evaluation of the comminuted products

The products of the comminution process are evaluated as regards the particle size distribution, the particle shape and the apparent density.



7 Fraktionsanteile für den hochfesten Beton HPC und den Leichtbeton LB (HPC $\beta_{D, 28 d} = 91,4 \text{ N/mm}^2$, LB $\beta_{D, 28 d} = 52,9 \text{ N/mm}^2$)
 Fraction portions of the high-strength concrete HPC and the lightweight concrete LB (HPC $\beta_{D, 28 d} = 91,4 \text{ N/mm}^2$, LB $\beta_{D, 28 d} = 52,9 \text{ N/mm}^2$)



The particle size and shape distributions are measured by means of photo-optical analysis using the measuring instrument HAVER CPA 4 [5]. The measuring principle is based on the photo-optical registration of the particles to be analyzed and their two-dimensional shadow projection. A sufficient number of particles and the shadow projections from various directions (due to the rotation of the particles) ensure statistically reliable results and provide numeric evaluation criteria for the particle size and shape as well as the surface state of the particles based on the image evaluation (Fig. 2). The particle size as the diameter of a circle, the area of which corresponds to the area of the shadow projection of the particle, is calculated to determine the particle size distribution. The number of particles in the grain classes is determined as weight. The volume distribution is calculated via the equivalent diameter. The sphericity and the length-width ratio are used to evaluate the particle shape. The sphericity indicates the deviation of the measured shadow projections from a circle area with the same surface area. $SPHT = 1$ is valid for spherical particles. The length-width ratio describes the flakiness of the particles.

The apparent density was determined on the dried fractions 8/31.5 and > 31.5 by means of powder pycnometry using the measuring instrument Geopyc. With this instrument the volume of the sample is measured by the displacement of a liquid-like medium. A fine powder (DryFlo) with a defined particle size range is used as the measuring medium. Thus, the apparent density can be determined in the dry state and measuring uncertainties which are caused by the water absorption in case of porous solids can be avoided.

4 Influences of the concrete type on the comminution result

4.1 Particle size distribution of the crushed products

In order to define the range, in which the particle size distributions of the crushed products are moving, the screening characteristics of the finest and of the coarsest product are shown in Fig. 3. The screening characteristic of the finest product, which resulted from the comminution of a gravel concrete B 25 at impact speeds of 50 to 60 m/s, corresponds more or less to that of a normal impact crusher product up to a particle size of approx. 4 mm. In the range > 4 mm the concrete particle sizes produced in the impact crusher are finer. This is caused by the multiple stress of the coarser components in the impact crusher before they leave the crushing chamber. This type of multiple stress does not occur during the impact tests with the compressed-air cannon.

The screening characteristic of the coarsest product resulting from the lightweight concrete at a low impact speed of 20 to 30 m/s is clearly below that of the finest grain size. These extreme values already show that the concretes investigated differ as regards their comminution behaviour and that this can be shown by means of the impact tests.

Die Messung der Korngrößen- und der Kornformverteilungen erfolgte mittels fotooptischer Analyse mit dem Messgerät HAVER CPA 4 [5]. Das Messprinzip beruht darauf, dass die zu analysierenden Partikel fotooptisch erfasst und als zweidimensionale Schattenprojektionen dargestellt werden. Eine ausreichende Anzahl der Partikel und die Erstellung der Schattenprojektionen aus verschiedenen Richtungen (durch Rotation der Teilchen) ermöglichen statistisch sichere Aussagen und liefert auf der Basis der Bildauswertung numerische Beurteilungskriterien für die Korngröße, Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der Partikel (**Bild 2**). Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wird die Partikelgröße als Durchmesser eines Kreises, dessen Flächeninhalt der Fläche der Schattenprojektion des Partikels entspricht, berechnet. Als Menge wird die Anzahl der Teilchen in den Kornklassen bestimmt und über den Äquivalentdurchmesser die Volumenverteilung berechnet. Zur Bewertung der Kornform wurden die Sphärizität und das Länge-Breite-Verhältnis herangezogen. Die angegebene Sphärizität gibt die Abweichung der gemessenen Schattenprojektionen von einer Kreisfläche gleichen Flächeninhalts an. Für kugelförmige Partikel gilt $SPHT = 1$. Das L/B-Verhältnis beschreibt die Plattigkeit der Partikel.

