

## Processing and Utilization Possibilities for Fine-Grained Construction Waste < 2 mm

Volker Thome, Sebastian Dittrich, Daniela Wolfram, Joseph Dörmann,  
Robin Gruna and Jochen Nühlen

The goal of the project *BauCycle* is to identify new and economically attractive utilization possibilities for the fine-grained mineral construction waste, which currently can't be reused. There is a need for new processing techniques and innovative product developments which go far beyond the state of the art due to the heterogeneous composition and technical challenges of construction waste. In Germany the building and construction industry is one of the most resource intensive commercial sectors. Annually, about 500 million tons are used for construction. Meanwhile the total stock of buildings with approx. 100 billion tons is a considerable raw materials warehouse, which should be recycled after end of life. But especially for the fine-grained fractions < 2 mm there's no suitable recycling technique available. In Germany alone about 5 million tons of these fines are produced every year, which end up in landfills.

In this project a holistic technological and logistic solution for the closed loop recycling management in the construction sector will be developed. Based on the optical computing approach, a novel opto-pneumatic sorting technique for fine fractions has been generated, which can distinguish particles not just by their color or their difference in brightness, but also by their chemical composition. This approach enables optimal sorting results, because a highly selective separation of e.g. gypsum from concrete particles can be achieved.

The Fraunhofer institute for building physics (IBP) is focusing to develop new products from the sorted fine fractions. It could be demonstrated, that mixtures from limestone and waste concrete can be used as raw material substitutes for the production of autoclaved aerated concrete (AAC). Depending on the composition, up to 40 % of the raw material for AAC could be replaced by fine-grained construction waste material. Another approach is to reuse waste bricks for the production of cement-less building products, so-called geopolymers. The obtained results are very promising as potential utilization possibilities for fines from construction waste.

## Aufbereitung und Verwertungsmöglichkeiten für feinkörnigen Bauschutt < 2 mm

Volker Thome, Sebastian Dittrich, Daniela Wolfram, Joseph Dörmann,  
Robin Gruna und Jochen Nühlen

1.	Herstellung der Referenzmaterialien.....	456
2.	Spektroskopische Analyse von Bauschutt.....	457
3.	Wiederverwertung von Altbeton-Kalksandstein-Mischungen .....	459
3.1.	Herstellung von idealem Bauschutt.....	460
3.2.	Porenbetonherstellung .....	463
3.3.	Charakterisierung des Ersatzmaterials.....	463
3.4.	Phasenanalyse.....	465
3.5.	Mechanische Eigenschaften.....	460
4.	Herstellung von Geopolymeren .....	467
5.	Literatur.....	468

Das Fraunhofer interne Projekt *BauCycle* hat sich als Ziel gesetzt, für die heute nicht nutzbaren Feinfraktionen mineralischer Bauabfälle neue und wirtschaftlich attraktive Verwertungsoptionen zu entwickeln. Aufgrund der stofflichen Heterogenität und den mit der Feinkörnigkeit verbundenen technischen und sicherheitsseitigen Herausforderungen dieses Stoffstroms sind Aufbereitungstechniken, Logistikkonzepte und Produktinnovationen erforderlich, die deutlich über den heutigen Stand hinausgehen. Nur so kann aus der heutigen *Problemfraktion* in Zukunft ein echter Wertstoff werden. Die in diesem Vorhaben adressierte Rückführung feinkörniger Abfallfraktionen in die Produktion ist für eine ressourceneffiziente und nachhaltige Rohstoffwirtschaft eine der wichtigsten Herausforderungen. Gelingt dies nicht, so bleibt die Idee der Kreislaufwirtschaft eine Utopie.

Der Bausektor gehört in Deutschland zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren. Er setzt jährlich etwa 550 Millionen Tonnen an mineralischen Baurohstoffen ein [1]. Der Gesamtbestand an Bauwerken ist mit etwa 100 Milliarden Tonnen inzwischen ein bedeutendes Rohstofflager, das nach Nutzungsende wieder dem Recycling zugeführt werden kann. Speziell für die im Bauschutt anfallenden Feinfraktionen kleinerer zwei Millimeter gibt es derzeit kein geeignetes Recyclingverfahren. Dabei fallen jährlich in Deutschland etwa 5 Millionen Tonnen an [2]. Werden diese mit stofflich ähnlichen Feinfraktionen aus dem Bereich *Boden und Steine* verarbeitet, kann sich das Stoffstrompotenzial sogar verdreifachen.

In diesem Projekt wird eine ganzheitliche technologische wie auch logistische Lösung für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen entwickelt. Hierzu wird ein neuartiges opto-pneumatisches Sortierverfahren für Feinfraktionen entwickelt, welches neben Farb- und Helligkeitserkennung auch chemische Unterschiede in den Partikeln z.B. *sulfatisch* oder *silikatisch* erkennen und nach diesen Kriterien sortieren kann. Damit soll ein optimales Sortierergebnis erzielt werden, da so eine selektive Trennung von Gipspartikeln aus dem Betonabbruch erreicht werden kann. Der Gipsgehalt ist ein entscheidendes Kriterium für die Wiederverwertbarkeit der Betonfraktion.

Aus den nach der Sortierung erhaltenen Fraktionen werden in einem weiteren Forschungsschwerpunkt verschiedene Bauteile hergestellt, um die möglichen Recyclingwege und Verwertungspotentiale darzustellen und die Realisierbarkeit nachzuweisen. Neben der Herstellung von zementfreien Baustoffen, sogenannten Geopolymeren und Granulaten für z.B. Lärmschutzwände oder Leichtbeton werden auch höherwertige Verwendungsmöglichkeiten wie die Herstellung von Porenbetonen untersucht. Der zukünftige Markt für Materialien und Bauteile aus dem Recycling ist groß. So sind beispielsweise poröse mineralische Platten prädestiniert für Schallabsorber in Lärmschutzwänden. 2013 wurden 117.000 Quadratmeter Lärmschutzwände an Straßen und etwa 62 Kilometer entlang an Schienen errichtet.

