

Validierung von ZfP-Verfahren im Bauwesen

A. Taffe, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
H. Wiggerhauser, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung:

Die Validierung der Lösung von Prüfaufgaben mit zerstörungsfreien Verfahren ist in vielen Bereichen Stand der Technik. Validierung liefert den objektiven Nachweis, dass das ausgewählte Verfahren in der Lage ist, die Anforderungen eines Kunden zu erfüllen. Insbesondere im Bauwesen, wo mit Ausnahme des Rückprallhammers kein Verfahren zur Prüfung am Bauwerk in einer Norm geregelt ist, kann so die Validierung zur Verbesserung der Anwendungssicherheit und zur Schaffung neuer zuverlässiger Dienstleistungen beitragen.

Eine gut dokumentierte Validierung erlaubt es einem Kunden, den wahrscheinlichen Erfolg oder Misserfolg einer durchzuführenden Prüfung vorab zu ermitteln, indem Ergebnis und zu erwartende Messunsicherheit den Kundenanforderungen gegenübergestellt werden. Dabei kann entweder auf bereits vorhandene Validierungen mit vergleichbaren Randbedingungen zurückgegriffen werden oder es müssen der Prüfaufgabe angepasste Überlegungen angestellt und einzelne Messungen zusätzlich durchgeführt werden. Der Aufwand resultiert in einem transparenten und zuverlässigen Ergebnis, das der Kunde in dem von ihm geforderten Rahmen weiterverwenden kann. Für den Kunden unbrauchbare Ergebnisse oder Enttäuschungen können so vermieden werden.

In dem Beitrag wird eine Methode zur Durchführung von Validierungen vorgestellt, die eine große Bandbreite von Prüfaufgaben (u.a. Dickenmessung von einseitig zugänglichen Stahlbetonbauteilen, Längenmessung von Betonpfählen, Tiefenlage von Hüllrohren und Bewehrung, Ortung von Fehlstellen) unter Verwendung verschiedener Prüfverfahren (z. B. Ultraschallecho, Impakt-Echo, Low-Strain Verfahren) erlaubt. Anhand der Dickenmessung von Stahlbetonfundamenten mit verschiedener Dicke und Bewehrungsgehalten wird gezeigt, wie sich zu berücksichtigende Einflussgrößen auf das Messergebnis auswirken. Die Methode fasst Validierung gemäß DIN EN ISO 17025, Messunsicherheit nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) und neuste Entwicklungen aus der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen zusammen, wobei eine Anpassung an Prüfaufgaben aus dem Bauwesen vorgenommen wurde.

1 Nutzen der Validierung im Bauwesen

In vielen technischen Bereichen, z. B. der Pharmazie, Luft- und Raumfahrt, bedient man sich der Validierung, um einen objektiven und transparenten Nachweis zu erbringen, dass die Anforderungen des Kunden erfüllt werden. Validiert wird dabei weder das Problem noch das Verfahren, sondern die Vorgehensweise zur Lösung von Prüfaufgaben unter Verwendung eines bestimmten Verfahrens. Durch eine gut dokumentierte Validierung verbessert sich für Dienstleister die Anwendungssicherheit. Dem Kunden gegenüber kann er seine Leistung genau beschreiben und ermitteln, inwieweit Kundenanforderungen erfüllt werden. Das hilft Enttäuschungen beim Kunden vorzubeugen, dass Ergebnisse nicht den Anforderungen entsprechen oder für den Kunden unbrauchbar sind.

