

# Zerstörungsfreie Materialkennwertbestimmung mittels Ultraschall an historischem Bunker- Betonen

Andreas HASENSTAB<sup>1</sup>, D. BÖTTCHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingenieurbüro Dr. Hasenstab GmbH, Augsburg, Deutschland,

<sup>2</sup>Universität Augsburg, Deutschland

**Kurzfassung:** Im Zuge der Wohnraumverdichtung bzw. Umnutzung von Gebäuden ist es oft erforderlich, die vorhandenen Konstruktionen weiter zu nutzen. Vor allem wenn der Rückbau der Konstruktion einen sehr großen Aufwand darstellt, kann die weitere Verwendung der Betonkonstruktion wirtschaftlich sein.

Die Untersuchung der Betonkonstruktion kann zerstörend mittels Bohrkernentnahme erfolgen. Zerstörungsfrei sind Untersuchungen mittels Rückprallhammer und Ultraschallmessung möglich.

Mit den Ergebnissen der Ultraschallmessung kann die Betonqualität in einem gewissen Rahmen charakterisiert werden. Um Ergebnisse der Messungen mit Ultraschall mittels Longitudinal- und Transversalwellen einschätzen zu können, sind Vergleichsmessungen an historischem Beton im Labor erforderlich. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Beitrag vorgestellt.

Bei der Auswertung „historischer Betonkonstruktionen“, vor allem von Wehrbauten, wird die Fragestellung nach einem Zusammenhang zwischen den Baustellenbedingungen (z.B. Einsatz von Zwangsarbeitern) und der Betonqualität deutlich. Eine Forschungsarbeit an der Universität Augsburg wird zu dieser Fragestellung durchgeführt.

Hierbei wird die Rolle der Arbeiter, deren Status als Freiwillige beziehungsweise als Zwangsarbeiter am Beispiel des Bunkerbaus, der damit verbundenen Qualität der Bauwerke und somit der Eignung der Arbeiter näher beleuchtet. Es werden zeitgenössische Bauverordnungen und politische Willenserklärungen der NS-Führung in die Betrachtung mit einbezogen, um ein differenziertes Bild des Bunkerbaus während des Zweiten Weltkrieges zu erhalten.

Um diese Untersuchungen von der rein visuellen Ebene zur baustoffkundlichen Ebene zu verbessern und um Vergleichsdaten für Messungen für statische Berechnungen an Bestandsbauten zu erhalten, werden die genannten zerstörungsfreien Untersuchungen mittels Ultraschall an Beton durchgeführt. Zudem soll gezeigt werden, wie es mittels zerstörungsfreier Untersuchung möglich ist, die Aussagen der Historiker über die Konstruktion mit zusätzlichen Erkenntnissen zu unterstützen.

## 1. Fragestellung Zwangsarbeit und Bauwesen

Zahlreiche Bauvorhaben in der Zeit des Dritten Reiches wurden mit Hilfe von Zwangsarbeitern durchgeführt. Projekte konnten so kostengünstig, mit erheblichem Arbeitskräfteaufwand in kurzer Zeit verwirklicht werden. Die Arbeitsbedingungen für



Zwangsarbeiter waren hierbei denkbar schlecht. Internierung in Arbeitslager, mangelhafte Versorgung mit Nahrungsmittel und harte Arbeit waren an der Tagesordnung.

Doch diese erzwungene Arbeitskraft muss nicht nur aufgrund moralische Maßstäbe, sondern auch aus ökonomischen und qualitativen Gründen kritisch hinterfragt werden. Einerseits stellte der Einsatz von Zwangsarbeitern in verschiedenen Bereichen eine erhebliche Wettbewerbsverzerrung dar. Unternehmen, welche Zwangsarbeiter einsetzten, waren aufgrund der geringeren Lohnkosten wettbewerbsfähiger als Unternehmen mit regulären Beschäftigten. Auch die Unterbringung, Versorgung und Bewachung der Zwangsarbeiter entwickelte sich zu einer wichtigen Aufgabe für staatliche Stellen mit erheblichem bürokratischen Aufwand.