Da die aus den *BauCycle*-Prozessen entstehenden Produktwertschöpfungsketten sich von den bisher im Bausektor vorhandenen Modellen deutlich unterscheiden, wird begleitend eine Marktplattform entwickelt. Sie unterstützt bei der Markteinführung der Produkte, indem sie der veränderten Komplexität der neuen Wertschöpfungsketten Rechnung trägt und diese transparenter und zugänglicher für die Akteure gestaltet.

## 1. Herstellung der Referenzmaterialien

Zunächst wurden die drei Hauptkomponenten realen Bauschutts nachgestellt. Diese drei Komponenten sind Ziegelmaterial aus Ziegelmauersteinen und Dachplatten, Kalksandstein aus Mauersteinen sowie Beton aus tragenden und nicht tragenden Bauteilen. Das Ziegelmaterial wurde in Form von Ziegelsand mit einem Kornspektrum kleiner zwei Millimeter als Sackware gekauft. Für die Kalksandsteinprobe wurden handelsübliche Kalksandstein-Mauersteine mit einem Backenbrecher zerkleinert und anschließend auf ein Kornspektrum kleiner zwei Millimeter gesiebt. Zwei Betone mit unterschiedlichen Zuschlägen (quarzreicher Kieszuschlag und Kalksteinsplitt) wurden nach praxisnahen Rezepturen gemischt und nach dem Aushärten mittels Backenbrecher und Sieb auf ein Kornspektrum kleiner zwei Millimeter zerkleinert. Im Anschluss wurden alle vier Materialien mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Röntgendiffraktometrie (XRD) auf ihre chemische und mineralogische Zusammensetzung hin untersucht.

Um einen idealen Bauschutt mit bekannter und definierter Zusammensetzung zu erhalten wurden mit den Hauptkomponenten mehrere Mischungen festgelegt (Bild 1).

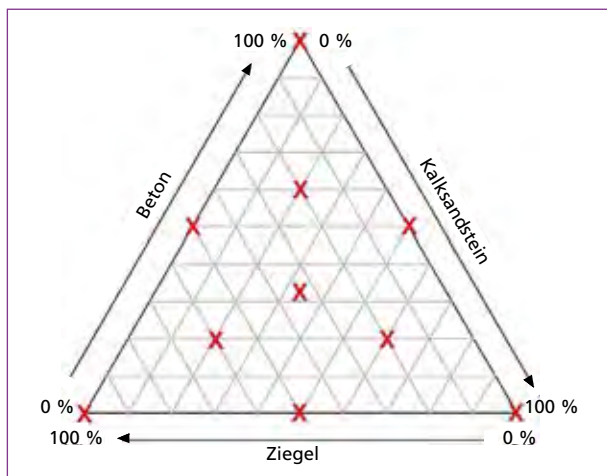


Bild 1:

Zusammensetzung der hergestellten Mischungen aus den drei Hauptkomponenten Beton, Ziegel und Kalksandstein

Von den Ausgangskomponenten wurden je 50 Kilogramm und von den Mischungen je 20 Kilogramm hergestellt. Zusätzlich wurden einzelne Mischungen mit der Komponente Gips vermischt, um deren Einfluss auf die Qualität der Mischungen zu eruieren. Gips wurde im Vorlauf der Arbeiten auf Basis bestehender Forschungsarbeiten als Störstoff identifiziert und deshalb zunächst in den Mischungen für den idealen Bauschutt nicht berücksichtigt.

## 2. Spektroskopische Analyse von Bauschutt

Durch die Fraunhofer Projektpartner IBP (Institut für Bauphysik) und UMSICHT (Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik) wurden dem IOSB (Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung) verschiedene Materialproben von Bauschutt zur Verfügung gestellt. Die Materialproben wurden dabei sowohl künstlich aus Reinmaterialien (z.B. aus neuen Gipsplatten oder aus im Labor hergestelltem Beton) als auch aus realem Bauschutt gewonnen. Für eine definierte Korngrößenverteilung wurden die Materialien zusätzlich auf verschiedene Körnungen gesiebt.

Für die spektroskopische Materialanalyse [4] wurden von den Materialproben hyperspektrale Bilder im Wellenlängenbereich von 300–1.000 nm (VIS-NIR) und 900–2.500 nm (SWIR) aufgenommen. Hierfür wurden zwei verschiedene bildgebende Spektrometer aus dem Hyperspektrallabor des IOSB verwendet. Die hyperspektralen Bilder wurden mit Hilfe von Referenzaufnahmen (Dunkelstrombild und Weißreferenzaufnahme) vorverarbeitet, sodass die Hyperspektralbilder für jeden Bildpunkt die spektrale Reflektanz wiedergeben. Zudem wurde für jedes Bild eine Segmentierungsmaske erstellt, welche die Position des Probenmaterials im Bild markiert. Damit wurde für jede hyperspektrale Bildaufnahme bzw. Materialprobe ein Datensatz von Reflektanzspektren extrahiert.

Für eine erste Begutachtung der Daten wurde für jede Materialprobe ein Mittelwertspektrum mit Standardabweichung berechnet und grafisch dargestellt (Bild 2).