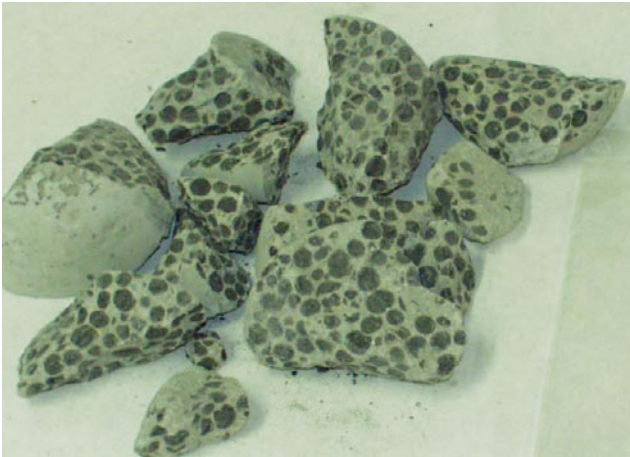
Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte an den getrockneten Fraktionen 8/31,5 und > 31,5 mittels Pulverpyknometrie mit dem Messgerät Geopyc. Mit diesem Gerät wird das Volumen der Probe durch die Verdrängung eines flüssigkeitsähnlichen Mediums gemessen. Als Messmedium dient ein feines Pulver (DryFlo) mit definiertem Kornband. Dadurch kann die Rohdichte im trockenen Zustand ermittelt werden. So können Messunsicherheiten, welche bei porösen Feststoffen durch die Wasseraufnahme verursacht werden, umgangen werden.

4 Ergebnisse zu den Einflüssen der Betonart auf das Zerkleinerungsergebnis

4.1 Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte

Um den Bereich abzustecken, in dem sich die Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte bewegen, sind im **Bild 3** die Durchgangskennlinien des feinsten und des größten Produkts dargestellt. Die Durchgangskennlinie des feinsten Produkts, das bei der Zerkleinerung eines Kiesbetons B 25 bei Prallgeschwindigkeiten von 50 bis 60 m/s entstand, entspricht bis zu einer Partikelgröße von ca. 4 mm in etwa der eines üblichen Prallbrecherprodukts. Im Bereich > 4 mm sind die im Prallbrecher erzeugten Betonkörnungen feiner. Ursache ist die Mehrfachbeanspruchung der größeren Bestandteile im Prallbrecher, bevor diese den Brechraum verlassen. Eine solche Mehrfachbeanspruchung tritt bei den Prallversuchen mit der Druckluftkanone nicht auf.

Die Durchgangskennlinie des größten Produkts, das aus dem Leichtbeton bei einer niedrigen Prallgeschwindigkeit von 20 bis 30 m/s hervorging, liegt deutlich unter der feinsten Körnung. Bereits aus diesen Extremwerten geht hervor, dass sich die untersuchten Betone in ihrem



8 Gegenüberstellung der Zerkleinerungsprodukte aus Leichtbeton (a) und hochfestem Beton (b)
Comparison of the comminution products of lightweight concrete (a) and high-strength concrete (b)

Zerkleinerungsverhalten unterscheiden und dass dies mit den Prallversuchen abgebildet werden kann.

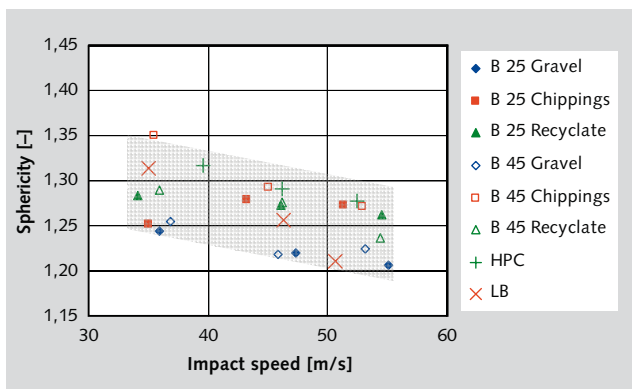
Die Fraktionsanteile der Zerkleinerungsprodukte (Bild 4) weisen für den mit hohen Prallgeschwindigkeiten beanspruchten Normalbeton drei Maxima auf. Die Maxima im Sandbereich und im Splittbereich rühren von den Zerkleinerungsprodukten her. Das Maximum bei Korngrößen > 31,5 mm geht auf grobe Betonbruchstücke zurück. Die groben Bruchstücke stellen praktisch die in [4] beschriebenen Restkegeln dar, die auf der Seite der Betonkugel zurückbleiben, die der beanspruchten Seite gegenüber liegt. Für den Leichtbeton werden überwiegend grobe Bruchstücke mit Korngrößen > 31,5 mm gefunden.

Im Bild 5 sind die Fraktionsanteile von den drei Betonen der Festigkeitsklasse B 25 mit unterschiedlichen Zuschlägen in Abhängigkeit von der Prallgeschwindigkeit gegenübergestellt. Unterschieden wurde zwischen dem Sandanteil 0/2 mm, dem Splittanteil 2/16 mm und dem Anteil > 16 mm. Die Einteilung wurde unter dem Blickwinkel der Wiederverwertung gewählt. Die Sandfraktion ist nach den aktuellen Vorschriften nicht als rezyklierte Gesteinskörnung

