

Dickenmessung mit dem Impakt-Echo-Verfahren – meist zügig, manchmal überraschend

Martin SCHICKERT¹

¹ Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA)
an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar

Kontakt E-Mail: martin.schickert@mfpa.de

Kurzfassung. Die Dicke von Betonbauteilen kann mit dem Impakt-Echo-Verfahren zerstörungsfrei ermittelt werden. Einsatzmöglichkeiten sind beispielsweise die Qualitätskontrolle oder Schadensanalyse. Aufgrund seines Messprinzips ist das Verfahren gut geeignet, um Dicken großflächig auf einem grobmaschigen Messraster oder an einzelnen Messpositionen zu messen. Indirekt lassen sich so auch größere Hohlstellen lokalisieren.

Im Beitrag werden praktische Erfahrungen mit dem Impakt-Echo-Verfahren anhand dreier Messbeispiele vorgestellt und aus messtechnischer Sicht diskutiert. Es zeigt sich, dass das Verfahren im Allgemeinen zügig einzusetzen und auszuwerten ist, beim Auftreten von Besonderheiten z. B. durch rückseitig angrenzende Schichten aber eine sorgfältige Interpretation der Messsignale notwendig wird.

1. Einführung

Bei der Qualitätskontrolle oder Schadensanalyse von Betonbauwerken besteht oft die Notwendigkeit, die Dicke eines Betonbauteils bei einseitigem Zugang großflächig zu ermitteln. Für derartige Messungen bietet sich das Impakt-Echo-Verfahren an, das aufgrund seines Messprinzips in der Lage ist, die Dicke eines ausgedehnten Bauteils aus einzelnen Messungen bestimmen, ohne dass an jeder Position mehrere nebeneinander liegende Einzelmessungen aufgenommen werden müssten [1]. Für derartige Messaufgaben wird die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens daher auch in Richtlinien geregelt ([2], [3]). Das Messprinzip basiert auf der Dickenresonanz einer Plattenwelle mit relativ großer Wellenlänge, weshalb die Bewehrung nur einen geringen Einfluss auf das Messergebnis hat ([1], [4]). Dicken auf einem grobmaschigen Messraster oder an einzelnen Messpositionen können so zügig gemessen werden, und auch größere Hohlstellen lassen sich indirekt lokalisieren.

Dieser Beitrag stellt praktische Erfahrungen mit dem Impakt-Echo-Verfahren anhand dreier Messbeispiele aus messtechnischer Sicht vor. In einer Giebelwand, die als Elementwand ausgeführt ist, wurden auf einem Messraster großflächige Hohlstellen lokalisiert. Bei zwei Messeinsätzen an großen Behälterkuppeln traten Besonderheiten auf, die durch die rückseitige Ausführung der Kuppelschale entstanden sind und eine sorgfältige Interpretation der Messsignale erforderten.

2. Messbeispiele

2.1 Prüfsystem

Für die nachfolgenden Messungen wurde das Impakt-Echo-Mess-System DOCTer 1000 der Fa. Germann Instruments A/S in Verbindung mit dem Programm Viking 5.1 bzw. dem Programm *ImpEcho* der MFPA Weimar eingesetzt. Als Impaktor diente ein Kugel-Impaktor mit 10 mm Durchmesser bzw. bei Messungen mit Reflexionen im Nahbereich ein Impaktor mit 8 mm Durchmesser. Bei jeder Einzelmessung wurden 2048 Datenpunkte mit einem Zeitintervall von 4 μ s aufgenommen, woraus eine Frequenzauflösung von 0,122 kHz und, bei einer Schallgeschwindigkeit von 4000 m/s und einer Dicke von 200 mm, eine Dickenauflösung von 1,2 mm folgen. Bei einer Dicke von 120 mm beträgt die Dickenauflösung 0,8 mm.