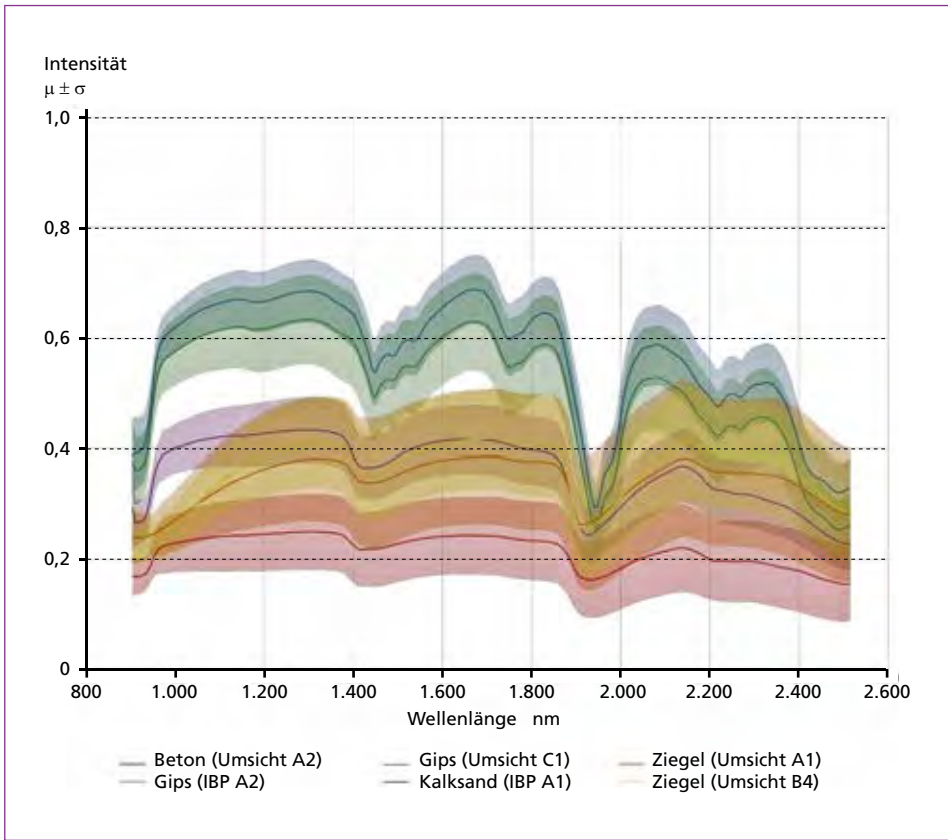


Bild 2: Mittelwerte (mit Standardabweichungen) der Reflektanzspektren ausgewählter Materialproben im SWIR-Spektralbereich

Es ist deutlich erkennbar, dass die Intensitätsverläufe der Reflektanzspektren unterscheidbar sind und Merkmale aufweisen, die für eine optische Materialklassifikation geeignet sind. Insbesondere das Aussortieren von Gips aus Altbeton stellt eine wichtige Voraussetzung für ein erfolgreiches Bauschuttrecycling dar. Da sich diese Materialien im sichtbaren Spektralbereich nur geringfügig anhand ihrer Farbe unterschieden (Bild 3), sind herkömmliche Farbkamera-Sortiersysteme für diese Aufgabenstellungen ungeeignet.

Um die Trennbarkeit der Materialklassen bzw. Reflektanzspektren zusätzlich quantitativ zu bewerten, wurde eine lineare Diskriminanzanalyse (LDA – Linear Discriminant Analysis) auf den spektroskopischen Reflektanzmessungen durchgeführt. Da die Klassifikation mittels LDA auf einer linearen Transformation der Reflektanzmerkmalen beruht, kann das Verfahren direkt in einen Optical-Computing-Ansatz überführt werden.

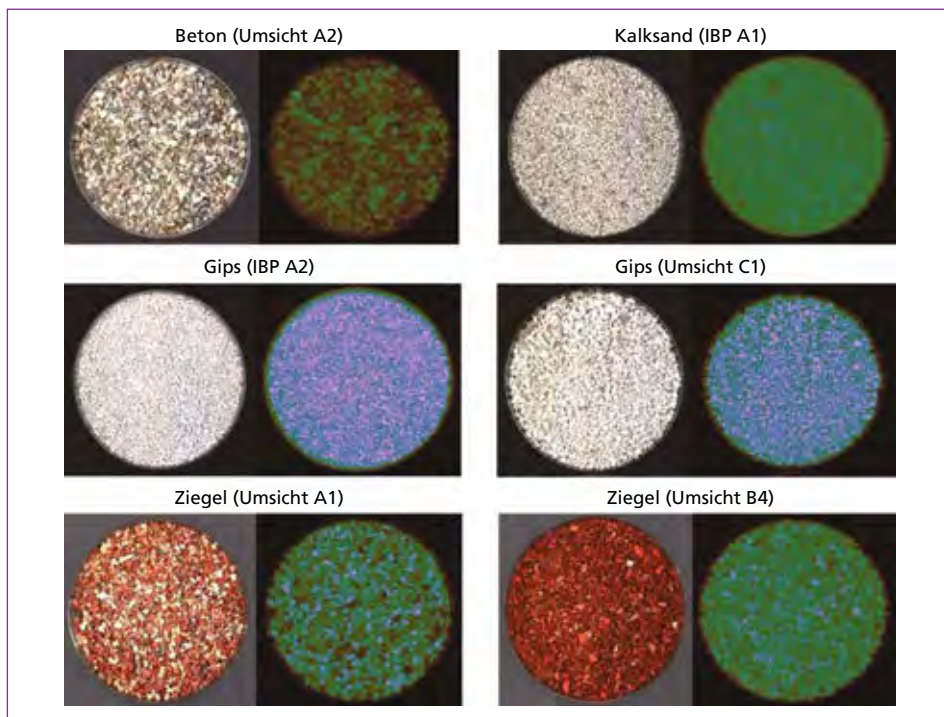


Bild 3: Auswahl der untersuchten Bauschuttproben; links ist je ein mit einer RGB-Farbkamera gewonnenes Farbbild dargestellt, rechts ist das Falschfarbenbild der Hyperspektralkamera gezeigt



Bild 4: Ausgangsmischung Ziegel/Gips (links), Ziegelfraktion nach Aussortieren der Gipsfraktion (rechts)

Eine Untersuchung der Reflektanzspektren im VIS-NIR lieferte ähnliche Ergebnisse und Erkenntnisse. Die Eignung des VIS-NIR-Spektralbereichs für die Materialtrennung wurde tiefergehender untersucht. Dazu wurde als Referenzmischung eine Ziegel-Gips Bauschutt-Mischung mit jeweils gleichen Anteilen (50:50) hergestellt. Diese konnte allein über die Falschfarben-Unterscheidung sortiert werden und es zeigte ein sehr gutes Trennergebnis (Bild 4).

