

# Leichtbeton im Hochbau

## Woher kommen wir und wo geht die Reise hin?

### Leichtbeton – 19. September 2019, Heilbronn

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel,  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

## Einleitung

Leichtbetone sind keine Erfindung der Neuzeit. Sie sind waren im Grunde genommen sogar die ersten Betone. So ist das bautechnische Spiel mit dem Eigengewicht des Baustoffs Beton fast 2000 Jahre alt. Eines der bekanntesten antiken Leichtbetonbauwerke ist das Pantheon in Rom (ca. 128 n. Chr.) (Bild 1). Der Bau des halbkugelförmigen Kuppelraums mit einem inneren Durchmesser von mehr als 43 Metern markiert einen Höhepunkt in der Entwicklung von Architektur und Konstruktion (Bild 2). Das Pantheon ist ein echtes Ingenieurbauwerk, das in allen konstruktiven und baustofflichen Details mit großer Kreativität und Erfahrung geplant und ausgeführt wurde. Die Kuppel besteht aus einem Leichtbeton, dessen Zusammensetzung offensichtlich mit dem Ziel komponiert wurde, das Eigengewicht zu beschränken. Es waren die damals bereits weit entwickelten Kenntnisse im Umgang mit dem Baustoff opus caementitium [1], welche die Planer zu diesem einzigartigen Projekt ermutigt und seine Durchführung letztlich ermöglicht haben.



Bild 1: Innenansicht der Pantheon in Rom

Die Möglichkeiten des Leichtbetons wurde ab Mitte des letzten Jahrhunderts wieder verstärkt aufgegriffen. Exemplarisch zeigt das von Frank Lloyd Wright entworfene Solomon R. Guggenheim Museum die Möglichkeiten einer Leichtbetonkonstruktion (Bild 3). Die neuzeitliche Anwendung der Leichtbetone im Hochbau wurde vor allem in den 1970er Jahren mit der Absicht entwickelt, durch Nutzung der bauphysikalischen Vorteile dieses Baustoffs eine technisch einfache, einschalige Wandbauweise für den Wohnungs- und den Wirtschaftshochbau zu gewinnen. Die Motivation dieser frühen Phase des Bauens mit Leichtbetonen war überwiegend bautechnischer Natur, eine bewusste Adaption des Leichtbetons durch die Architektur blieb weitgehend auf Einzelfällen beschränkt.