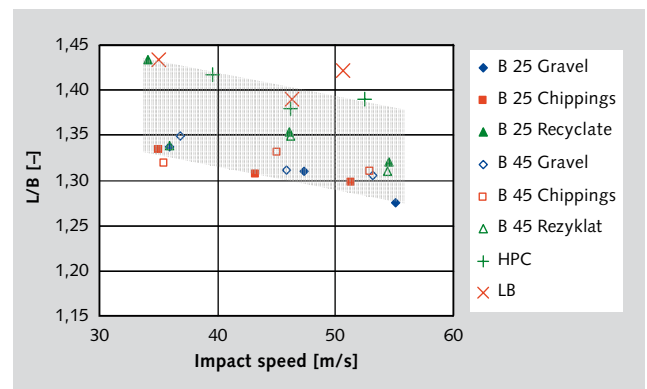
The fraction portions of the crushed products (Fig. 4) have three maxima as regards the normal concrete stressed with high impact speeds. The maxima in the gravel and chippings range are due to the crushed products. The maximum at grain sizes > 31.5 mm is due to coarse concrete fragments. The coarse fragments virtually represent the residual cones described in [4], which are left on the side of the concrete ball opposite the stressed end. As regards the lightweight concrete, predominantly coarse fragments with particle sizes > 31.5 mm are found.

The fraction portions of the three concretes of the strength class B 25 with different aggregates are compared in Fig. 5 as a function of the impact speed. A distinction is made between the sand portion of 0/2 mm, the chippings portion 2/16 mm and the portion > 16 mm. The grading was chosen from the point of view of reuse. According to the present regulations, the sand fraction cannot be used as a recycled aggregate for concrete manufacture.

There are no differences in the fraction portions as regards the gravel and chippings concretes. However, it should be mentioned that the RC concrete of the strength class B 25



9 Sphärizität der Partikel der Fraktion 8/31,5 mm in Abhängigkeit von der Prallgeschwindigkeit
Sphericity of the particles of the fraction 8/31.5 mm as a function of the impact speed



10 L/B-Verhältnis der Partikel der Fraktion 8/31,5 mm in Abhängigkeit von der Prallgeschwindigkeit
Length-width ratio of the particles of the fraction 8/31.5 mm as a function of the impact speed

für die Betonherstellung verwertbar.

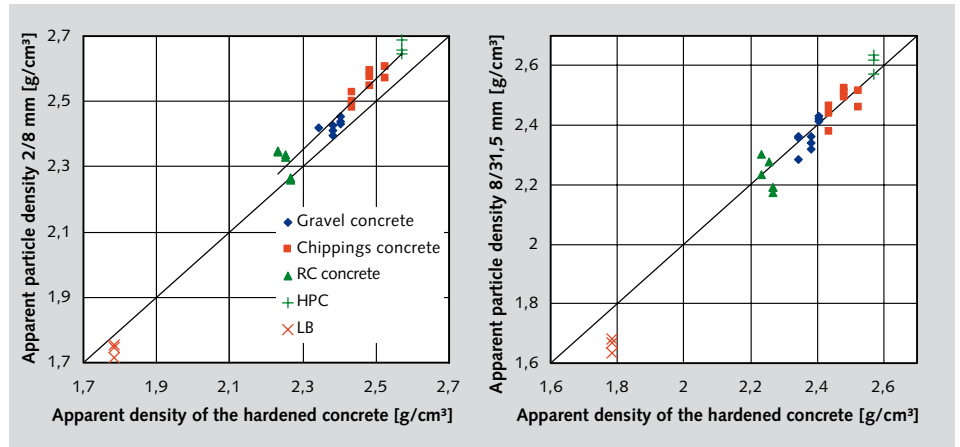
Für die Kies- und Splittbetone unterscheiden sich die Fraktionsanteile nicht. Festzustellen ist aber, dass der RC-Beton der Festigkeitsklasse B 25 einen höheren Anteil wenig zerkleinerter Bruchstücke > 16 mm enthielt. Parallel dazu tritt eine Verringerung der Fraktionsanteile 2/16 mm auf. Bei der Sandfraktion tritt keine Differenzierung zwischen den drei Betonarten auf.

Bei der Festigkeitsklasse B 45 sind die Unterschiede zwischen dem Beton mit rezyklierten Zuschlägen einerseits und den Kies- bzw. Splittbetonen andererseits noch in Ansätzen nachweisbar. Aus Bild 6 ist abzulesen, dass nur noch bei hohen Prallgeschwindigkeiten eine Differenzierung zwischen dem RC-Beton und den Kies- und Splittbetonen auftritt.