### 3. Wiederverwertung von Altbeton-Kalksandstein-Mischungen

Auf der Grundlage der erfolgreichen ersten Versuche Altbeton als Rohstoff-Ersatz in Porenbeton einzusetzen [3], wurde am IBP eine zweite Masterarbeit durchgeführt mit dem Titel: *Eignung der Feinfraktion aus Bauschuttrecycling als Produktionsrohstoff*

für Porenbeton (Wolfram [5]). Diese Arbeit beschäftigte sich mit dem Einsatz von Bauschuttfractionen als sekundären Rohstoff für die Porenbetonproduktion [5]. Hierfür wurden jeweils 30 % des für die Porenbeton Herstellung verwendeten Quarzsandes durch neun unterschiedlich zusammengesetzte Bauschuttmischungen ersetzt. Bei dem Ersatzmaterial handelte es sich entweder um synthetischen Kalksandstein, Beton mit quarzitischer oder kalzitischer Gesteinskörnung sowie Mischungen aus Kalksandstein mit Beton mit quarzitischer oder mit kalzitischer Gesteinskörnung in unterschiedlichen Verhältnissen.

Um die Auswirkungen des Ersatzmaterials auf die Eigenschaften des Porenbetons zu untersuchen, wurden einaxiale Druckversuche nach DIN EN 772-1 durchgeführt, sowie die chemische als auch mineralogische Zusammensetzung der hergestellten Porenbetonsteine und des Ersatzmaterials bestimmt.

### 3.1. Herstellung von idealem Bauschutt

Um die Zusammensetzung des Bauschutts und dessen Auswirkungen auf den Porenbeton an einem einfachen System untersuchen zu können, wurde in dieser Arbeit ein *idealer Bauschutt* verwendet. Der Fokus der Untersuchungen richtete sich dabei auf die drei Bestandteile Kalksandstein, Beton mit quarzitischer und Beton mit kalzitischer Gesteinskörnung. Während für den Kalksandstein ein handelsüblicher Stein aus dem Baustoffhandel verwendet wurde, wurden sowohl der Beton mit quarzitischer als auch der mit kalzitischer Gesteinskörnung mit einem Wasser/Zement Wert von 0,42 hergestellt. Im Folgenden wird aus Einfachheitsgründen der Beton mit quarzitischer Gesteinskörnung als quarzitischer Beton (BQz) und der Beton mit kalzitischer Gesteinskörnung als kalzitischer Beton (BCc) bezeichnet. Alle drei Baustoffe wurden separat zunächst mit einem Hammer vorzerkleinert, mit einem Backenbrecher gebrochen und im Anschluss mit einem Siebschnitt von 1 mm gesiebt.

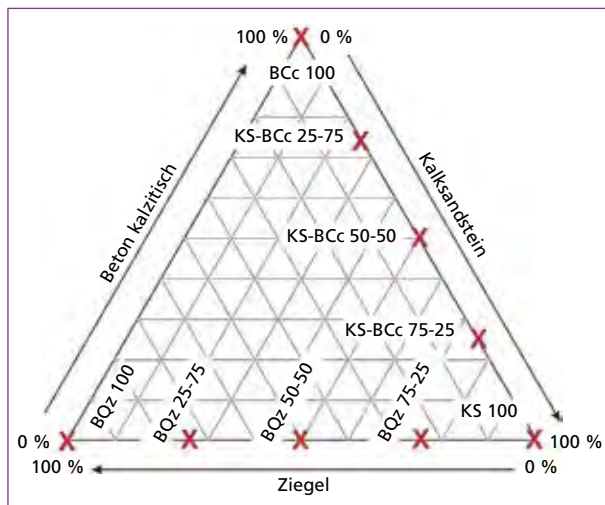


Bild 5:

Zusammensetzung der neun verschiedenen Bauschuttmischungen als Ersatz-Rohstoff für die Herstellung von Porenbeton

# Aschen • Schlacken • Stäube Mineralische Nebenprodukte und Abfälle



Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky et al. • Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

**Aschen • Schlacken • Stäube**  
– aus Abfallverbrennung und Metallurgie –  
2013 (ISBN: 978-3-935317-99-3)  
Preis: 50,00 EUR

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3**  
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –  
2016 (ISBN: 978-3-944310-28-2)  
Preis: 100,00 EUR

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle**  
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –  
2014 (ISBN: 978-3-944310-11-4)  
Preis: 50,00 EUR

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4**  
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –  
2017 (ISBN: 978-3-944310-35-0)  
Preis: 100,00 EUR

## Paketpreis

Aschen • Schlacken • Stäube  
+  
Mineralische Nebenprodukte  
und Abfälle, Band 1 bis 4

**260,00 EUR**  
statt 350,00 EUR

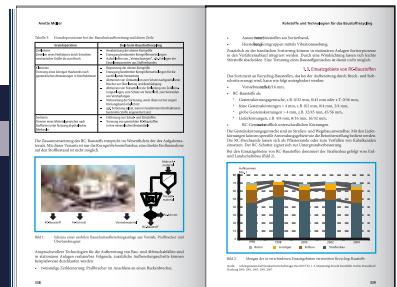
**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2**  
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –  
2015 (ISBN: 978-3-944310-21-3)  
Preis: 50,00 EUR