2.2 Lokalisierung von Hohlstellen in einer Giebelwand

Beim Neubau eines Hauses wurde die Giebelwand des daneben liegenden Bestands-Wohn- und Geschäftshauses von Betonanhaftungen gereinigt. Dabei stellte sich heraus, dass sie teilweise hohl war. Die Giebelwand sollte deshalb in ihrem unteren, ungedämmten Bereich auf Hohlstellen untersucht werden. Der Wandabschnitt von ca. 16 m Breite und ca. 5 m Höhe lag ursprünglich unterhalb des Erdniveaus und wurde durch die daneben liegende Baugrube freigelegt. Nach den vorliegenden Plänen ist die Wand dreischalig aufgebaut mit vorgefertigten Beton-Fertigteilplatten als Außenschalen und einem Kern aus Ortbeton (Elementwand). Die Wanddicke beträgt insgesamt 20 cm; das auf der Wandinnenseite angrenzende Material ist unbekannt und kann mit der Messposition variieren. Die Oberfläche der Wand ist von schalglatt bis rau sehr unterschiedlich ausgeprägt.

Nach Absprache mit dem Auftraggeber sollte die Giebelwand zerstörungsfrei auf einem Messraster von 0,5 m x 0,5 m auf Hohlstellen untersucht werden, um die Hohlstellen anschließend nachverpressen zu können.



Bild 1. Messung Giebelwand: Ausschnitt des Messbereichs mit Gerüst und Messraster

Für die Messung wurde ein Gerüst gestellt und das Messraster mit Hilfe von selbstnivellierenden Kreuzlinienlasern aufgebracht (Bild 1). Da die Wanddicke zwar bekannt war, nicht jedoch, ob sich auf der Rückseite fest anhaftende Putze oder andere Materialien befinden, wurde auf eine Kalibrierung verzichtet. Stattdessen wurde mit einer geschätzten Schallgeschwindigkeit von $c = 4000$ m/s gearbeitet. Wären Zweifelsfälle aufgetreten, hätte die

Schallgeschwindigkeit an einer zerstörend bestimmten Dicke rekali­briert werden müssen. An einem Loch der Außenschale wurde die Dicke der vorderen Außenschale zu 6 cm und die der Innenschale zu 8 cm bestimmt, so dass die Dicke der hinteren Außenschale ebenfalls 6 cm misst.

Die Messungen konnten – abhängig von der Oberflächenqualität – meist zügig aufgenommen werden. Sie wurden durch Klassifizierung der gemessenen Dicken in Dicken­klassen und durch Bewertung des Zeitsignals ausgewertet. Dicken im Bereich der Nenndicke wurden als „verfüllt“, geringere Dicken als „Reflexion aus dem Ortbeton“ klassifiziert. Scheinbar größere Dicken wurden bei einem schnellen Ausklingen des Zeitsignals als „Verdacht auf Hohlstelle“ eingeordnet, in der Annahme, dass der Schall die Rückwand nur auf Umwegen um unverfüllte Bereiche herum erreicht hat. Eine scheinbar große Dicke mit einem lang ausklingenden Zeitsignal deutet auf einen frei schwingenden Bereich der vorderen Schale (Biegeschwingung, [1]) und damit auf eine „Hohlstelle“ hin; zwischen flächigen Ablösungen und Hohlstellen kann dabei allerdings nicht unterschieden werden. Alle weiteren Messergebnisse wurden als „Unklar“ bezeichnet.

Bild 2 zeigt die Messergebnisse zum Wandausschnitt aus Bild 1. Der Befund ist recht klar. Danach konzentrieren sich die Hohlstellen auf den unteren Wandbereich und werden teilweise von Bereichen mit Verdacht auf Hohlstelle und von unklaren Messergebnissen begrenzt. Vor allem im linken unteren Bereich besteht der Verdacht auf weitere Hohlstellen. Offensichtlich war der Ortbeton nicht überall bis zum Boden der Schalung gelangt.