Der hochfeste Beton und der Leichtbeton lassen sich erheblich schwieriger zerkleinern (Bild 7). Insgesamt werden nur ungefähr 30 % auf Korngrößen < 16 mm zerkleinert. Die

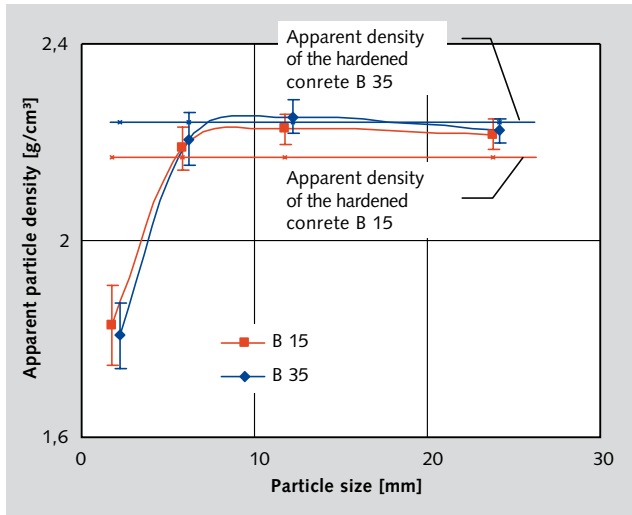
included a higher portion of less crushed fragments > 16 mm. Parallel to this, a decrease of the fraction portions 2/16 mm occurred. As regards the sand fraction, there is no differentiation between the three concrete types.

As regards the strength class B 45, the beginnings of differences between the concrete with recycled aggregates, on the one hand, and the gravel and chippings concretes, on the



11 Gegenüberstellung der Rohdichten der Festbetone und der Zerkleinerungsprodukte (Prallgeschwindigkeit 50–60 m/s)

Comparison of the apparent densities of the hardened concrete and the comminution products (impact speed 50–60 m/s)



12 Rohdichten der Rezyklate, hergestellt im Prallbrecher im Vergleich zur Rohdichte der Ausgangsbetone

Apparent densities of the recyclates produced in the impact crusher, compared to the apparent density of the original concretes

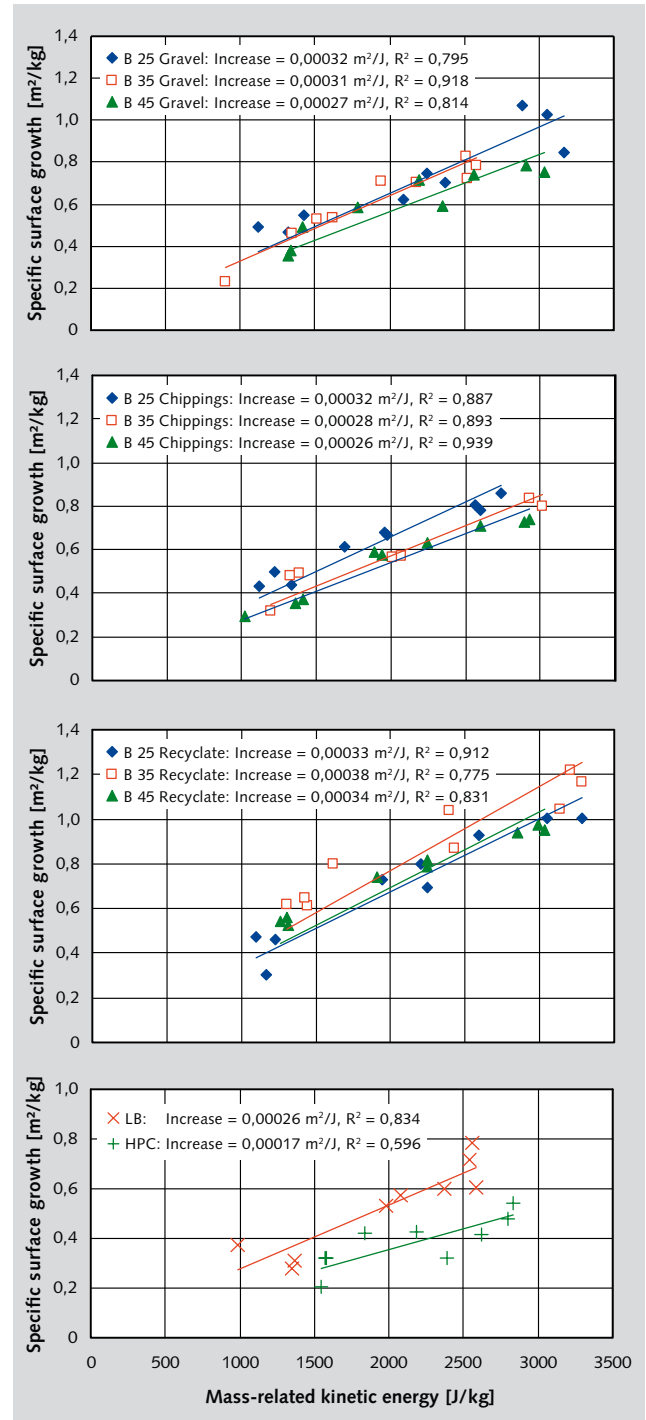
wenig zerkleinerten Anteile dominieren. Überraschend ist, dass beide Betone nahezu identische Volumenanteile in den betrachteten Fraktionen aufweisen, die mit zunehmender Prallgeschwindigkeit mit dem gleichen Gradienten ansteigen.