Doch nicht nur aus einer Marktperspektive heraus sind Zwangsarbeiter kritisch zu hinterfragen. Ebenfalls als problematisch wurde die Qualität der Arbeit von Zwangsarbeitern angesehen. Mit Sabotageakte musste zwangsläufig gerechnet werden. Doch nicht nur Sabotage, sondern im Allgemeinen mangelhafte Arbeit wurde Zwangsarbeitern angelastet. Dies resultierte aus dem massenhaften Einsatz unqualifizierter Arbeiter für bestimmte Projekte. Das Bauwesen im Dritten Reich kann hierbei als Beispiel dienen. Der Einsatz von ungelerten Arbeitern und Zwangsarbeitern stellte für die Bauindustrie zwar massenhaft kostengünstige Arbeiter zur Verfügung, konnte jedoch die Qualität der Arbeit entscheidend mindern. Negativ auf die Qualität der Bauten wirkte sich außerdem der, im Vergleich zu den zeitgenössischen Möglichkeiten, relativ geringe technische Einsatz aus, welcher durch die Verfügbarkeit von massenhaften Arbeitskräften kompensiert wurde. Zeitgenossen erkannten einen Zusammenhang zwischen Zwangsarbeitern und mangelnder Qualität, weswegen für bestimmte, wichtige Projekte bewusst auf Zwangsarbeiter verzichtet wurde.

Das Beispiel Augsburg dient zur modellhaften Untersuchung dieses Zusammenhanges zwischen Zwangsarbeit und der Qualität im Bauwesen. Exemplarisch hierfür sollen Bunkeranlagen auf deren Betonqualität und der damit verbunden intendierten Eignung untersucht werden.

## **2. Auffinden von Bunker bei Baumaßnahmen des Projektes Augsburg City**

Im Rahmen des Projektes Augsburg City, finden seit 2007 umfangreiche Umbaumaßnahmen in der Augsburg Innenstadt statt, um den öffentlichen Personennahverkehr moderner und attraktiver zu gestalten. Hierfür wurden zentrale Verkehrsachsen neu konzeptioniert und erneuert. Unter Anderem sieht das Projekt eine Untertunnelung des Bahnhofes vor, um modernen Ansprüchen zu genügen und um das älteste sich in Betrieb befindliche Bahnhofsgebäude einer Großstadt zu erhalten.

Im Zuge dieser Arbeiten wurde im Jahr 2015 eine unbekannte Bunkeranlage auf dem Bahngelände entdeckt.



Abbildung 1: links: Ansicht des Bunkers bei der unerwarteten Entdeckung einer Betonkonstruktion; rechts: Innenansicht nach Öffnung (Fotos Stadt Augsburg)



Abbildung 2: Rückbau des Bunkers, welcher sich als sehr widerstandsfähig erweist (Fotos Stadt Augsburg)



Abbildung 3: links: Zustand des Bunkers beim Eintreffen der Historiker; rechts: unterschiedliche Betonstrukturen zu erkennen

Diese Bunkeranlage wurde für den Augsburger zivilen Luftschutz während des Zweiten Weltkrieges erbaut. Der Einsatz von Zwangsarbeitern liegt aufgrund der geographischen Nähe verschiedener Zwangsarbeiterlager nahe. Der Abriss dieses Bunkers, im Rahmen der Arbeiten zur Augsburger Mobilitätsdrehscheibe, bietet eine einmalige Möglichkeit Betonproben des historischen Bunkers zu nehmen und diese auf deren Qualität mittels Ultraschall zu untersuchen, um einen Zusammenhang zwischen Betonqualität und den eingesetzten Ressourcen zu ermitteln. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse können als Modelluntersuchung für andere historische Bauwerke dienen, um zerstörungsfrei

Betonqualität zu bestimmen und somit Bauwerke als Quelle für die historische Forschung nutzbar zu machen.

Davon ausgehend werden Fragen nach sozialer Ordnung und der Problematik zwischen Schutz vor Luftangriffen und der Sicherheit der Bevölkerung anhand zeitgenössischer Bauverordnungen analysiert werden. Diese Analyse kann durch zerstörungsfreie Qualitätsbestimmung erweitert werden, um die praktische Eignung ziviler Luftschutzanlagen kritisch hinterfragt werden.