Gerade im Bauwesen wird von vielen potenziellen Nutzern zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfPBau-Verfahren) die fehlende Anwendungssicherheit bemängelt. Derzeit ist im Bauwesen nur der Rückprallhammer als zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Untersuchung an Bauwerken genormt. Dabei zeigt die Vergangenheit deutlich, dass sich die Regelung von zerstörungsfreien Prüfmethoden, wie sie in der Rili SIB [1] und ZTV-ING [2] zu finden sind, bewährt hat und die Verfahren zum Nachweis der geforderten Ausführungsqualität beitragen. In Anlehnung daran ist die Anwendung akustischer ZfPBau-Verfahren zur Gewährleistung und Kontrolle eines hohen Qualitätsstandards bei Straßentunneln in geschlossener Bauweise erstmals in der Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU, [3]) geregelt. Demnach ist die Bauteildicke der Tunnelinnenschale im Rahmen der Eigenüberwachung des Auftragnehmers auf Fehlstellen bzw. Minderdicken zu prüfen. Die genaue Beschreibung der Vorgehensweise und der zu erbringenden Prüfleistung sowie der praktische Nachweis der Sachkunde des Prüfpersonals an realistischen Prüfkörpern haben zu einer verbesserten Anwendungssicherheit beigetragen. Diese Entwicklung wurde auf der Grundlage einer langjährigen Verfahrenscharakterisierung von Ultraschallecho und Impakt-Echo möglich. Durch die Validierung werden diese Erfahrungen gesammelt und transparent als quantitative Angaben (z. B. Messunsicherheit, Richtigkeit, Präzision) dargestellt.

Des Weiteren wird von Nutzern bemängelt, dass oft nicht klar erkennbar ist, welche Leistung der Kunde beim Dienstleister „einkauft“ und ob der Kunde die Ergebnisse in dem von ihm gewünschten Maß nutzen kann. Auch die Vergleichbarkeit von Ergebnissen von Untersuchungen ist meist nicht gegeben, was an der oft zu lesenden Formulierung deutlich wird: *„Die Genauigkeit des Verfahrens beträgt $\pm 10\%$.“* Vermutlich ist hier von der Messunsicherheit die Rede, wobei völlig unklar bleibt, ob es sich um die Standardabweichung oder die erweiterte Messunsicherheit auf einem Vertrauensniveau von 95% handelt. Die vorherrschende Sprachverwirrung beim Begriff *Validierung* und eine Vermischung mit den Begriffen Verifizierung und Qualifizierung, schlimmer noch Kalibrierung und Zertifizierung, sind einer Akzeptanz einer einheitlichen Vorgehensweise hinderlich.

So ist es nicht verwunderlich, dass man auch in der Fachwelt gern von Validierung seines Verfahrens spricht, wenn gerade mal ein paar Untersuchungen durchgeführt wurden und noch nicht einmal die Messunsicherheit angegeben wird. Eine klare Fassung des Begriffs Validierung und der Vorgehensweise sollen folgende extreme Positionen vermeiden: „Ich lasse die Korrektheit meiner Daten nicht durch Fehlerbalken anzweifeln!“ oder „Bei so vielen Einflüssen dauert eine Validierung ja Wochen ...“ [4]. Dagegen soll der Nutzen einer Validierung deutlich werden:

- Qualität schaffen
- Vertrauen schaffen
- Märkte schaffen

2 Durchführung einer Validierung

Validierung ist nach Definition der DIN EN ISO 17025 [5] die Bestätigung durch Untersuchung und Bereitstellung eines **Nachweises**, dass die **besonderen Forderungen** für einen **speziellen beabsichtigten Gebrauch** erfüllt werden. Dabei handelt es sich beim „speziellen beabsichtigten Gebrauch“ um die klar

definierten Kundenanforderungen, die entweder von (sachkundigen) Kunden selber kommen oder vom Dienstleister und Kunden gemeinsam erarbeitet werden. Hinter den „besonderen Forderungen“ stecken Erfahrungen aus der Verfahrenscharakterisierung, welche Vorgaben erfüllt sein müssen, um eine bestimmte Prüfaufgabe erfolgreich bearbeiten zu können, z. B. der maximal zulässige Bewehrungsgehalt oder die zulässige Oberflächenrauigkeit.