Die Zerkleinerungsprodukte des Leichtbetons sind im Bild 8 denen des hochfesten Betons gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Versagen beim Leichtbeton nicht in der Mörtelmatrix oder an der Phasengrenze zwischen Zuschlag und Zementstein sondern im Zuschlag erfolgt.

4.2 Kornformen der Zerkleinerungsprodukte

Bei den Kornformen wurden die Kennwerte Sphärität und L/B-Verhältnis jeweils für die Fraktion 8/31,5 mm dargestellt (Bild 9 und Bild 10). Für beide Kennwerte ist die Tendenz festzustellen, dass mit zunehmenden Geschwindigkeiten, mit welchen die Betonkugeln auf die Prallplatte auftrafen, sowohl die Sphärität als auch das L/B-Verhältnis abnahmen. Die Partikel werden also runder und gedrungener. Die Streuweite ist jeweils erheblich. Die Zerkleinerungsprodukte aus den Kiesbetonen liegen an der unteren Begrenzung des Streufeldes, weisen also die runderen Kornformen auf, was auf Grund der Rundheit der ursprünglichen Zuschläge plausibel erscheint. Die Splittbetone und die ebenfalls aus Splitt hergestellten hochfesten Betone ordnen sich zumindest bei den Sphäritätswerten darüber ein, was eine stärkere Abweichung von der Kugelform bedeutet. Das könnte mit den kantigeren Kornformen der in diesen Betonen enthaltenen Zuschläge erklärt werden.

Die Kornform der aus Betonen erzeugten Brechprodukte wird also in gewissem Umfang von der Genese der Ursprungsbetone beeinflusst. Aus Betonen mit natürlich gerundeten Zuschlägen entstehen Rezyklate mit geringeren Sphäritätswerten als aus Betonen, die Splitt enthalten. Auf Leichtbetone trifft diese Aussage nicht zu, weil hier die Zuschläge selbst bei der Zerkleinerung zerstört werden.



13 Abhängigkeit der Zunahme der spezifischen Oberfläche von der massebezogenen kinetischen Energie

Increase of the specific surface as a function of the mass-related kinetic energy

other hand, can be verified. Fig. 6 shows that a differentiation between the RC concrete and the gravel and chippings concretes only occurs with high impact speeds.

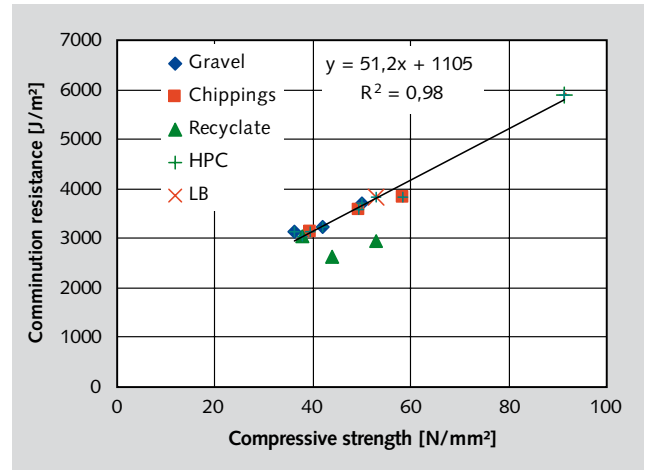
It is considerably more difficult to crush the high-strength concrete and the lightweight concrete (Fig. 7). Altogether only about 30 % are crushed down to particle sizes > 16 mm. The less crushed portions dominate. Surprisingly both concretes had almost identical volume portions in the fractions

4.3 Dichten der Zerkleinerungsprodukte

Beton stellt – vereinfacht dargestellt – einen Kompositbaustoff aus Zuschlägen und Zementstein dar. Beide Bestandteile unterscheiden sich in ihrer Dichte. Dadurch kann an den Rohdichten der Zerkleinerungsprodukte abgelesen werden, in wie weit durch die Prallzerkleinerung ein Aufschluss bewirkt wird. Verschiebt sich die Rohdichte gegenüber dem Ausgangsprodukt, ist das ein Hinweis auf eine Veränderung der Kompositzusammensetzung.

Im **Bild 11** sind die Kornrohichten der Zerkleinerungsprodukte 8/31,5 mm und 2/8 mm den Rohdichten der jeweiligen Festbetone gegenübergestellt. Für die Normalbetone und den hochfesten Beton sind die Rohdichten der groben Fraktion gegenüber dem Ausgangsbeton kaum verändert. Die wenig zerkleinerten, groben Partikel entsprechen in ihrer Zusammensetzung also dem Ausgangsbeton. Die mittleren Fraktionen 2/8 mm, die eine Zerkleinerung erfahren haben, weisen dagegen systematisch höhere Dichten als der Ausgangsbeton auf. In diesen Fraktionen ist also der gegenüber dem Zementstein dichtere Zuschlag angereichert.