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [www.vivis.de](http://www.vivis.de)

TK Verlag GmbH

**vivis**

Dorfstraße 51  
D-16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10  
E-Mail: [tkverlag@vivis.de](mailto:tkverlag@vivis.de)





**STEINERT**



MAGNETIC + SENSOR **SORTING SOLUTIONS**



NE-Metalle im Feinkornbereich  
separieren – mit dem neuen  
STEINERT EddyC **FINES**

- Der neue Scheitel ermöglicht  
eine Rückgewinnung aus  
besonders feinen Rückständen
- Bandwechsel  
in 10 Minuten dank neuer  
Rahmenkonstruktion

Infos und Video: [eddycfines.steinert.de](http://eddycfines.steinert.de)

Für den Einsatz des Bauschuttmaterials als Ersatzstoff bei der Porenbetonherstellung wurden im Anschluss zum Siebvorgang verschiedene Mischungen hergestellt, welche in Bild 5 dargestellt sind. Neben den drei Ersatzstoffen, welche zu je 100 % aus Kalksandstein, quarzitischem Beton und kalzitischem Beton bestehen, wurde Kalksandstein zum einen mit dem quarzitischem und zum anderen mit dem kalzitischem Beton jeweils im Verhältnis 75:25, 50:50 und 25:75 vermischt. Daraus entstanden neun unterschiedliche Zusammensetzungen des Ersatzmaterials.

### 3.2. Porenbetonherstellung

In Abhängigkeit der gewünschten Druckfestigkeitsklasse, Soll-Rohdichte und Mischungsgröße wurden entsprechende Mischrezepturen für die Porenbetonproduktion verwendet. Dabei wurde die Druckfestigkeitsklasse P4 und die Rohdichteklasse 0,55 angestrebt. Während bei der Referenzprobe ein Sandanteil von 44 Ma.-% verwendet wurde, wurden bei den Proben mit Ersatzmaterial 30 % des Sandes durch das Ersatzmaterial ersetzt. Zum Mischen der Rohstoffe wurde ein Dissolver der Firma Disperlux verwendet. Nach dem Start des Mischvorgangs wurden das Quarzmehl, der Porenbetonspült und die Ersatzfraktion dem Wasser zugegeben und eine Minute lang vermischt. Im Anschluss wurde Zement, Kalk und Anhydrit dem Gemisch beigemischt und eine weitere Minute verrührt, bevor auch die Alususpension in den Mischer gegeben wurde. Nach Beenden des Mischvorgangs kam das Rohstoffgemisch in eine 25 x 25 x 31 cm<sup>3</sup> große Styroporbox. Die geschäumten Porenbetonmischungen wurden anschließend in einem Autoklaven (Bild 6) bei  $p = 12$  bar und  $T = 190$  °C sechs Stunden lang hydrothermal behandelt und ausgehärtet.



Bild 6:

Am Fraunhofer Institut für Bauphysik verwendeter Autoklav zur Dampfhärtung von Porenbeton

### 3.3. Charakterisierung des Ersatzmaterials

Um die Auswirkungen des Ersatzmaterials auf die Produktion des Porenbetons sowie auf dessen spätere Eigenschaften besser abschätzen zu können, wurde die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Ersatzmaterials untersucht. Zudem wurde die Korngrößenverteilung des Ersatzmaterials bestimmt. Die chemische Analyse des Ersatzmaterials ist in Tabelle 1 in Masseprozent zusammengefasst, wobei die Elemente als Oxide angegeben werden.

Tabelle 1: Mittels RFA gemessene chemische Zusammensetzung des verwendeten Ersatzmaterials in Form von Oxiden

Probe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	sonstiges	Glühverlust
	Ma.-%								
KS 100	73,9	9,4	3,6	1,3	0,1	1,0	0,9	0,3	9,3
BQz 100	57,2	22,4	2,8	1,8	1,6	1,1	0,8	0,4	11,7
BCc 100	15,1	43,7	1,2	1,8	1,2	0,6	0,8	0,5	35,1

Kalksandstein weist mit 74 Ma.-% den höchsten SiO<sub>2</sub>-Gehalt und mit 15 Ma.-% den geringsten CaO-Gehalt auf. Auch beim quarzitischen Beton ist der SiO<sub>2</sub>-Gehalt mit 57 Ma.-% höher als der CaO-Gehalt mit 22 Ma.-%. Der kalzitische Beton besitzt dagegen mit 15 Ma.-% den niedrigsten SiO<sub>2</sub>-Gehalt und mit 44 Ma.-% den höchsten CaO-Gehalt. Beim Glühverlust unterscheidet sich der Anteil von BCc 100 mit 35 Ma.-% deutlich von KS 100 mit 9 Ma.-% und von BQz 100 mit 12 Ma.-%. Der SO<sub>3</sub>-Gehalt ist in allen drei Ersatzstoffen mit Anteilen zwischen 0,1 und 1,6 Ma.-% recht gering, im KS 100 mit 0,1 Ma.-% jedoch am niedrigsten. Die mineralogische Zusammensetzung des Ersatzmaterials ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Quarz ist das Hauptmineral vom Kalksandstein und dem quarzitischen Beton mit 77 und 55 Ma.-%. Im kalzitischen Beton ist mit 37 Ma.-% Calcit das vorherrschende Mineral, welches in KS 100 mit 4,1 Ma.-% und in BQz 100 mit 2,4 Ma.-% nur in geringen Mengen vorhanden ist. Zudem weist BCc 100 mit 41 Ma.-% einen hohen röntgenamorphen Anteil auf. Dieser ist bei BQz 100 mit 24 Ma.-% beinahe um die Hälfte geringer und stellt bei KS 100 mit 2,7 Ma.-% den niedrigsten Anteil dar. Kalksandstein enthält