Die Durchführung einer Validierung setzt sich aus drei Schritten zusammen und ist ebenfalls in [5] beschrieben:

- **Charakterisierung des Prüfverfahrens**
Messunsicherheit, Richtigkeit, Präzision, Nachweisgrenze usw.
- **Vergleich mit Qualitätsanforderungen**
Kundenanforderungen, „speziell beabsichtigter Gebrauch“
- **Nachweis der Erfüllung**

Abbildung 1 aus [6] zeigt die oben beschriebene Vorgehensweise: die Verfahrenscharakterisierung folgt aus der täglichen Messtätigkeit mit ZfPBau-Verfahren im Rahmen von Forschung, Entwicklung und Praxiseinsatz. Die **Charakterisierung** erfolgt durch zu quantifizierende Größen wie Messunsicherheit, Präzision, Richtigkeit, Nachweisgrenze und beschreibende Größen wie Wiederholbedingung, Vergleichsbedingung u.a. Auch die **Kundenanforderungen** werden anhand der gleichen Größen spezifiziert. Dieser Schritt erfolgt wie oben bereits ausgeführt ggf. durch Mitwirkung des Dienstleisters. Die Eignung des Verfahrens zeigt sich durch eine mehr oder weniger große Schnittmenge zwischen Möglichkeiten des Verfahrens (ausgedrückt durch die Verfahrenscharakterisierung) und Kundenanforderungen. Diese Schnittmenge stellt das auf die Prüfaufgabe mit all ihren technischen Randbedingungen anwendbare Verfahren dar, das auch durch die vom Kunden vorgegebenen Randbedingungen spezifiziert wird. Diesen Randbedingungen wird im Rahmen der Messunsicherheitsermittlung im nachfolgenden Abschnitt besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

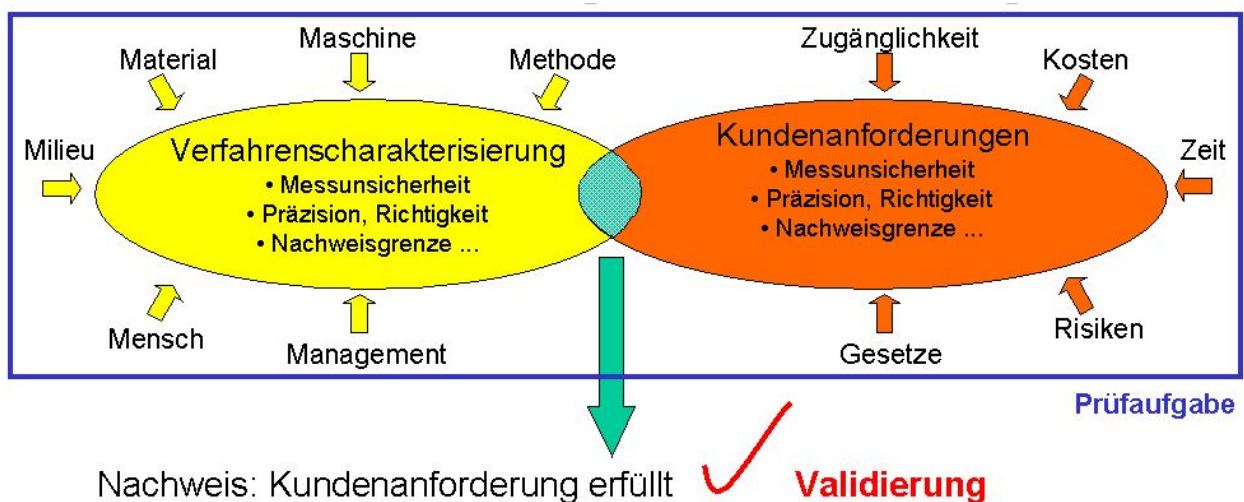


Abbildung 1 Durchführung einer Validierung [6]

Die Validierung steht erst am Ende des in Abbildung 1 dargestellten Prozesses, wenn der **Nachweis** erbracht ist, dass das charakterisierte Verfahren die Kundenanforderungen erfüllt. Das bedeutet nicht zwangsläufig, dass die Validierung

am Prüfobjekt des Kunden durchgeführt werden muss, was in der Praxis häufig gar nicht möglich sein wird. Es bedeutet vielmehr, dass aus einer möglichst lückenlosen Verfahrenscharakterisierung unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen fundiert ermittelt werden kann, inwieweit die Kundenanforderungen erfüllt werden können. Dies mag in einem Fall sicher vorhergesagt werden können, im anderen Fall liegen die Anforderungen im Grenzbereich der erzielbaren Ergebnisse. Dies ist dem Kunden vorab mitzuteilen, um das weitere Vorgehen abzustimmen. Wenn bei der Verfahrenscharakterisierung nicht alle Randbedingungen messtechnisch berücksichtigt wurden, müssen ggf. zusätzliche Messungen durchgeführt und „nachvalidiert“ werden. So lässt sich der Aufwand auf eine vertretbare Größenordnung begrenzen.