### 3. Untersuchungen an Bunkerbetonen

#### 3.1. Probekörper

Die Probekörper stammen aus der Bunkeranlage auf dem Gelände des Hauptbahnhofes Augsburg, dem Stollen Burghausen 1922 sowie aus einem Teil des tschechoslowakischen Schutzwalls.



Abbildung 4: Probekörper

#### 3.2. Bestimmung der Dichte

Dichte Messmethode:

Die Dichte der Probekörper wurde durch die Formel  $\rho = \frac{m}{V}$  bestimmt. Die Masse  $m$  wurde hierbei durch Wiegen ermittelt. Zur Bestimmung des Volumens  $v$  der Probekörper, wurden diese, zum Schutz vor Feuchtigkeit, in eine Plastiktüte gelegt, die Luft innerhalb der Tüte entfernt und die Tüte mit dem Probekörper in einen mit Wasser gefüllten Eimer getaucht. Der dadurch gestiegene Wasserstand wurde markiert und der Probekörper wieder entfernt. Durch Auffüllen der Differenz der beiden Pegel mit Wasser, konnte das Volumen der Probekörper ermittelt werden.



Abbildung 5: Waage, Probekörper und Eimer zur Bestimmung der Wasserverdrängung

### Liste der Probekörper:

Tabelle 1: Liste der Probekörper

Bezeichnung	Beschreibung /Herkunft	Materialbeschreibung/ Zuschlagdurchmesser	Gewicht [g]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
1	Bunker Augsburg HBF	Außenstück mit Anstrich, feinporig, gleichmäßige Steinverteilung, keine großen Kiesnester erkennbar Steindurchmesser max. 5mm (rund/oval)	465	300	1,55
2	Bunker Augsburg HBF	Innenstück, viel Kies, Kiesnest, viele große Steine (rund/oval), Steindurchmesser bis 30mm	1805	911	1,98
3	Bunker Augsburg HBF	Außenstück, kleine Steine, weiter innen größere Steine erkennbar, kleines Kiesnest, Steindurchmesser 2mm-30mm (rund/oval)	742	410	1,81
4	Bunker Augsburg HBF	Außenstück, mittelgroße Steine bis an den Rand, grobporiger, 5mm-25mm (rund/oval)	342	250	1,37
5	Bunker Augsburg HBF	Innenstück, blau, mittelgroße-große Steine, keine Kiesnester erkennbar, 10mm-30mm(rund/oval)	1922	902	2,13
6	Bunker Tschechoslowakischer Wall	Kantenstück, gelblich, porös, kleine Steine, bis 5mm Steine, ein großer Stein erkennbar (ca20mm)(rund/oval)	1044	639	1,63
7	Bunker Tschechoslowakischer Wall	Außenstück, ca. 10mm außen sehr feinporig, kleine Steine, witer innen große Steine bis zu 35mm(rund/oval)	658	445	1,48
8	Zementprisma mit Normsand	Quader, Zement sehr feinporig, lilaverfärbt => Carbonatisierung	192	105	1,83
9	Bunker Augsburg HBF	Innenstück mit Bewehrung (12cm), stellenweise viel Kies, mittel-große Steine, 10mm-30mm (rund/oval)	4291	2010	2,13
10	Bunker Augsburg HBF	Außenstück, mittel-große Steine, 10-30mm (rund/oval), Anzeichen für Bewehrung 2cm von Außenkante	5600	2920	1,92
11	Bunker Augsburg HBF	Außenstück, ca. 2cm außen feinporig, innen großes Kiesnest, Steine bis zu 45mm (rund/oval)	5600	2325	2,41