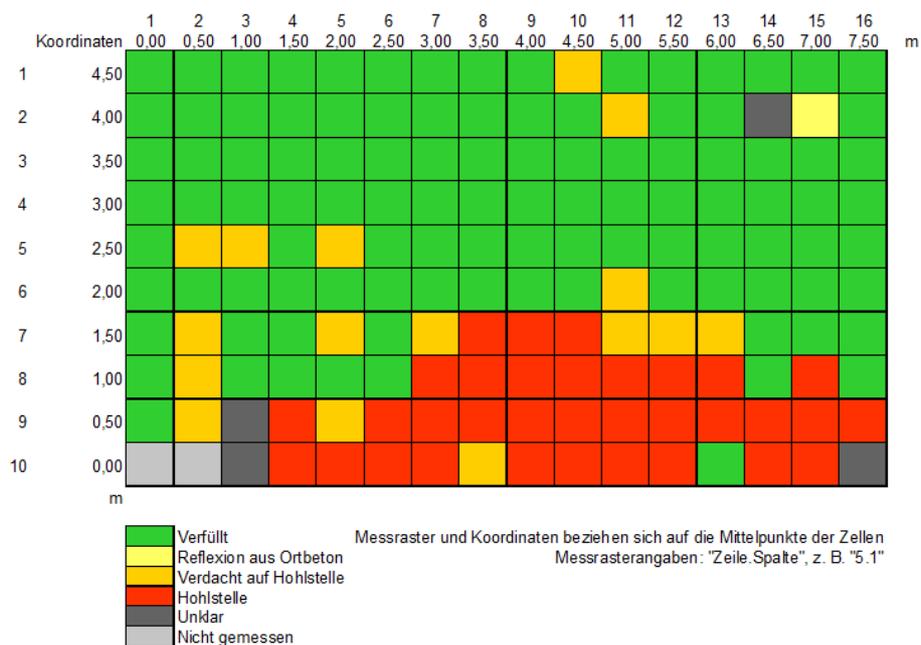


Bild 2. Messung Giebelwand: Ergebnisbild zum Wandbereich aus Bild 1

Die Hohlstellen wurden anschließend nachverpresst, wobei das Volumen des Verpressguts in etwa dem aufgrund des Messergebnisses Erwarteten entsprach. Lediglich in einem Bereich erstreckte sich ein Hohlraum offensichtlich noch weiter nach unten bis unter die Fundamentplatte.

2.3 Dickenmessung einer Betonkuppel 1

In einem Prüfauftrag sollte die Betondicke der Kuppel eines Trinkwasserspeichers vor der Instandsetzung gemessen werden. Der Durchmesser der Kuppel aus Stahlbeton betrug 33 m

bei einer Höhe über dem Behälterboden von 6 m am Rand und 11 m in der Mitte. Der Kuppelbeton hatte eine Sollstärke von 120 mm. Aus einer früheren Entnahme von zwei Bohrkernen war bekannt, dass Minderdicken zu erwarten waren.

Die Messungen sollten auf vom Auftraggeber nach statischen Gesichtspunkten vorgegebenen Messpositionen mit 88 Hauptmesspunkten zerstörungsfrei mit dem Impakt-Echo-Verfahren vorgenommen werden. Die Messungen wurden von einem Gerüst aus aufgenommen, das je nach Messposition aufgestockt oder in der Höhe reduziert wurde (Bild 3). Die Messpositionen wurden zunächst auf den Boden gezeichnet und dann auf die Kuppelinnen-seite projiziert.



Bild 3. Messung Kuppel 1: Messsituation mit Gerüst

Gleich zu Beginn der Messungen wurde deutlich, dass die Signale an den meisten Messpunkten schwach oder unklar waren. Die Messungen mussten deshalb teilweise sehr oft wiederholt werden, um auswertbare Spektren zu erhalten. Bei Wiederholungen an derselben Messposition waren die Messergebnisse im Allgemeinen reproduzierbar. Die Betonoberfläche, die ständig einer feuchtegesättigten Umgebung ausgesetzt war, machte einen weichen Eindruck. Um die Oberflächenqualität als Quelle der schwierigen Signalaufnahme auszuschließen, wurde die Oberflächen an einigen Messpunkten gebürstet bzw. ca. 0,5 mm tief mit einer Schleifscheibe angeschliffen. Dies brachte keine Verbesserung der Signalqualität.