Die Betrachtung zeigt deutlich, dass ein geeignetes Verfahren ein Prüfproblem nur unter vorgegebenen und bekannten Randbedingungen löst. Daher wird das Verfahren unter festen Randbedingungen validiert. Eine pauschale „Verfahrensvalidierung“ ist im Sinne der DIN EN ISO 17025 nicht möglich.

3 Ermittlung der Messunsicherheit

3.1 Messunsicherheitsermittlung nach GUM

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, spielt die Ermittlung der Messunsicherheit eine zentrale Rolle bei der Verfahrenscharakterisierung. Diese erfolgt bei dem nachfolgend aufgeführten Beispiel (Dickenmessung an Fundament mit Ultraschallecho) nach dem *Leitfaden zur Angabe von Unsicherheit beim Messen (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM)* [7]. Dieses als Norm ENV 13005 veröffentlichte Regelwerk entstand 1999 angesichts eines Mangels an einer internationalen Übereinkunft über die Angabe der Unsicherheit im Messwesen. Die darin enthaltene einfach handhabbare und leicht verständliche Charakterisierung der Qualität des Messergebnisses erlaubt aufgrund der universellen Formulierung auch die Übertragbarkeit ins Bauwesen. Der beschrittene Weg des GUM zeigt die Notwendigkeit der Entwicklung einer einheitlichen transparenten Vorgehensweise auch bei der Validierung.

Für quantitative Messergebnisse wird der Messprozess in Module aufgeteilt. Für jedes Modul werden Modellgleichungen aufgestellt, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den als relevant eingestuften Eingangsgrößen (Einflussgrößen) und der zu ermittelten Ausgangsgröße (Messgröße) bildet. Auf dieser Grundlage werden Erwartungswerte und Standardunsicherheiten berechnet. Es werden Kriterien hergeleitet, wonach bestimmte Eingangsgrößen, z. B. der Abstand von Sender und Empfänger, für typische Randbedingungen im Bauwesen, z. B. Bauteildicken größer 1 m, vernachlässigt werden können. Dies dient in der Praxis dazu, den Validierungsprozess zu vereinfachen.

3.2 Dickenmessung an Fundamenten mit Ultraschallecho

An einem Fundament von 70 cm bzw. 120 cm Dicke zzgl. 5 cm Magerbeton und zehn verschiedenen Bewehrungsgehalten wurde die Messunsicherheit in Abhängigkeit von Bauteildicke, Bewehrungsgehalt und Art der Auswertung quantitativ bestimmt (Abbildung 2a und b). Durch ein eingebautes Referenzsystem konnte die tatsächlich vorhandene Plattendicke an jeder Stelle eines 5 cm Rasters

mit einer Gesamtstandardabweichung von ± 10 mm angegeben werden. Nachfolgend wurde an jeder Stelle mit Ultraschallecho (Transversalwellen, Mittenfrequenz 25 kHz) die Laufzeit gemessen und die Schallgeschwindigkeit als Mittelwert eines Bereichs mit gleicher Dicke (70 oder 120 cm) und gleichem Bewehrungsgehalt bestimmt. Zusätzlich wurde die Messunsicherheit unter der Berücksichtigung der in Abbildung 3 dargestellten Einflussgrößen ermittelt. Die Messunsicherheit ist in Abbildung 2c erkennbar: in den unbewehrten Bereichen sind die Rückwandreflexionen deutlicher und weniger verschwommen als in den Bereichen mit unterer Bewehrungslage. Die Beobachtung der in Abhängigkeit von Dicke und Bewehrungsgehalt variierenden Messunsicherheit wurde nachfolgend quantifiziert.