12	Bunker Augsburg HBF	Außenstück, Kiesnester deutlich erkennbar, mittel-große Steiner, 10mm-35mm (rund/oval)	5800	2923	1,98
13	Bunker Augsburg HBF	Außenstück mit Anstrich, kleine-große Steine verteilt, rund/oval, Kiesnester, 4mm-30mm	12200	5000	2,44
14	Bunker Augsburg HBF	Außenstück flach, klein-mittelgroße Stein, rund/oval, 5mm-20mm, innen Überreste von Bewehrung,	1870	980	1,91
15	Betonprobe 2015	Bohrkern, 11,5cm Durchmesser, feinporig, innen Bewehrungstück ca. 4cm sichtbar, kleine - mittelgroße Steine rund/oval (vereinzelt eckig) 3mm-15mm	1608	815	1,97
16	Beton ca. 1970	Bohrkern, 5cm Durchmesser, feinporig, wenige Steine erkennbar, eher eckig, mittelgroß 8mm-15mm, Bewehrung erkennbar 2,5cm von Außenkannte erkennbar	907	426	2,13
17	Ortbeton, ca. 1960	Bohrkern, 6,5cm Durchmesser, feinporig, Mittelgroße Steine 10mm-15mm rund/oval, gleichmäßig verteilt, mit abgesprungenen Teilen, teilweise Risse erkennbar	464	275	1,69
18	Ortbeton, ca. 1960	Bohrkern, 6,5cm Durchmesser, feinporig, rund/ovale Steine gleichmäßig verteilt, 10mm-20mm	427	258	1,66
19	Betonprobe 2015	Bohrkern, 9cm Durchmesser, feinporig, mittelgroße eckige Steine 10mm-20mm, Bewehrung erkennbar, Mittig mit nicht durchgehendem Loch, Einhöhung auf der Seite	2826	1305	2,17
20	Bahnanlage Augsburg	Handgeformter Ziegelsetein, ca. 22x22x8cm,	5800	3540	1,64

Erläuterung zu Probekörpern vom Tschechoslowakischer Schutzwall:

Betonproben aus den Bunkeranlagen des Tschechoslowakischen Schutzwalls wurden ebenfalls als Vergleichsproben herangezogen. Der Schutzwall wurde zwischen 1933 und 1938 entlang der deutschen, österreichischen, polnischen und ungarischen Grenze errichtete um die Tschechoslowakei vor gewaltsamen Angriffen zu Schützen. Als Vorbild wurde die französische Maginot- Linie angesehen. Dieser Schutzwall konnte jedoch bis zur Besetzung der Tschechoslowakei im Jahr 1939 durch die deutsche Wehrmacht nicht fertiggestellt werden und verfehlt somit seinen Nutzen.

### 3.3. Messverfahren Ultraschall

Prinzipiell muss bei der Untersuchung mit dem akustischen Verfahren Ultraschall zwischen Durchschallung/Transmission und Echomethode unterschieden werden. Für die Ultraschallprüfung werden Prüfköpfe verwendet, die eine Anregung der Materie mit Longitudinal- oder Transversalwellen ermöglicht. Bei Longitudinalwellen (Dichte-, Druck-, Längs- oder Kompressionswelle) schwingen die Teilchen längs (lat. longitudinal) zur Schallausbreitungsrichtung. Eine Ausbreitung der Longitudinalwelle ist grundsätzlich in allen Medien (Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen) möglich. Dagegen ist die Anwendung der für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen verwendeten Transversalwellen (auch: Schub-, Scher- oder Querwellen) auf Festkörper beschränkt, da die Teilchen hier quer (lat. transversal) zur Ausbreitungsrichtung schwingen und die Übertragung der Wellen über Schub oder Scherung erfolgt.

Bei der Ultraschall-Durchschallungstechnik und der Durchstrahlungstechnik ist eine beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils erforderlich. Für Untersuchungen mit der

Ultraschall-Echotechnik muss dagegen nur eine Bauteilseite zugänglich sein. Vom Prinzip beruht Ultraschallecho auf der Reflexion der ausgesendeten Schallwellen an Grenzflächen wie z. B. der Bauteilrückwand. Aus den empfangenen Signalen kann indirekt eine Aussage über den Bauteilzustand oder innere Schäden getroffen werden. Zudem kann aus bekannter Bauteilabmessung und gemessener Laufzeit die Geschwindigkeit einer Schallwelle bestimmt werden, mit welcher wiederum nach erfolgreicher Kalibrierung der Laufzeitmessungen die Bauteildicke als Ergebnis ausgegeben wird. Dies ermöglicht die Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Dicke eines Bauteils, welches von nur einer Seite aus zugänglich ist.