Tabelle 2: Übersicht der mittels XRD bestimmten mineralogischen Zusammensetzung des Ersatzmaterials

Mineral	KS 100	BQz 100	BCc 100
	Ma.-%		
Dolomit	4,5	3,4	5,4
Calcit	4,1	2,4	36,7
Quarz	76,9	55,2	0,7
Tobermorit	3,3	0	0
Tone und Feldspäte	8,6	0	0
Tricalciumaluminat	0	2,4	2,2
Brownmillerit	0	0,4	0,5
Ettringit	0	3,6	3,8
Portlandit	0	3,5	5,3
Larnit	0	0,5	0,7
Hatrurit	0	5,0	2,5
Gips	0	0,1	0,9
Röntgenamorpher Anteil	2,7	23,5	41,4

zudem in geringen Mengen Tobermorit sowie Tone und Feldspäte wie Illit und Kaolinit. Im quarzitischen als auch im kalzitischen Beton lassen sich außerdem noch in geringen Anteilen Ettringit, Portlandit und Hatrurit sowie weitere geringfügige Nebenphasen finden. Diese unterscheiden sich bei BQz 100 und BCc 100 im Gehalt nur geringfügig.

Bild 7 zeigt die Korngrößenverteilung der kleiner 0,5 mm gesiebten Fraktionen in Vol.-%, welche mittels Laserdiffraktometrie ermittelt wurde. Kalksandstein besitzt einen Peak bei etwa 270 µm, der quarzitischer Beton bei 310 µm und der kalzitische Beton bei 400 µm. Lediglich der kalzitische Beton weist eine leicht bimodale Verteilung auf und besitzt einen weiteren Peak bei 100 µm.

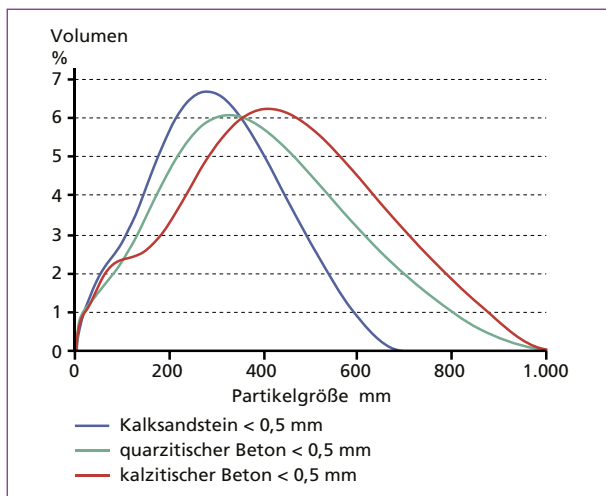


Bild 7:

Korngrößenverteilung des Ersatzmaterials < 0,5 mm nach Siebung

### 3.4. Phasenanalyse

Die gesamte mineralogische Zusammensetzung der hergestellten Porenbetonproben ist in Tabelle 3 dargestellt. Das vorherrschende Mineral in allen Proben ist 11 Å Tobermorit, welches im Folgenden aus Einfachheitsgründen als Tobermorit bezeichnet wird. Es tritt in Mengen von 46 bis 57 Ma.-% auf. An zweiter Stelle folgt mit Anteilen zwischen 11 und 20 Ma.-% das Mineral Quarz. Hydroxyllellstadit und der röntgenamorphe Anteil befinden sich in etwa in den gleichen Bereichen von 4 bis 16 Ma.-%. In etwas geringeren Mengen ist Calcit vorhanden, dessen Anteile sich zwischen 3 und 9 Ma.-% bewegen. Alle anderen Minerale sind in deutlich geringeren Mengenanteilen vertreten. Vaterit und Anhydrit liegen jeweils in Bereichen von 1 bis 5 Ma.-%, Bassanit und Hydrogranat bei maximal 2 Ma.-%.

Tabelle 3: Zusammenfassung der unter Berücksichtigung der amorphen Phasen neu normierten Mineralphasenanteile

Mineral	PB Referenz	PB KS 100	PB BQz 100	PB BCc 100	PB KS-BQz 75-25	PB KS-BQz 50-50	PB KS-BQz 25-75	PB KS-BCc 75-25	PB KS-BCc 50-50	PB KS-BCc 25-75
	Ma.-%									
Tobermorit	56,7	52,0	55,1	47,6	54,7	56,4	53,8	48,7	45,6	48,6
Quarz	20,1	14,4	15,2	11,4	14,8	16,9	15,6	15,9	12,9	16,1
Calcit	2,9	6,1	3,8	9,4	3,9	4,1	3,8	4,3	5,0	6,3
Hydroxyllellstadit	4,5	6,3	10,6	11,1	8,3	7,8	9,5	14,5	15,4	15,5
Anhydrit	3,4	2,8	3,3	2,0	3,0	3,6	3,0	1,4	1,2	0,9
Hydrogranat	0,8	0,8	0,8	1,1	0,8	1,0	1,0	1,2	1,4	1,2
Vaterit	1,8	2,0	2,2	2,9	2,3	4,5	2,8	1,6	2,4	1,6
Bassanit	1,9	1,6	1,1	0,9	1,8	1,9	1,5	1,2	1,0	1,0
Amorpher Anteil	8,0	14,0	7,8	13,6	10,5	3,8	9,0	11,2	15,1	8,8

## Tobermorit

Die Referenzprobe weist den höchsten Tobermoritgehalt mit 56,7 Ma.-% auf. Alle Proben mit BQz-Bestandteilen liegen mit 54 bis 56 Ma.-% knapp unter der Referenzprobe, gefolgt von PB KS 100 mit 52 Ma.-%. Die Proben mit BCc-Bestandteilen erreichen dagegen nur Werte von 46 bis 49 Ma.-%.