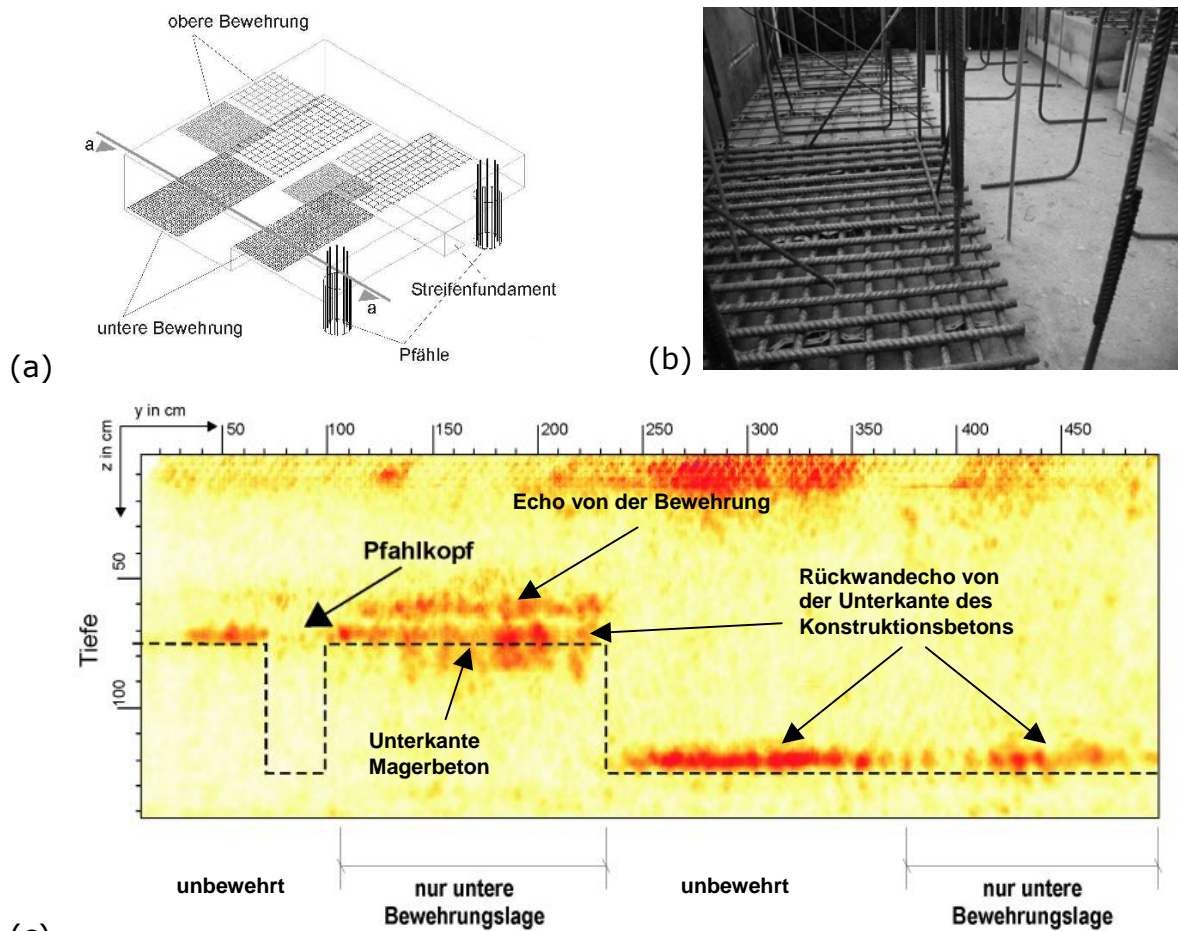


Abbildung 2 (a) Skizze des Fundaments; (b) Foto der Bereiche mit verschiedenen Bewehrungsgehalten vor dem Betonieren; (c) bildgebende Darstellung der Ergebnisse aus Schnitt a-a. Es sind die gemessenen Reflexionen über der Bauteildicke (Tiefe) dargestellt [8].