Im Allgemeinen wird bei Ultraschallmessungen die Schalllaufzeit zwischen Sender und Empfänger gemessen. Die Impuls-Laufzeit ist von den Probekörpereigenschaften (Feuchte, Dichte, Porosität, innerer Aufbau) und dem Erhaltungszustand (Fehlstellen, Risse, organische Schäden) abhängig.

Weiterführende Literatur kann [WAL2012, HAS2005] entnommen werden.

Bei den folgenden Versuchen wurde die Ultraschall-Durchschallungstechnik angewendet, da die Probekörper zu geringe Abmessungen aufwiesen und der Schallweg so genauer bestimmt werden konnte.

Um die gemessenen Schallgeschwindigkeiten besser einschätzen zu können wurden Literaturwerte zu Ultraschallmessungen an "etwas älteren" Betonen ausgewertet.

Tabelle 2: Literaturwerte von Schallgeschwindigkeiten für Ultraschall

Bauwerk	Baujahr	Ultraschallgeschwindigkeiten
Fuldatalbrücke mit einzelligem Hohlkastenquerschnitt wurde [HOL2006]	1966	2500-2700m/s
Bodenplatte von Hubschrauberlandeplatz [STR2008]	1961	2750m/s

### 3.4. Ergebnisse der Ultraschallmessungen

Die Messungen wurden mit Transversalwellenprüfköpfen ( $f=55\text{kHz}$ ) und Longitudinalwellenprüfköpfen ( $f=100\text{kHz}$ ) durchgeführt.

#### Ergebnisse Longitudinalwellen:

Die Messungen mit Longitudinalwellen ergaben, dass es bei den unebenen Probekörpern nicht möglich war, reproduzierbare Werte zu erzielen. Deshalb wurden die Untersuchungen mit Longitudinalwellen nicht weiter vertieft.

#### Ergebnisse Transversalwellen

Die Wiederholungsmessungen mit Transversalwellen ergaben eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen wurden mit den Dichten der zugehörigen Probekörper in Verhältnis gesetzt und im folgenden Diagramm aufgetragen:

## Betonprobekörper

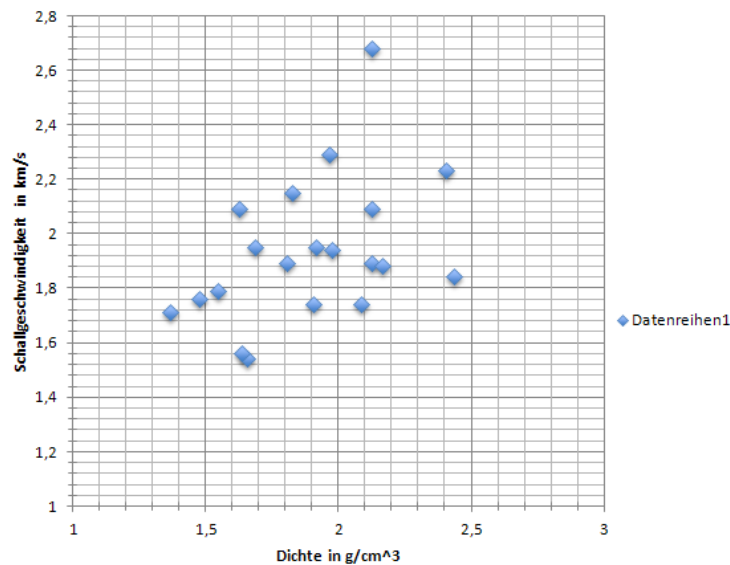


Diagramm 1: Ergebnisse der Untersuchung der Schallgeschwindigkeiten bezogen auf die Rohdichten der untersuchten Betone unterschiedlichem Alter und Zusammensetzung