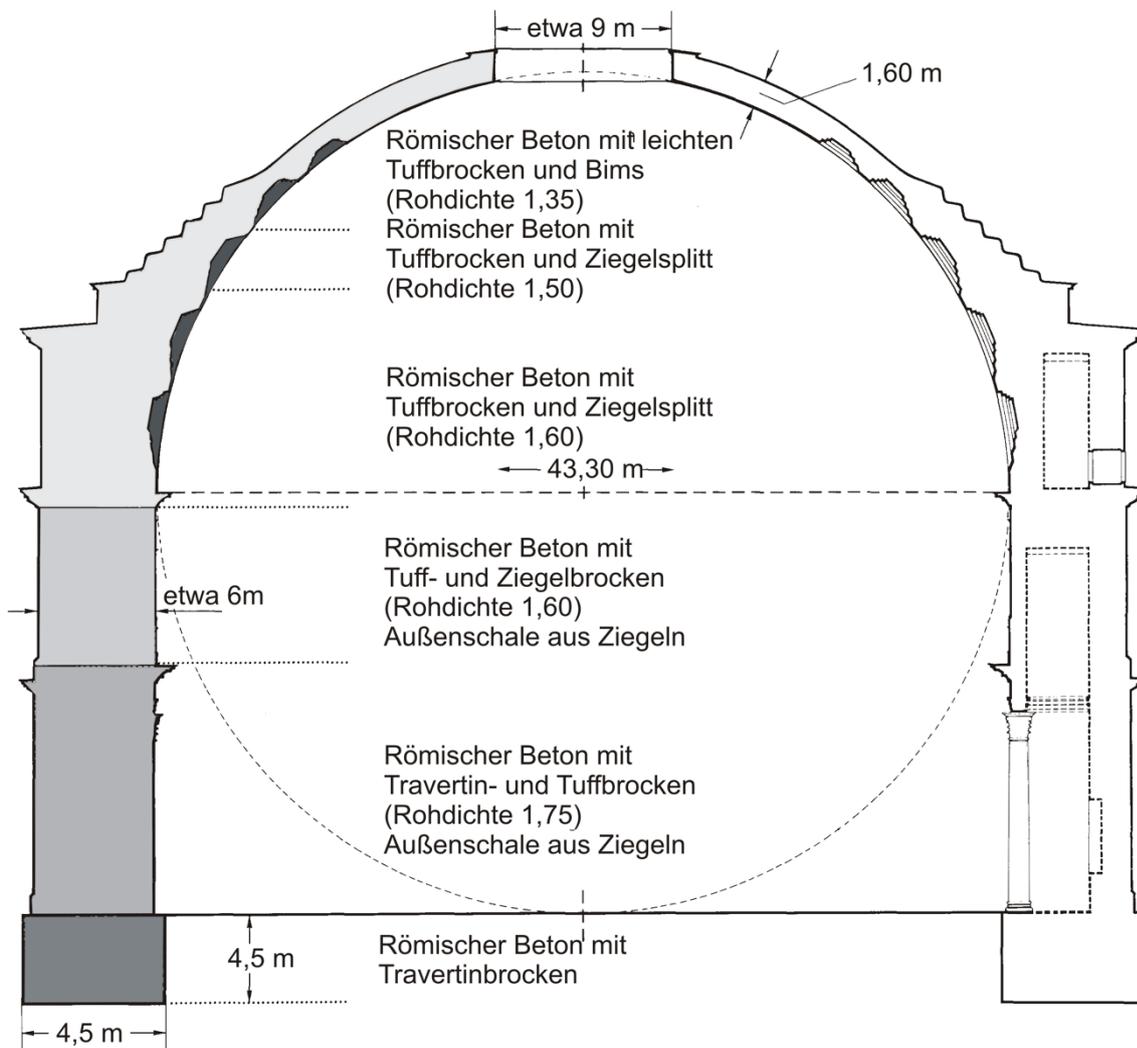


Bild 2: Schnitt durch das Kuppeltragwerk des Pantheons in Rom [1]

Aufgrund der Verschärfung der gesetzlichen Regelungen zur energetischen Leistungsfähigkeit von Hochbauten in der Folge der Energiekrise der 1970er Jahre konnten die Anforderungen mit den üblichen Wandstärken nicht mehr erfüllt werden. Als Folge war Leichtbeton fortan nur unter sonderplanerischen Voraussetzungen für den Einsatz in einschaligen Wänden sinnvoll. Die Popularität und der Einsatz von Leichtbetonen gingen stark zurück.

Seit den 1990er Jahren wurde nicht nur das Bauen mit Beton mit einer Vielzahl nationaler und europäischer Normen und Regelwerke technisch revidiert, auch die Technologie des Baustoffs wurde erheblich fortentwickelt. Naturgemäß fanden die Hauptentwicklungen in Bauweisen statt, die stark am Markt vertreten waren, denn eine erfolgreiche technische Entwicklung benötigt den Versuch und reift in der praktischen Anwendung. Über diesen Prozess des bewussten und differenzierten Umgangs mit den technischen Eigenschaften und Steuerungsmöglichkeiten von Technik und Technologie des Betonbaus wurde auch der Einsatz leichter Betone neu betrachtet oder realisiert, obwohl die Anzahl der ausgeführten Beispiele weiterhin vergleichsweise gering blieb. Das Ziel der Entwicklung war vor allem eine weitere Herabsetzung der Trockenrohddichten unter Beibehaltung einer möglichst hohen und damit ausreichenden Festigkeit [2].