## 3.5. Mechanische Eigenschaften

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der gemittelten Ergebnisse der Porenbetonprüfkörper hinsichtlich Trockenrohdichte, Druckfestigkeit und berechneter A-Zahl. Die Referenzproben dienen dem Vergleich der Proben mit Ersatzmaterial mit einem herkömmlichen Porenbetonkörper ohne Ersatzmaterial. Die Trockenrohdichten der Referenzproben liegen mit 551 und 561 kg/m<sup>3</sup> etwas höher als die Trockenrohdichten der Proben mit Ersatzmaterial, welche sich in Bereichen zwischen 513 und 545 kg/m<sup>3</sup> befinden. Die Druckfestigkeiten der Referenzprobe unterscheiden sich auffällig voneinander, dennoch geben sie eine Richtung zur Orientierung der Proben mit Ersatzmaterial an. Betrachtet man zunächst nur die Proben mit den ungemischten Ersatzstoffen, so

Tabelle 4: Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessung, Trockenrohdichte und berechneter A-Zahl

Probe	Trockenrohdichte	Druckfestigkeit	A-Zahl
	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
PB Referenz_1	551	4,8	996 ± 81
PB Referenz_2	561	5,7	1.123 ± 65
PB KS 100_1	545	4,6	974 ± 65
PB KS 100_2	532	4,6	1.009 ± 58
PB BQz 100_1	527	4,4	986 ± 90
PB BQz 100_2	524	4,3	972 ± 80
PB BCc 100_1	525	3,7	846 ± 94
PB BCc 100_2	518	3,8	885 ± 77
PB KS-BQz 75-25_1	536	5,1	1.097 ± 60
PB KS-BQz 75-25_2	539	4,8	1.026 ± 43
PB KS-BQz 50-50_1	538	4,8	1.026 ± 51
PB KS-BQz 50-50_2	538	4,7	1.010 ± 26
PB KS-BQz 25-75_1	533	4,6	1.005 ± 51
PB KS-BQz 25-75_2	532	4,7	1.032 ± 78
PB KS-BCc 75-25_1	518	3,5	822 ± 82
PB KS-BCc 75-25_2	529	3,5	772 ± 114
PB KS-BCc 50-50_1	526	3,8	864 ± 25
PB KS-BCc 50-50_2	524	3,8	855 ± 89
PB KS-BCc 25-75_1	513	3,4	807 ± 154
PB KS-BCc 25-75_2	527	3,5	789 ± 21

ist festzustellen, dass die Proben mit Kalksandstein die höchsten Druckfestigkeiten aufweisen, gefolgt von den Proben mit quarzitischem Beton und zuletzt die mit kalzitischem Beton. Zieht man nun die Proben mit den gemischten Ersatzstoffen hinzu, ist auffällig, dass die Proben mit den KS-BQz-Mischungen erheblich höhere Druckfestigkeiten besitzen als die Proben mit den KS-BCc-Mischungen, welche mit Werten von 3,4 bis 3,8 N/mm<sup>2</sup> insgesamt am schlechtesten abschneiden. Dagegen erreichen die Proben mit den KS-BQz-Mischungen mit Werten von 4,6 bis 5,1 N/mm<sup>2</sup> teils die gleichen Druckfestigkeiten wie PB Referenz\_1. Auch die Proben mit reinem KS befinden sich mit 4,6 N/mm<sup>2</sup> im oberen Bereich.

Auffällig ist die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Trockenrohdichte. So besitzen die Proben mit höheren Trockenrohdichten meist auch die höheren Druckfestigkeiten. Um die Druckfestigkeiten von Proben mit unterschiedlichen Rohdichten miteinander zu vergleichen, wird die dimensionslose A-Zahl der Betrachtung hinzugezogen.

Sie stellt eine rohdichte-unabhängige Festigkeitskenngröße dar. In Bild 8 sind die Porenbetonproben nach aufsteigender A-Zahl sortiert. Dabei wurde aus zwei gleichen Porenbetonkörpern ein Mittelwert gebildet. Abweichungen der Werte von 50 bis teils 100 sind möglich, dennoch geben die A-Zahlen eine grobe Richtung zur Orientierung vor.

Wie Tabelle 4 entnommen werden kann, zeigt sich beim Vergleich mit der A-Zahl in Bild 8 der gleiche Trend. Am schlechtesten schneiden die Proben mit den KS-BCC-Mischungen sowie mit reinem BCC mit Werten zwischen 800 und 860 ab. Etwas höhere Werte von 980 bis 990 besitzen die Proben mit BQz 100 und KS 100. Etwa gleichauf mit der Referenz sind die Proben mit den KS-BQz-Mischungen, welche sich in Bereichen von etwa 1.020 bis 1.060 befinden.