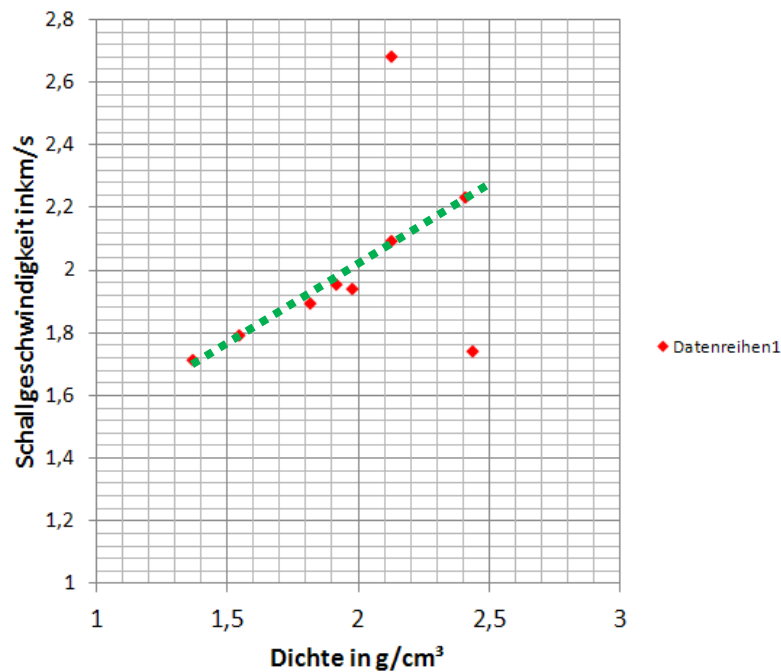


Diagramm 2: Ergebnisse der Untersuchungen der Schallgeschwindigkeiten bezogen auf die Rohdichten vom Bunkerbeton

### 4. Zusammenfassung:

Die Auswertung der Ultraschallgeschwindigkeiten und Rohdichten der Probekörper ergab, dass die Ergebnisse unterschiedlicher Probekörper – Bunkerbeton und Bohrkerne – nicht direkt verglichen werden können und sich teils erheblich unterscheiden.

Weiter ergaben die Auswertung der Proben vom Bunker in Augsburg, dass, die Probekörperdichten zusammen mit der jeweiligen Schallgeschwindigkeiten im Diagramm aufgetragen, einen sehr guten Zusammenhang ergeben.



Allgemein waren die Dichten und Schallgeschwindigkeiten der alten Betone geringer als die Dichten und Schallgeschwindigkeiten der "jüngeren" Betone aus den 60er Jahren und des Jahres 2015.

Mit der Möglichkeit, mittels zerstörungsfreier Untersuchungen eine gewisse Aussage über die Betonstruktur im Inneren des Betons des Bunker treffen zu können ist es für den Historikermöglich, die Struktur des Betons bei der Beschreibung und Einschätzung des Bauwerks zu berücksichtigen. So können die Betonuntersuchungen für den Historiker zusätzliche Informationen über das Bauwerk und die Entstehungsbedingungen liefern.

Durch diese Fächerübergreifende Untersuchung können zusätzliche Erkenntnisse bei der Bewertung historischer Konstruktionen erlangt werden.

## **Literatur**

- [WAL2012] Walter, A. und A. Hasenstab: Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau in: Fouad N. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2012, Berlin: Ernst und Sohn (2012)
- [HAS2005] Hasenstab, A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschall-echoverfahren. Dissertation an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI, Prof. Dr. Hillemeier (TU Berlin), Prof. Scheer (TU Berlin), Dr. Krause (BAM)
- [HOL2006] Holst R., Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Streicher D., Gardei A., Kohl C., Wöstmann J., Wiggenhauser H., Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke; Bericht zum Forschungsprojekt 03243 des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen: Bergisch Gladbach, Dezember 2006
- [STR2008] Straußberger D., Hartmann I., Hasenstab A.: Straßenuntersuchungen mit Radar, Ultraschallecho und FWD, (Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008, Poster 13 2006, Berlin)