Durch den Einsatz traditioneller Leichtbetone konnten die Rohddichten gegenüber einem Normalbeton (ca.  $2350 \text{ kg/m}^3$ ) bei den im Hochbau üblichen Festigkeitsvorgaben auf Werte von

etwa  $1600 \text{ kg/m}^3$  abgesenkt werden. Mit der aktuellen Technologie können – bei einem hochbautauglichen Festigkeitsniveau - Rohdichten bis hinunter zu  $800 \text{ kg/m}^3$  realisiert werden. Gleichzeitig wurde der Nachweis verbesserter Wärmedämmeigenschaften des Leichtbetons über bauaufsichtliche Zulassungen verifiziert [2].

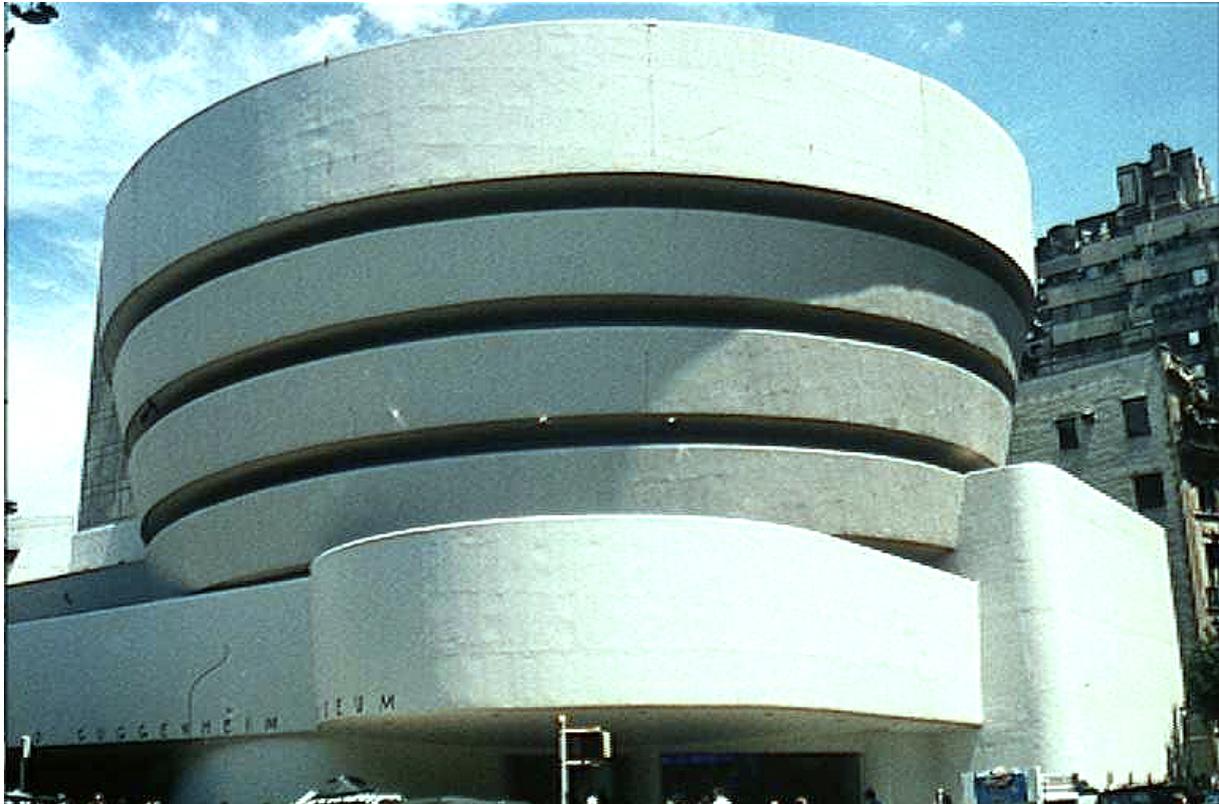


Bild 3: Guggenheim Museum of Modern Art, New York

Solche Leichtbetone inspirieren vor allem Architekten, da sie die Planung und Ausführung einschichtiger, monolithischer Wandkonstruktionen machbar erscheinen ließen, wenn die Eigenschaften des Baustoffs entsprechend qualifiziert gesteuert werden konnte. Bei diesen Anwendungen wurde jedoch deutlich, dass die mit der monolithischen Ausführung einhergehenden Sichtbetonflächen dem herrschenden Gestaltungstrend möglichst glatter, makelloser Ansichtsflächen nicht entsprechen konnten, sondern typische Abweichungen zeigte, wie etwa einen erhöhte Porigkeit. Diese scheinbare Manko hat sich inzwischen in ein Markenzeichen verkehrt und wird zum Teil gezielt eingefordert [3].

## Einordnung und Regelwerke

Die Bezeichnung Leichtbeton umfasst primär zementgebundene, betonartige Systeme, die nach aktueller Normungslage eine Rohdichte von maximal  $2000 \text{ kg/m}^3$  haben. Diese weit gefasste Definition deckt auch den römischen Beton ab, dessen Bindemittel aus hydraulischem Kalk besteht [1]. Die untere Grenze für so genannte gefügedichte, also stahlbetontaugliche Konstruktionsleichtbetone, die normativ in DIN 1045-2 [4], DIN EN 1992 [5] sowie DIN EN 206-1 [6] erfasst und geregelt werden, liegt bei  $800 \text{ kg/m}^3$ . Daneben gibt es die sogenannten haufwerksporigen Leichtbetone nach DIN EN 1520 [7]. Diese Norm gilt für „Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung“ [7] und kommt daher zunächst einmal nicht als Ortbeton infrage. Zudem lässt der Titel nicht erwarten, dass die Oberflächeneigenschaften den Wünschen der potenziellen Bauherrschaft entsprechen kann. Im Vergleich zum gefügedichten Leichtbeton ist die untere Grenze der Trockenrohichte bei diesen haufwerksporigen Leichtbetonen  $400 \text{ kg/m}^3$ .