Trotz mehrfacher Wiederholung der Messung waren an manchen Messpositionen keine auswertbaren Signale zu erhalten. Bild 4 zeigt als Beispiel ein schwaches, schnell abklingendes Zeitsignal mit einem unklaren Spektrum. In einigen Fällen konnte ein auswertbares Spektrum durch zeitliche Begrenzung des Zeitsignals auf seinen ersten Zeitabschnitt (*Clipping*) erreicht werden, wodurch das Nutzsignal gegenüber zeitlich späteren Störungen verstärkt wurde (Bild 5).

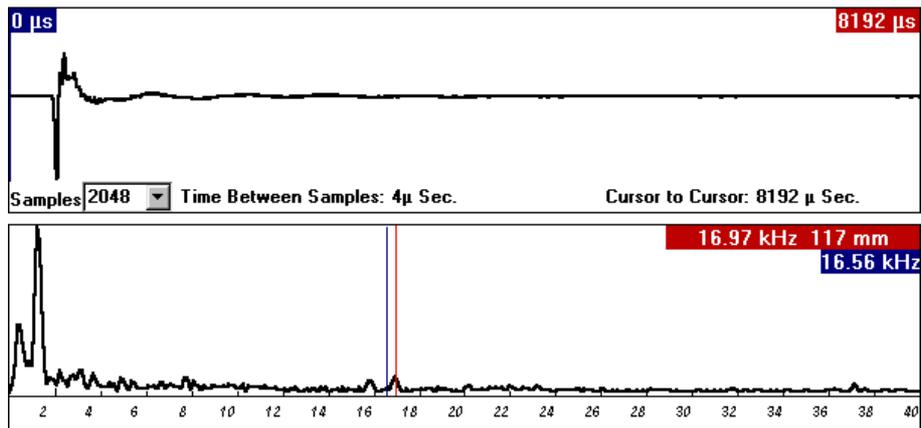


Bild 4. Messung Kuppel 1: Beispiel für ein schwaches, nicht auswertbares Messsignal

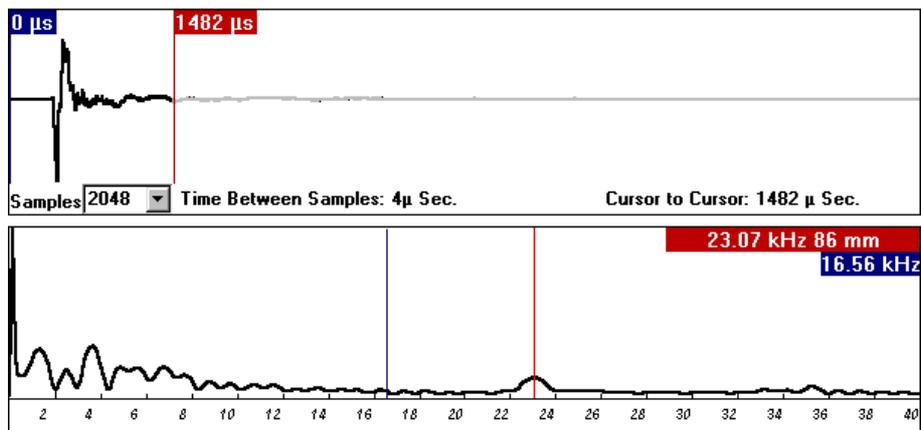


Bild 5. Messung Kuppel 1: Beispiel für Verbesserung eines Messsignals durch *Clipping* im Zeitbereich

Zur Kalibrierung vor Ort wurde die Betondicke in einer Bohrung neben einer Messung mit gut auswertbarem Spektrum gemessen. Nach dem Einbringen von weiteren Bohrungen und der Entnahme von Bohrkernen wurden die Messungen nachträglich auf eine Schallgeschwindigkeit von $c = 3974$ m/s rekaliert.

Eine Erklärung für die zahlreichen schwachen Signale war die rückseitige Abdichtung der Kuppel mit einer Bitumschicht (Bild 6). Bei dem vorliegenden guten Kontakt der Bitumschicht mit dem Kuppelbeton wurde die stehende Welle der Dickenresonanz dadurch offensichtlich stark gedämpft.