Um die Messunsicherheit des gesamten Messprozesses bei der Dickenmessung zu bestimmen, wird vom Prinzip der Laufzeitmessung ausgegangen und jede bekannte Einflussgröße betrachtet und zur Modellbildung herangezogen. Im Idealfall, in Abbildung 3 oben, wird die Laufzeitmessung mit Eindringen des ausgesandten Signals ins Bauteil begonnen und die Zeitmessung bei Erreichen der ersten Reflexion von der Rückwand an der Bauteiloberfläche gestoppt. In der Praxis der Ultraschallechomessung stellt sich das schwieriger dar, weil zunächst eine Vorlaufzeit durch die Elektronik und den Prüfkopf berücksichtigt werden muss und der Zeitpunkt des Schalleintritts ins Bauteil von Oberflächenwellen überlagert wird.

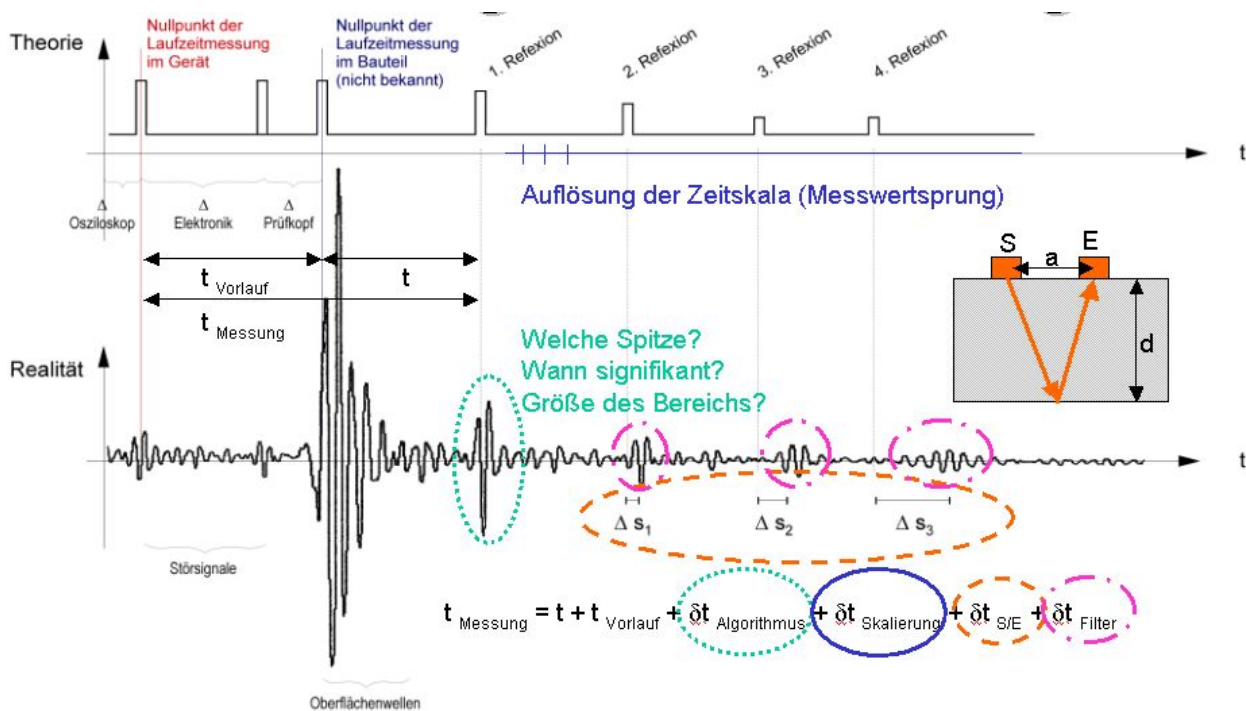


Abbildung 3 Modellbildung der Laufzeitmessung. Oben: ideale Laufzeitkurve; unten: gemessene Laufzeitkurve einer Ultraschallmessung.

Folgende Einflussgrößen, die zur Messunsicherheit der Laufzeitmessung beitragen, wurden berücksichtigt und quantifiziert:

- Auswertalgorithmus: welche Anzeige wird berücksichtigt?
- Beschränkte Auflösung der Zeitskala (hier 3 μs)
- Abstand zwischen Sender und Empfänger und damit verbundene Laufwegverlängerung
- Tiefpassfilterwirkung des Betons auf das empfangene Signal (Deformierung des Signals)

Bei den Auswertalgorithmen wurde berücksichtigt:

- „Einfache Auswertung“: Ablesen aus der (nicht gleichgerichteten) Laufzeitkurve des 1. Minimums (mind. 20% größer als benachbarte Minima)
- „Einhüllende“: Ablesen des (Energie-)Maximums der Einhüllenden, die mit Hilfe einer Hilbert-Transformation erzeugt wurde.