## Betonzusammensetzung

Rein äußerlich unterscheiden sich viele konstruktive Leichtbetone nicht von Normalbeton, da für das Herstellen konstruktiver Leichtbetone im Wesentlichen nur ein Austausch der normalen Gesteinskörnung (z. B. quarzitischer Kies) gegen leichte Gesteinskörnung, wie etwa Blähschiefer oder Blähton erfolgt. In den wärmetechnisch nicht so relevanten Fällen bis hinunter in die Rohdichteklasse D1,4 (blaue Symbole in Bild 4) beschränkt sich dieser Austausch zunächst nur auf die grobe Körnung. Für die Sandfraktion wird weiterhin Natursand eingesetzt. Derartige Leichtbetone werden vornehmlich für Ingenieurbauwerke wie Brücken, für Deckenkonstruktionen, Innenwände im Wohnungsbau und zum Beispiel für größere Fertigteilaragen eingesetzt. In diesen Einsatzbereichen steht die Gewichtsersparnis im Vordergrund. Diese Leichtbetone werden im Hochbau in der Regel nur für Decken verwendet.

Durch den Einsatz von Leichtsand kann die Betonrohddichte bei gleicher Festigkeit nochmals um etwa  $200 \text{ kg/m}^3$  reduziert werden (leere orange Symbole in Bild 4). Abgesehen von der weiteren Reduktion der Betonrohddichte dieser reinen Leichtbetone ist der Leichtsand essentiell für die Verbesserung der wärmetechnischen Eigenschaften und eröffnet so ein zusätzliches Anwendungsgebiet, da die leichte Gesteinskörnung ein schlechterer Wärmeleiter als normale Gesteinskörnung ist. Unter Ausnutzung der heute zur Verfügung stehenden betontechnologischen Möglichkeiten (moderne Fließmittel und Betonzusatzstoffe sowie bei sehr leichten Leichtbetonen auch Blähglas (orange Quadrate in Bild 4)) können diese reinen Leichtbetone nochmals optimiert werden. Die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der drei Leichtbetone in Punkto Festigkeit werden aus Bild 4 klar ersichtlich. Die dargestellten Werte bilden in etwa die Grenze der technischen Möglichkeiten ab.