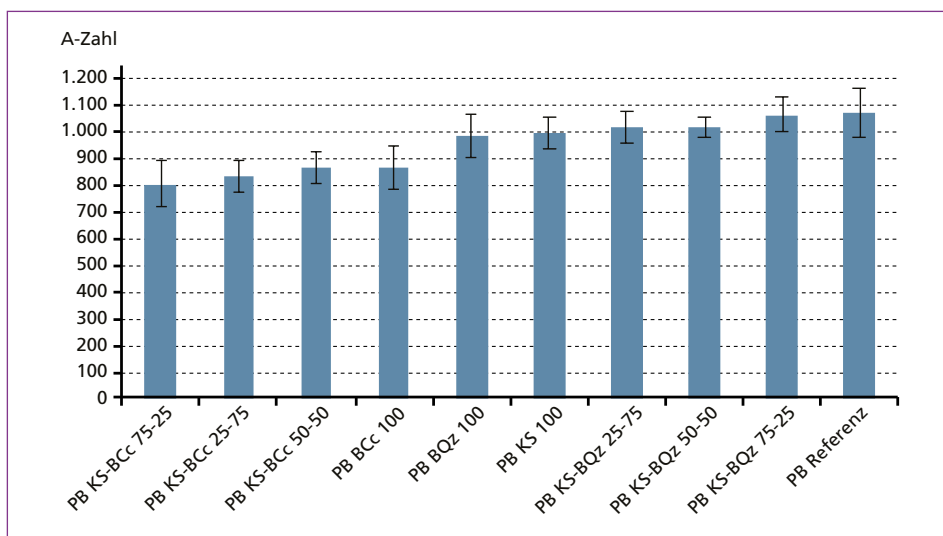


Bild 8: Gemittelte A-Zahlen mit Standardabweichung der Porenbetonkörper

Als Fazit lässt sich feststellen, dass entgegen der Erwartung, dass aufgrund des höchsten Quarzgehaltes reine Kalksandsteinproben als Rohstoff für die Porenbetonherstellung die besten Druckfestigkeitswerte in Porenbetonen erzielen, besonders Mischungen aus 75 Ma.-% Kalksandstein und 25 Ma.-% quarzitischer Altbetons geeignet sind, um Porenbeton aus Recyclingmaterial mit den erforderlichen mechanischen Eigenschaften herzustellen. Vermutlich wirkt sich der im Altbeton enthaltene Zementstein positiv auf die Festigkeitsbildung während des Hydrothermalprozesses aus.

## 4. Herstellung von Geopolymeren

Herkömmliche Baustoffe wie Zement oder Gips sind auf primäre Rohstofflager angewiesen. Für die Herstellung alkalisch aktivierter Bindemittel können hingegen kommunale Restmassen oder industrielle Nebenprodukte wie Aschen, Schlacken sowie Stäube verwendet werden. Somit tragen diese Produkte aktiv zur Schonung natürlicher Ressourcen bei. Die Erhärtung der anorganischen Binder erfolgt durch eine alkalische Aktivierung.

Geopolymere bzw. alkalisch aktivierte Binder weisen besondere Eigenschaften auf, die einen Einsatz der Materialien als Baustoff nahelegen. Im Vergleich zu Beton können zum Teil höhere Festigkeitswerte erreicht werden. Außerdem weisen Geopolymere eine sehr hohe Resistenz gegenüber Säuren auf und besitzen eine sehr hohe Frost-Tau-Stabilität. Damit wären Geopolymere für den Einsatz im Außenbereich (z.B. als Fassadenplatte) oder in chemisch stark beanspruchten Bereichen (z.B. in Abwasserrohren) geeignet. Im australischen Brisbane wurden bereits Landebahnen und Deckenteile von öffentlichen Gebäuden aus Geopolymeren angefertigt.

Im Laufe des Projektes zeigte sich in zahlreichen Mischungsansätzen aus Ziegelmehl, Altbeton, Kalksandstein und einer alkalischen Lösung, dass eine der entscheidenden Stellschrauben für eine chemische und mechanische Stabilität von Geopolymeren deren Stöchiometrie und Anteil an nicht gebundenem Wasser sind. Aus diesem Grund hat sich bei den Geopolymerformulierungen ein hoher Anteil an Altbeton als Zuschlag bewährt. Dieser besitzt die Fähigkeit freies Wasser chemisch zu binden. Somit lässt sich der Nachteil des erhöhten Wasseranspruches, den Altbeton üblicherweise bei der Verwendung im Frischbeton zeigt, bei der Verwendung in Geopolymeren als Vorteil nutzen. Als geeignete Leichtzuschläge für Geopolymere wurden vor allem Blähglas und Altbeton identifiziert (Bild 9).



Bild 9:

Formstabilisierte Geopolymere mit Zuschlägen aus Blähglas (links) und Altbeton (rechts); diese wurden bei Raumtemperatur gehärtet und sind beständig bei einer Unterwasserlagerung und es treten auch keine Ausblühungen auf den Oberflächen auf

Geopolymere eröffnen eine ganze Reihe von potentiellen Anwendungen für die Verwendung von Bauschutt-Feinfraktionen. Im dritten Jahr des Projektes *Baucycle* sollen daher Dauerhaftigkeitstests mit Geopolymeren durchgeführt werden, vor allem die Frost-Tau-Beständigkeit und die Säureresistenz sollen untersucht werden.

## 5. Literatur

- [1] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2012, BBSE-201, Berlin 2015
- [2] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2012, Kreislaufwirtschaft Bau, Berlin 2015

- [3] Dittrich, S.; Thome, V.; Seifert, S.; Höhn, A.-L.: Verwertungspotential von elektrodynamisch aufbereitetem Altbeton. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 631-638
- [4] Linß, E.; Ludwig, H.-M.; Landmann, M.; Karrasch, A.; Kaiser, F.: Sensor-based sorting of mineral construction and demolition wastes by near-infrared, in OCM 2015 – Optical Characterization of Materials-conference proceedings, 2015, S. 179
- [5] Wolfram, D.; Thome V.; Heisig, A.; Heinz, D.: Eignung der Feinfraktion aus Bauschuttrecycling als Produktionsrohstoff für Porenbeton. Masterarbeit TU München / Fraunhofer IBP, 2017

## Ansprechpartner



### **Dr. rer. nat. Volker Thome**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Mineralische Werkstoffe und Baustoffrecycling  
Abteilungsleiter  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley (D)  
Telefon: 0049-(0)8024-643623  
E-Mail: volker.thome@ibp.fraunhofer.de

## Weitere Institutionen

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP,  
Bauchemie, Baubiologie, Hygiene,  
Betontechnologie und funktionale Baustoffe

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML,  
Umwelt und Ressourcenlogistik

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB Sichtprüfsysteme

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
Nachhaltigkeits- und Ressourcenmanagement



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,  
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5**  
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,  
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,  
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.