Abschließend wurden die Erwartungswerte für die Schallgeschwindigkeiten und Bauteildicken sowie die beigeordneten erweiterten Messunsicherheiten (95% Vertrauensniveau) ermittelt. Zusammenfassend wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Die **Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen** liegt im Mittel etwa bei **2.550 m/s**. Die **erweiterte Messunsicherheit (95% Niveau)** variiert für die „einfache Auswertung“ von rd. **1%** (unbewehrt) bis **7%** (maximal bewehrt = obere und untere Bewehrung $\varnothing 28$ mm, Abstand 10 cm, kreuzweise). Für die Auswertung der Einhüllenden liegt sie zwischen **3%** (unbewehrt) und **5%** (maximal bewehrt).
- Die **ermittelte Dicke für einen einzelnen Messpunkt¹** (Bereich 70 cm Dicke, jeweils gleicher Bewehrungsgehalt) liegt im Mittel bei **69,8 cm**. Die

¹ Bei entsprechender Mittelwertbildung ergibt sich eine geringere Messunsicherheit.

erweiterte Messunsicherheit variiert für die „einfache Auswertung“ von **1,6 cm** (unbewehrt) **bis 19 cm** (maximal bewehrt = obere und untere Bewehrung $\varnothing 28$ mm, Abstand 10 cm, kreuzweise). Für die Auswertung der Einhüllenden liegt sie zwischen **3,8 cm** (unbewehrt) und **7,4 cm** (maximal bewehrt).

- Die Messunsicherheit aus dem Auswertalgorithmus hat sich als die bestimmende Einflussgröße herausgestellt.

Die Betrachtung des Praxisbeispiels zeigt, dass die Eignung eines Verfahrens sehr stark von den Randbedingungen (Dicke, Bewehrung, Auswertung) abhängt und für den Einzelfall ermittelt werden muss. Des Weiteren wird deutlich, dass Wahl des Auswertalgorithmus den Randbedingungen angepasst werden muss. Die „einfache Auswertung“ führt nur bei gering bewehrten Bauteilen zu akzeptablen Messunsicherheiten, wohingegen die Auswertung der Einhüllenden auch bei stark bewehrten Bauteilen noch zu akzeptablen Messunsicherheiten führt. Die Ermittlung der Messunsicherheiten weiterer Auswertalgorithmen, z. B. SAFT, ist derzeit in Arbeit.

4 Validierungskonzept für die Zukunft

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, wird eine Validierung für die jeweils vorliegenden technischen Randbedingungen (Prüfgerät, Wellenart, Frequenz usw.), Bauteilbedingungen (Bauteildicke, Bewehrungsgehalt, Rauigkeit) und Umgebungsbedingungen (Zugänglichkeit, klimatische Randbedingungen, Messzeit) durchgeführt. Aus der Verfahrenscharakterisierung, wie sie im Rahmen von Forschung und Entwicklung sowie praktischen Messeinsätzen durchgeführt wird, liegen Informationen über die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen vor. Aus diesem Grund ist es nicht erforderlich, eine komplette Validierung unter allen Randbedingungen am Originalbauteil durchzuführen. Vielmehr ist ein Validierungskonzept bei allen Untersuchungen und deren Auswertung anzuwenden, um die Auswirkung der Einflussgrößen, z. B. auf die Messunsicherheit, festzuhalten. So entsteht mit der Zeit ein immer engeres Netz an quantifizierbaren Einflussgrößen, anhand derer eine Validierung durchgeführt werden kann („Fischernetz-Prinzip“).