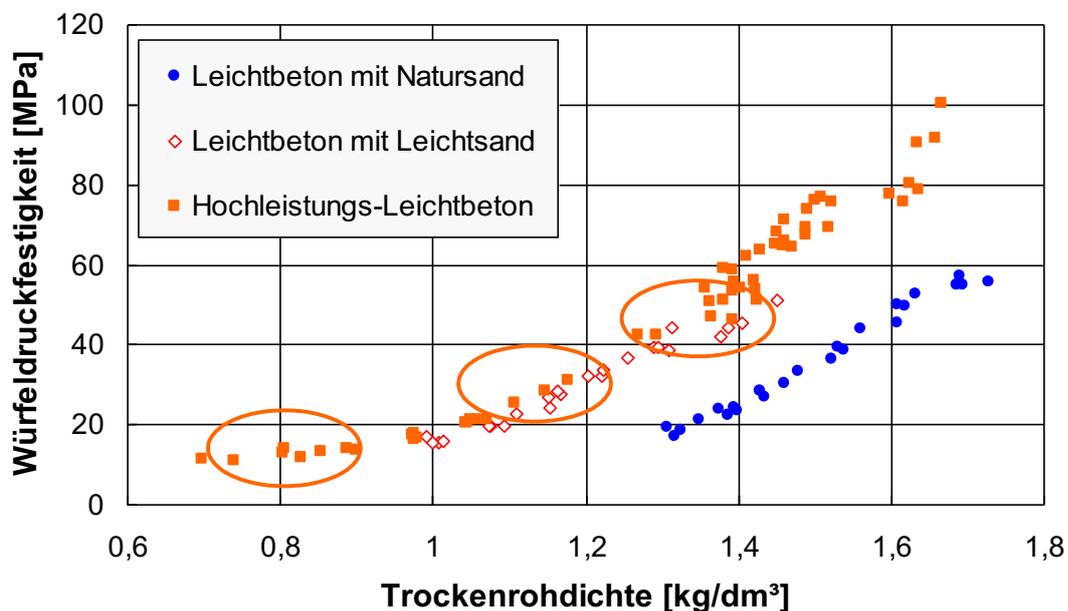


Bild 4 Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Betonrohddichte an unterschiedlich zusammengesetzten Leichtbetonen [8]

Für gefügedichte Leichtbetone ergeben sich aus der Kombination der statisch geforderten Festigkeit und der bauphysikalisch benötigten Wärmeleitfähigkeit drei Einsatz- und Synergiebereiche im Außenwandbereich.

- Statisch höher beanspruchte Fassaden von Bürogebäuden mit vielen Öffnungen werden bevorzugt im Rohdichtebereich  $1,3$  bis  $1,6 \text{ kg/m}^3$  ausgeführt (rechte Markierung in Bild 4).

- Statisch weniger beanspruchte Fassaden, die entweder dickere Wände, weniger Geschosse oder weniger Öffnungen haben, liegen eher im Rohdichtebereich von 1,0 bis 1,3 kg/m<sup>3</sup> (mittlere Markierung in Bild 4).
- Die beste Wärmedämmung sehr leichter Leichtbetone wird zunehmend für exklusive Wohngebäude gewählt. Die Wände dieser Gebäude werden in Rohdichten von 1,0 bis unter 0,80 kg/m<sup>3</sup> ausgeführt (linke Markierung in Bild 4) und verlassen damit unterhalb einer Trockenrohddichte von 0,80 kg/m<sup>3</sup> den derzeit in Deutschland für konstruktiven Leichtbeton zulässigen Bereich. Bei den bauphysikalisch notwendigen Wandstärken reicht die erreichbare Festigkeit in der Regel aus, um die statische Tragfähigkeit üblicher Hochbauten ohne Probleme zu gewährleisten. Allerdings wird hier in einigen Objekten selbst die Festigkeitsklasse LC 8/9 unterschritten. Dies erfordert besondere Überlegungen zum Bemessungskonzept und bedingt damit quasi automatisch eine gesonderte Genehmigung in Form einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) [3].