Der Effekt der Anreicherung des Zuschlags in den mittleren Fraktionen tritt auch bei den im Prallbrecher erzeugten Betonrezyklaten auf (**Bild 12**). An diesen Rezyklaten wurden die Rohdichten aller entstandenen Fraktionen gemessen. Erwartungsgemäß ist die Rohdichte der Fraktion < 4 mm



14 Fiktiver Zerkleinerungswiderstand in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Betone

Fictitious comminution resistance as a function of the compressive strength of the concretes

considered, which increase with increasing impact speed at the same gradient.

The comminution products of the lightweight concrete are compared to those of the high-strength concrete in **Fig. 8**. It can be clearly seen that the failure with the lightweight concrete does not occur in the mortar matrix or near the phase

geringer als die der mittleren Fraktion, weil sich der Zementstein, der in der mittleren Fraktion abgereichert ist, in der Sandfraktion wiederfindet. Die groben Fraktionen weisen Rohdichten auf, welche im Bereich der Rohdichte des Ausgangsbetons liegen. Bei dem Leichtbeton ergeben sich andere Effekte. Sowohl die groben als auch die feineren Zerkleinerungsprodukte weisen geringere Rohdichten als der Ausgangsbeton auf. Diese Abnahme weist auf eine Anreicherung des leichteren Zuschlags hin.

5 Zerkleinerungswiderstände der untersuchten Betone

Um den Widerstand eines Materials gegen Zerkleinerung zu erfassen, sind verschiedene Zerkleinerungsgesetze entwickelt worden. Ansätze zur Bruchwahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von Materialparametern sind in [6] zusammengestellt. Sie konnten hier allerdings nicht angewandt werden. Deshalb wurde der vereinfachende Ansatz gewählt, dass der erreichte Oberflächenzuwachs der massebezogenen kinetischen Energie der Betonkugeln vor dem Aufprall proportional ist. Der Oberflächenzuwachs wurde aus den in 45 Kornklassen unterteilten Korngrößenanalysen der Zerkleinerungsprodukte unter der vereinfachenden Annahme kugelförmiger Partikel berechnet.

Wie **Bild 13** zu entnehmen ist, werden für alle untersuchten Betonarten und -güten lineare Abhängigkeiten zwischen dem spezifischem Oberflächenzuwachs und der massenbezogenen kinetischen Energie gefunden. Es besteht also eine

boundary between the aggregate and the hardened cement paste, but in the aggregate.

4.2 Particle shapes of the crushed products

As regards the particle shapes, the parameters sphericity and length-width ratio, respectively, are represented for the fraction 8/31.5 (**Figs. 9** and **10**). Both parameters exhibited the tendency that both the sphericity and the length-width ratio decreased with increasing velocities with which the concrete balls hit the impact plate. This means the particles are becoming rounder and more compact. The scattering width, however, is significant. The crushed products of the gravel concretes are at the lower limit of the scattering field, which seems to be plausible due to the roundness of the original aggregates. At least as regards the sphericity values, the chippings concretes and the high-strength concretes, which are also made from chippings, rank higher, which means a stronger deviation from the spherical shape. The more angular particle shapes of the aggregates contained in these concretes could explain this.

Thus, to a certain extent, the particle shape of the crushed concrete products is influenced by the genesis of the original concretes. Concretes with naturally rounded aggregates lead to recyclates with lower sphericity values than concretes containing chippings. This statement does not apply to lightweight concretes because in this case the aggregates are destroyed during comminution.

Proportionalität zwischen dem erreichten Oberflächenzuwachs und der aufgewandten Zerkleinerungsenergie.

$$\Delta A_m \sim E_m$$

ΔA_m : Oberflächenzuwachs in m^2/kg

E_m : aufgewandte Zerkleinerungsenergie in J/kg

Mit Ausnahme der Betone aus den Rezyklaten ist eine Systematik zwischen dem Anstieg der linearen Funktionen und der Festigkeitsklasse zu erkennen. Je höher die Festigkeitsklasse des Betons ist, umso geringer ist der Anstieg.

Der bei einem bestimmten Energieeintrag erreichte Oberflächenzuwachs kann bei unveränderter Aufgabekorngröße und konstanten Zerkleinerungsbedingungen – wie bei den Prallversuchen realisiert – als Kennwert für die Zerkleinerbarkeit angesehen werden. Wenn der Oberflächenzuwachs hoch ist, ist der Beton leicht zerkleinerbar. Er weist also einen geringen Zerkleinerungswiderstand auf. Wird dagegen ein geringer Oberflächenzuwachs pro Energieeintrag erzielt, liegt ein schwer zerkleinerbarer Beton mit einem hohen Zerkleinerungswiderstand vor. Das Reziprok des Anstiegs kann also als „Brutto-Zerkleinerungswiderstand“ interpretiert werden, der von der Betongüte abhängig sein sollte.

$$\Delta A_m \sim (1/R_{\text{Beton}}) \cdot E_m$$

R_{Beton} : Brutto-Zerkleinerungswiderstand in J/m^2

$R_{\text{Beton}} = f(\text{Druckfestigkeit})$

4.3 Densities of the crushed products

In simplified terms, concrete represents a composite building material consisting of aggregates and hardened cement paste. Both components differ as regards their density. Therefore, the apparent densities of the crushed products show to what extent impact comminution causes disintegration. If the apparent density is different compared to the original product, this indicates a change in the composition of the material.