Bild 6. Messung Kuppel 1: Bohrkern mit rückseitiger Bitumschicht (Fotos: M. Krüger, MFPA Weimar)

Beim Auftreten von Minderdicken kleiner 100 mm wurde deren Fläche auf einem Messraster von 0,5 m x 0,5 m abgegrenzt. In Bild 7 ist als Beispiel das Raster N8 dargestellt. Trotz einiger unsicherer Messergebnisse (Dickenwerte in Klammern) und unklarer Messungen ohne Ergebnis („--“) lässt sich die Ausdehnung der Minderdicke aus der Darstellung

abschätzen. Ausgewählte Messpunkte mit gemessenen Dicken kleiner 100 mm wurden zerstörend durch Bohrkernentnahme überprüft.

		Breite / m					
		-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50
Höhe / m	4,00	124	(113)	101	97	(99)	107
	3,50	124	115	97	103	97	--
	3,00	113	92	(84)	--	102	101
	2,50	116	(95)	--	96	99	--
	2,00	118	103	(84)	111	(113)	109
	1,50	(109)	(102)	--	107	121	--
	1,00	111	93	--	99	98	--
	0,50	109	92	--	100	93	--
	0,00	109	97	86	97	109	--
	-0,50	110	106	92	111	113	--
	-1,00	(106)	--	115	121	112	--

Bild 7. Messung Kuppel 1: Messergebnisse von Raster N8 (Dicken in mm)

Die gemessenen Dicken wurden tabellarisch dargestellt und farbkodiert in die Karte der Messpositionen eingetragen, wobei jeder 10 mm breiten Dickenklasse eine Farbe zugeordnet wurde. Unsichere Messergebnisse wurden besonders gekennzeichnet, und bei unklaren Messergebnissen wurde keine Dicke angegeben. Letztlich waren 76 % der Messungen an den Hauptmesspunkten verwendbar, 10 % unsicher und 14 % unklar.

Das Histogramm der gemessenen Dicken an den Hauptmesspunkten in Bild 8 zeigt, dass die Solldicke von 120 mm an den meisten Messpositionen (85 % aller Hauptmesspunkte) unterschritten wird. Der Median der gemessenen Dicken liegt mit 110 mm um 10 mm unter der Solldicke, die geringste an einem Hauptmesspunkt gemessenen Dicke beträgt 82 mm.

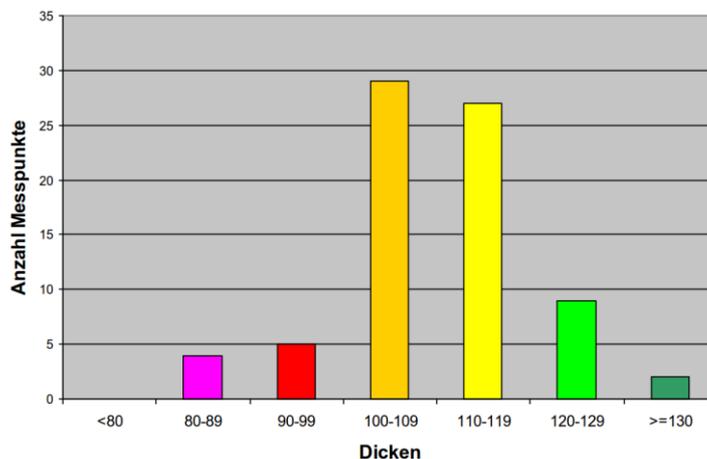


Bild 8. Messung Kuppel 1: Histogramm der gemessenen Dicken

2.4 Dickenmessung einer Betonkuppel 2

In einem weiteren Prüfauftrag sollte die Betondicke eines ähnlichen Wasserbehälters vor der Instandsetzung gemessen werden. Die Solldicke war wieder 120 mm. Auch hier traten häufig schwache, schnell abklingende Zeitsignale auf. Wie Bohrkern zeigten, war die Rückseite mit einer haftenden Bitumenschicht unterschiedlicher Dicke bedeckt.

Ein weiteres Problem ergab ich bei der Kalibrierung der Schallgeschwindigkeit vor Ort. Messungen neben einer Bohrung, die eine Betondicke von 125 mm ergab, führten zu einem deutlichen Frequenzpeak bei 10,01 kHz (Bild 9). Aus beiden Werten errechnet sich

allerdings eine Schallgeschwindigkeit von nur 2503 m/s. Falls dies zuträfe, würde es auf einen sehr schlechten Beton hinweisen.