Eine möglichst weitgehende Reduzierung der Betonrohddichte verringert zwar die erreichbare Festigkeit, doch gleichzeitig nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit ab. Bild 5 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Betonrohddichte und der erreichbaren Wärmeleitfähigkeit. Die Darstellung veranschaulicht gut den Vorteil der niedrigeren Rohdichtewerte für die wärmetechnische Bemessung. Für die Wahl des Leichtbetons sind beide Aspekte – Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit - wichtig. Der Zusammenhang ist vereinfachend über die Betonrohddichte gegeben.

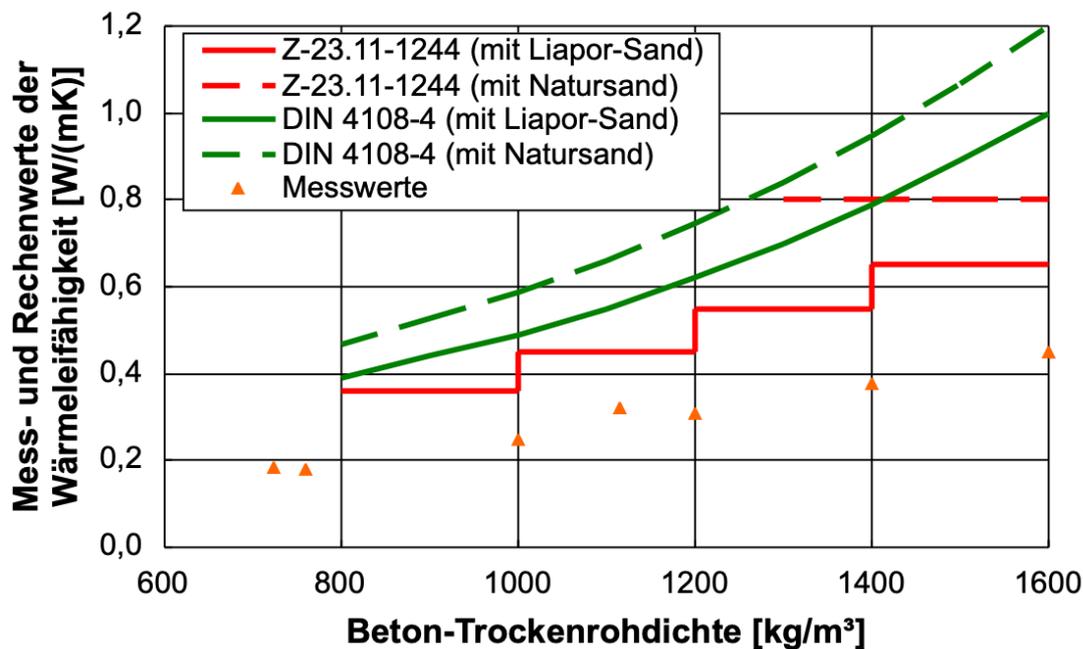


Bild 5: Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit von gefügedichtem Leichtbeton nach DIN 4108-4 bzw. allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung [9] und Messwerte ausgeführter Bauwerke [3]

Der nächste Entwicklungsschritt bei den monolithischen Leichtbetonaußenwänden, die auch den verschärften Anforderungen der kommenden EnEV genügen, erfordert es, die Betonrohddichte und damit die Festigkeit noch weiter abzusenken und damit den normativen Bereich der gefügedichteten Leichtbetone signifikant zu unterschreiten. Derartige Leichtbetone werden als „Infraleichtbetone“ tituiert [10, 11]. Ein genauer Blick auf die Betonrezepturen zeigt Poren-

gehalte vom mehr als 10 Vol.-%. Demnach gelten die Infraleichtbetone nicht mehr als gefügedicht [12], sondern sind streng genommen bereits haufwerksporige Betone. Bemessungstechnisch ergibt sich bei Infraleichtbetonen das Problem, dass die Bemessungsregeln für gefügedichten Leichtbeton in unbekanntes Terrain extrapoliert werden müssen. Dies erfordert einen erheblichem Aufwand [13] und erschwert die bauaufsichtliche Umsetzung erheblich.