Fig. 11 shows a comparison between the apparent particle densities of the crushed products 8/31.5 mm and 2/8 mm and the apparent densities of the corresponding hardened concretes. The apparent densities of the coarse fraction of the normal concretes and the high-strength concrete are hardly changed compared to the original concrete. The composition of the hardly crushed, coarse particles corresponds to the original concrete. The mean fractions of 2/8 mm, which had been crushed, however, exhibit systematically higher densities than the original concrete. In these fractions the denser aggregate is enriched compared to the hardened cement paste.

The effect of the concentration of the aggregate in the mean fractions also occurs in the concrete recyclates produced in the impact crusher (Fig. 12). The apparent densities of the fractions < 4 mm were also measured on these recyclates. As expected, the apparent density of this fraction is lower because the hardened cement paste, which is depleted in the mean fraction, is again found in the sand fraction. The coarse

„Brutto“ steht dabei für die Tatsache, dass ein Teil der aufgewandten Zerkleinerungsenergie zur Deckung von Energieverlusten verbraucht wird und somit nicht für den Oberflächenzuwachs zur Verfügung steht.

Im **Bild 14** ist der Zerkleinerungswiderstand für alle untersuchten Betone in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit in einem Diagramm dargestellt. Danach steigt der Zerkleinerungswiderstand mit zunehmender Druckfestigkeit in dem untersuchten Bereich von 36 bis 91 N/mm² linear an. Mit Ausnahme der RC-Betone B 35 und B 45 lassen sich alle experimentellen Daten mit einer linearen Regressionsbeziehung erfassen, die einen hohen Korrelationskoeffizienten aufweist.

Aus **Bild 14** kann abgelesen werden, dass der Übergang von einem Beton mit einer Druckfestigkeit von 40 N/mm², der als typischer Normalbeton angesehen wird, zu einem Hochfesten Beton zu einer Verdoppelung des Zerkleinerungswiderstandes führt. Bei technischen Brechprozessen wären ein beträchtlich gröberes Produkt oder ein Rückgang des Durchsatzes die Folgen.

6 Fazit

Durch Zerkleinerungsversuche unter definierten Bedingungen konnte nachgewiesen werden, dass die Betonart und -güte das Zerkleinerungsergebnis beeinflusst. Bei den Normalbetonen zeigen der Kies- und der Splittbeton ähnliche Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte. Der Beton, bei welchem die groben Gesteinskörnungen aus Betonrezyklaten bestanden, ließ sich in der B 25-Qualität zum Teil schwieriger zerkleinern. Höhere Anteile der wenig zerkleinerten groben Fraktion > 16 mm traten auf.

Die Kornform der ursprünglichen Zuschläge spiegelt sich in gewissem Umfang in der Kornform der Brechprodukte wieder. Aus Betonen mit Kieszuschlägen entstehen Rezyklate mit höheren Sphärizitäten als aus Betonen, die Splitte enthalten.

In Übereinstimmung mit den zum Vergleich herangezogenen Versuchen in einem Prallbrecher finden bei der Prallzerkleinerung parallel zur Korngrößenreduktion in geringem Umfang auch Aufschlussvorgänge statt. Das führt zu einem Anstieg der Kornrohichte der mittleren Fraktionen infolge der Zementsteinanreicherung. Die Kornrohichte der Sandfraktionen nimmt ab, weil hier der Zementstein angereichert ist.

Für alle untersuchten Betone bestand ein linearer Zusammenhang zwischen dem durch die Zerkleinerung hervorgerufenen spezifischen Oberflächenzuwachs und der massenbezogenen kinetischen Energie, die aufgewandt wurde. Es wurde nachgewiesen, dass der Zerkleinerungswiderstand mit der Druckfestigkeit des zu zerkleinernden Betons zunimmt. Bei der Zerkleinerung von Betonen höherer Festigkeitsklassen müssen also gröbere Zerkleinerungsprodukte erwartet werden.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden 2002 an der Versuchsapparatur des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik an der

fractions have apparent densities that are within the range of the apparent density of the original concrete. Different effects arise with the lightweight concrete. Both the coarser and finer comminution products have lower apparent densities than the original concrete. This decrease is an indication of an enrichment of the lighter aggregate.

5 Comminution resistances of the tested concretes

Various comminution laws have been developed to register the resistance of a material to crushing. Approaches regarding the probability of fracture have been compiled in [6] taking into account material parameters. Therefore, the simplifying approach was chosen, i. e. that the achieved surface increase of the mass-related kinetic energy of the concrete balls is proportional before the impact. The surface increase was calculated on the basis of the particle-size analyses of the crushed products, which were subdivided into 45 grain classes, with the simplifying assumption of spherical particles.