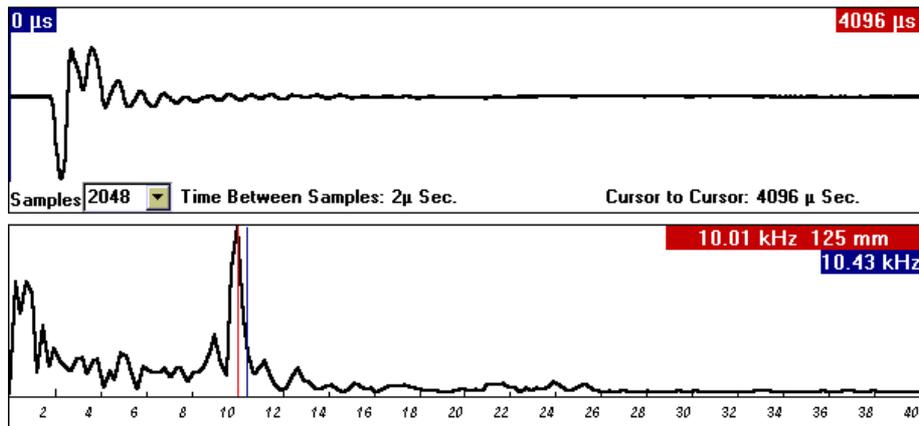


Bild 9. Messung Kuppel 2: Messsignal der Kalibrierung an einer inkorrekt angenommenen Betondicke

Da der Beton einen festen Eindruck machte, wurde die Kalibrierung an einer anderen Messposition wiederholt, bei der die Bohrung eine Dicke von 105 mm ergab. Die Messungen dort zeigten zusätzliche schwache Peaks, aus denen sich eine glaubwürdigere Schallgeschwindigkeit berechnet. Insbesondere führten zwei Messungen zu Peaks bei $f = 21,85$ kHz (Bild 10) entsprechend $c = 4589$ m/s und bei $f = 22,10$ kHz entsprechend $c = 4641$ m/s. Der Mittelwert beider Schallgeschwindigkeiten ist 4615 m/s, als Kalibrierwert wurde schließlich $c = 4600$ m/s verwendet.

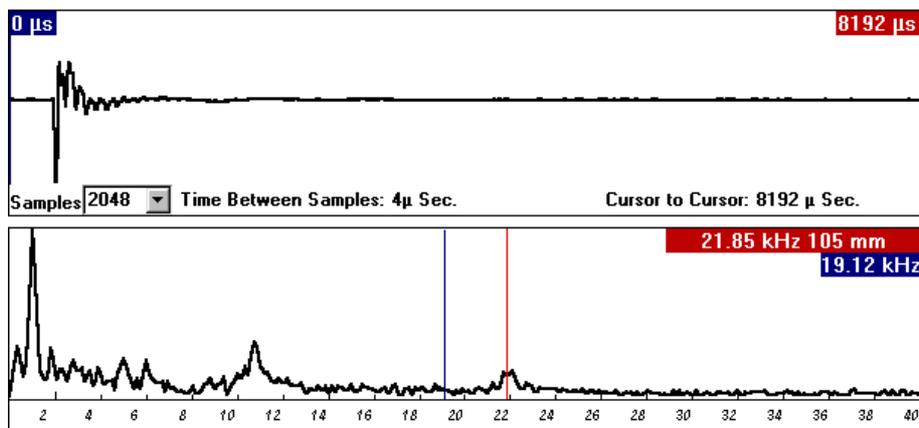


Bild 10. Messung Kuppel 2: Messsignal einer korrekten Kalibrierung

Die zusätzlichen Resonanzen, die einer Betondicke von ca. 180 bis 220 mm entsprechen, waren in den meisten Spektren präsent. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber kann es sich hierbei um eine zusätzliche Betonschicht handeln, die nachträglich von außen aufgebracht wurde und anscheinend an vielen Stellen einen Schalldurchgang erlaubt.