Die bereits angesprochenen haufwerksporigen Leichtbetone eröffnen eine alternative Möglichkeit, monolithische Bauwerke mit geringeren Betonrohddichten auszuführen. Zwar verringert sich nochmals die erzielbare Festigkeit (Bild 6), doch ist dies nur auf den ersten Blick ein vermeintlicher Nachteil. Gerade die innovativen Wohngebäude, die mit monolithischen Außenwänden aus Infraleichtbeton ausgeführt werden sollen, haben in der Regel Außenwandstärken von 50 cm und schöpfen selbst die geringeren Druckfestigkeiten nicht aus. Genau genommen ist Infraleichtbeton aufgrund seiner hohen Porosität ohnehin ein haufwerksporger Leichtbeton, ein LAC (Lightweight Aggregate Concrete). Wenn für Infraleichtbeton DIN EN 1520 zugrunde gelegt wird, stehen dem Einsatz als Ortbeton keine bemessungstechnischen Probleme im Wege. Es gilt nur noch, Annahmeregeln für den Übergang des Infraleichtbetons als Ortbeton vom Lieferanten zum Abnehmer auf der Baustelle zu definieren. Dieser Ansatz ist nun erstmalig im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall für Außenwände aus „hochwärmedämmendem, haufwerksporigem Infraleichtbeton LAC4“ [14] mit Unterstützung des Instituts für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München umgesetzt worden. Dieser Infraleichtbeton LAC4 hat das Erscheinungsbild eines gefügedichten Betons und erreicht mit einer Trockenrohddichte von  $570 \text{ kg/m}^3$  eine Zylinderdruckfestigkeit von über 6 MPa und eine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{23/80}$  von  $0,143 \text{ W/(mK)}$ . Mit diesem Ansatz eröffnen sich neue Möglichkeiten. Weitere Anbieter werden in absehbarer Zeit nachziehen.