Fig. 13 shows that linear dependences between the specific surface increase and the mass-related kinetic energy were found. Consequently, there is a proportionality between the achieved surface increase and the comminution energy used.

$$\Delta A_m \sim E_m$$

ΔA_m : surface increase in m²/kg

E_m : comminution energy in J/kg.

Except the concretes from the recyclates, a system can be recognized between the increase of the linear functions and the strength class. The higher the strength class of the concrete, the lower is the increase.

The surface increase achieved with a certain energy input can be regarded as a characteristic value for the comminution work with unchanged feed particle size and constant comminution conditions – as was the case in the impact tests. If the surface increase is high, it is easy to crush the concrete, i.e. it has a low comminution resistance. If, on the other hand, the surface growth per energy input is low, it is difficult to crush the concrete due to its high comminution resistance. Consequently, the reciprocal of the increase can be interpreted as “gross comminution resistance”, which should depend on the concrete quality.

$$\Delta A_m \sim (1/R_{\text{concrete}}) \cdot E_m$$

R_{concrete} : gross comminution resistance in J/m²

$R_{\text{concrete}} = f(\text{compressive strength})$.

“Gross” stands for the fact that part of the comminution energy used is consumed to cover energy losses and, consequently, is not available for the surface growth.

In a diagram, **Fig. 14** shows the comminution resistance of all tested concretes as a function of the concrete strength. According to this, the comminution resistance increases linearly with increasing compressive strength in the investigated range from 36 to 91 N/mm². Except the RC concretes B 35 and B 45, all experimental data can be acquired with a linear regression relation that has a high correlation coefficient. **Fig. 14** shows that the transition from a concrete with a com-

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg durchgeführt. Für die Bereitstellung der Anlage und die Unterstützung bei den Versuchen möchte ich mich bei Herrn Prof. Tomas und Herrn Dr. Schubert bedanken.

Literatur/Literature

- [1] Diedrich, R.: Einfluss der Brechwerkzeuge auf die Eigenschaften von Recycling-Granulaten im Hinblick auf eine Eignung als Zuschlag für Beton nach DIN 1045. 1998. <http://www.b-i-m.de/Berichte/Z0198frame.htm>
- [2] Schrimpf, M.: Aufschlußzerkleinerung von Beton. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1998.
- [3] Schreier, M.; Gröger, T.; Ehlers, S.; Tomas, J.: Aufschlußzerkleinerung von Beton durch Prallbeanspruchung. AufbereitungsTechnik 40, (1999), Heft 5, S. 232-241.
- [4] Schubert, W.; Khanal, M.; Tomas, J.: Der Einsatz von DEM-Simulationen zur Beschreibung der Aufschlußzerkleinerung. Vortrag zur GVC-Fachausschußsitzung „Zerkleinern“ vom 10. bis 11. April 2002 in Freiburg. Wissenschaftliche Kurzmitteilung Chemie Ingenieur Technik – CIT, Volume 76, Issue 1-2, Pages 73-76.
- [5] Stark, U.; Müller, A.: Korngröße und Kornform von Gesteinskörnungen und ihr Potenzial für die Betonforschung. Beton 9/2006, S. 390-397
- [6] Antonyuk, S. Deformations- und Bruchverhalten von kugelförmigen Granulaten bei Druck- und Stoßbeanspruchung. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 2006

pressive strength of 40 N/mm², which can be regarded as typical normal concrete, to a high-strength concrete leads to doubling of the comminution resistance. In case of technical crushing processes, a considerably coarser product or a reduced throughput would be the consequence.

6 Conclusion

It could be proved by means of crushing tests under defined conditions that the type and quality of the concrete influence the comminution result. As regards the normal concretes, the gravel and chippings concrete exhibit similar particle-size distributions of the crushed products. In part it was more difficult to crush the concrete of the quality B 25, in which the coarse aggregates consisted of concrete recyclates. Higher portions of the less crushed coarse fraction > 16 mm could be observed.

The particle shape of the original aggregates is reflected, to a certain extent, in the particle shape of the crushed products. Concretes with gravel aggregates result in recyclates with higher sphericities compared to concretes containing chippings.

In conformity with the tests in an impact crusher used for comparison, impact comminution also includes, on a minor scale, disintegration processes parallel to particle-size reduction. This leads to an increase of the apparent particle density of the mean fractions due to the depletion of the hardened cement paste. The apparent particle density of the sand fraction is decreased because here the hardened cement paste is enriched.

For all concretes tested there was a linear connection between the specific surface growth caused by the comminution and the mass-related kinetic energy used. It was proved that the comminution resistance increases with the compressive strength of the concrete to be crushed. Consequently, coarser comminution products have to be expected when crushing concretes with higher strength classes.

Acknowledgement

The tests were carried out in 2002 with the test equipment of the Chair of Mechanical Process Engineering at the Magdeburg Otto-von Guericke University. I would like to thank Prof. Tomas and Dr. Schubert for the provision of the equipment and the support given during the tests.