Insgesamt wurden vor Ort drei Kalibriermessungen neben Bohrungen mit dem Impakt-Echo-Verfahren durchgeführt, die eine mittlere Schallgeschwindigkeit von $c = 4555$ m/s ergaben. Drei weitere Ultraschall-Transmissionsmessungen im Labor an geschliffenen Bohrkernen (die Schallgeschwindigkeit der Dehnwellen entspricht ungefähr der resonanten Plattenwelle S1 [1]) hatten einen Mittelwert von $c = 4641$ m/s. Der Mittelwert aller sechs Kalibriermessungen betrug $c = 4598$ m/s, so dass die Messungen mit dem Kalibrierwert vor Ort von $c = 4600$ m/s ausgewertet wurden und keine Rekalibrierung erforderlich

war. Die maximalen Abweichungen der Einzelkalibriermessungen vom gemeinsamen Mittelwert betragen +2,4 % bzw. -1,9 %.

An 84 % der Hauptmesspunkte der Betonkuppel wurden Minderdicken gemessen; der Median aller Dicken lag bei 114 mm und damit 6 mm unter der Solldicke.

3. Zusammenfassung

Die Messbeispiele zeigen die gute Eignung des Impakt-Echo-Verfahrens, um Dicken auf einem grobmaschigen Messraster oder an einzelnen Messpositionen zu messen. Die Messungen können, wie bei der Messung an der Giebelwand, meist zügig durchgeführt werden, und eine Auswertung auf größere Hohlstellen gelingt im Allgemeinen problemlos, selbst wenn die Schallgeschwindigkeit wie hier geschätzt wurde. Bei konstanter Wanddicke und einer Kalibrierung ist eine quantitative Dickenmessung möglich.

Für klare Messergebnisse sind eindeutige Randbedingungen an der Vorder- und Rückseite des Betons erforderlich. Wenn an die Rückseite einer Bitumenschicht anhaftet wie bei den Kuppelmessungen, können die Zeitsignale stark gedämpft werden, wodurch die Frequenzspektren nicht mehr auswertbar sind. Befinden sich zwei Betonschichten in direktem Kontakt, kann die Grenzfläche für den Schall transparent und damit die Rückseite der vorderen Betonschicht quasi unsichtbar werden.

Für die Interpretation derartiger Fälle sind messtechnisches Fachwissen durch eine Aus- oder Weiterbildung des Prüfers und Erfahrung erforderlich. Bei den Messungen und ihrer Auswertung müssen immer die Zeitsignale und Frequenzspektren interpretiert werden; die ausschließliche Beachtung des Dickenwertes kann zu Fehlinterpretationen führen. Bei der Ergebnisdarstellung hat sich bewährt, nur nach Stand der Technik sichere Ergebnisse ohne Kommentar anzugeben. Unsichere Messergebnisse sollten als solche kenntlich gemacht und unklare Ergebnisse gar nicht erst aufgeführt werden.

Die Interpretation von Impakt-Echo-Messungen wird erleichtert, wenn genügend Informationen über das Messobjekt aus Plänen oder Besprechungen mit dem Auftraggeber vorliegen. Dabei kann nicht erwartet werden, dass der Auftraggeber mögliche messtechnische Probleme vorab erkennt.

Danksagung

Der Autor dankt seinen Kollegen Bernd Müller, Ulrich Tümmler und Alexander Ulanov (alle MFPA Weimar) für die Durchführung der Messungen. Die Impakt-Echo-Software *ImpEcho*, die bei den Messungen an der Giebelwand eingesetzt wurde, wurde von Alexander Ulanov (MFPA Weimar) programmiert.

Referenzen

- [1] DGZfP-Merkblatt B11: *Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen*; Ausgabe 2011-04. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2011.
- [2] RI-ZFP-TU: *Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen*; Ausgabe 2007-12. In: ZTV-ING, Teil 5: Tunnelbau, Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise, Anhang A. Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056 (2007), S. 29–35.
- [3] ASTM C 1383-15: *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*; Edition 2015. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [4] Sansalone, Mary J.; Streett, William B.: *Impact-Echo – Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Jersey Shore, Pennsylvania: Bullbrier Press, 1997.