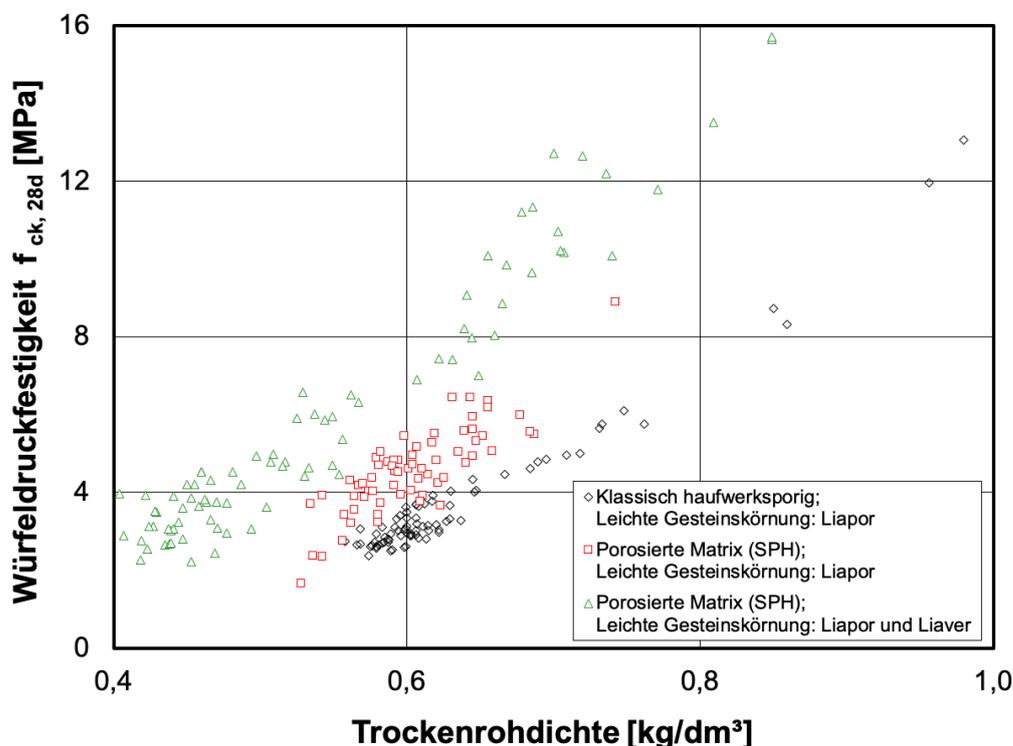


Bild 6: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Betonrohddichte an unterschiedlich zusammengesetzten Leichtbetonen [15]

## Zusammenfassung

Gerade in letzter Zeit erfahren die hochwärmedämmenden Leichtbetone einen wahren Entwicklungsschub. Um den zunehmend schärferen energetischen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Betonrohddichten immer weiter abgesenkt werden. Dies führte zur Entwicklung der Infraleichtbetone. Den neuste Entwicklungsschritt stellt der hochwärmedämmende, haufwerksporige Infraleichtbeton dar, der trotz seines Namen wie ein gefügedichter Beton wirkt.

## Literatur

- [1] Lamprecht, H.-O., *Opus caementitium: Bautechnik der Römer*. 5 ed. 1996, Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH. 264 p.
- [2] Thienel, K.-C.; Peck, M., *Die Renaissance leichter Betone in der Architektur*. DETAIL, 2007(5): pp. 522 – 534.
- [3] Callsen, B.; Thienel, K.-C., *Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte*. Beton, 2017. 67(4): pp. 128-134.
- [4] DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1)*. 2008, p. 62.
- [5] DIN EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2011.
- [6] DIN EN 206-1. *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. 2001.
- [7] DIN EN 1520. *Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung (Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural and non-structural reinforcement)*. 2011, p. 119.
- [8] Thienel, K.-C., *СТРОИТЕЛЬСТВО ИЗ ЛЕГКОГО БЕТОНА: ОТ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДО РЕАЛИЗАЦИИ В СООРУЖЕНИЯХ (Bauen mit Leichtbeton - Von den Eigenschaften zur Umsetzung)*. бетон и железобетон (Beton und Stahlbeton), 2012. 2(7): pp. 110-115.
- [9] Thienel, K.-C., *Welche Vorteile kann der Einsatz von Leichtbeton bieten?*, in *betonbau.aktuell*. 2005: Apolda. p. 7.
- [10] Schlaich, M.; Zareef, M.E., *Infraleichtbeton*. Beton- und Stahlbetonbau, 2008. 103(3): pp. 175-182.
- [11] Lösch, C.; Hückler, A. and Schlaich, M., *Infraleichtbeton*. Bauphysik, 2019. 41(1): pp. 1-6.
- [12] Deutsches Institut für Bautechnik, *Herstellung und Verwendung von Schaumbeton*. DIBt Mitteilungen, 2002. 33(6): pp. 185.
- [13] Hückler, A.; Schlaich, M., *Zur Biegung von Infraleichtbetonbauteilen – Werkstoff-, Verbund-, Trag- und Verformungsverhalten*. Beton- und Stahlbetonbau, 2017. 112(5): pp. 282-292.
- [14] Holcim, *Außenwände aus hochwärmedämmendem, haufwerksporigem Infraleichtbeton LAC4 - Zustimmung im Einzelfall*, in 29-4112.55-4-107, Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und V., Editor. 2019: München. p. 8.
- [15] Thienel, K.-C., *Precast elements of lightweight concrete with a porous matrix*. BFT International, 2000. 66(1): pp. 62-72.