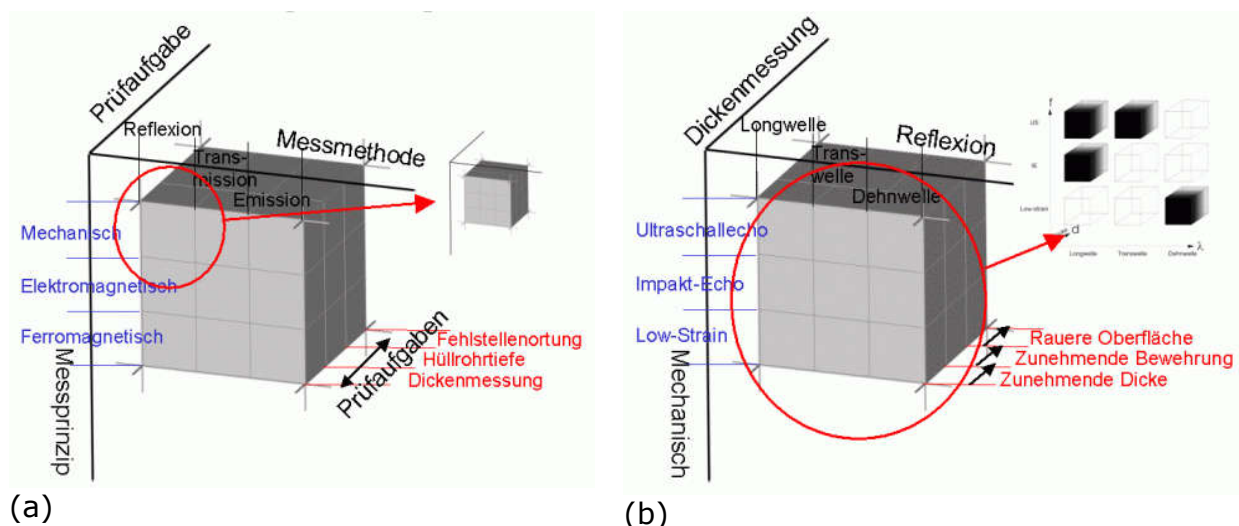


Abbildung 4: Darstellung des Validierungskonzepts in Form einer allseitig offenen Matrix [6]. (a) 1. Stufe; (b) 2. Stufe.

Nachfolgend wird ein Validierungskonzept vorgestellt, das in Form einer allseitig offenen Matrix strukturiert ist, die auch noch auf andere Messprinzipien erweitert werden kann. Die Matrix wird wie in Abbildung 4a dargestellt durch drei Achsen aufgespannt:

- Messprinzip: Physikalische Grundlage der Messung; z. B. mechanische Anregung durch Ultraschallimpulse und Ausnutzen der bekannten Wechselwirkung.
- Messmethode: Spezielle, vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung, z. B. Messanordnung in Transmission oder Reflexion.
- Prüfaufgabe: z. B. Laufzeitmessung zur Dickenmessung (ebener Reflektor), Hüllrohrtiefe (linearer Streuer) oder Fehlstellenortung (punktuellder Streuer).

In der 2. Stufe wird ein Ausschnitt aus der Matrix der 1. Stufe betrachtet (Abbildung 4b). Es werden nur mechanisch anregende Verfahren in Reflexionsanordnung betrachtet (Ultraschallecho US, Impakt-Echo IE und Low-Strain-Verfahren²). Bei der Messmethode wird die Nutzung von Longitudinal-, Transversal- oder Dehnwellen unterschieden. Für die Prüfaufgabe Dickenmessung werden weitere Parameter unterschieden (Dicke, Bewehrung, Oberflächenrauigkeit), die in der 3. Stufe detailliert betrachtet werden.

In der 3. Stufe werden dann die einzelnen „Scheiben“ aus der Matrix betrachtet. Bei den weißen Kästchen in Abbildung 5 handelt es sich um Kombinationen, z. B. Impakt-Echo (IE) mit Transversalwellen, die technisch nicht möglich sind oder noch nicht existieren. Die grau-schwarz unterlegten Bereiche stellen Anwendungsfälle dar, die validierbar sind bzw. validiert wurden. In Abbildung 5 ist der Bereich der in Kapitel 3.2 beschriebenen Validierung eingekreist. Die abnehmenden Grautöne zeigen an, dass mit zunehmender Dicke oder zunehmendem Bewehrungsgehalt die Messunsicherheit zunimmt.

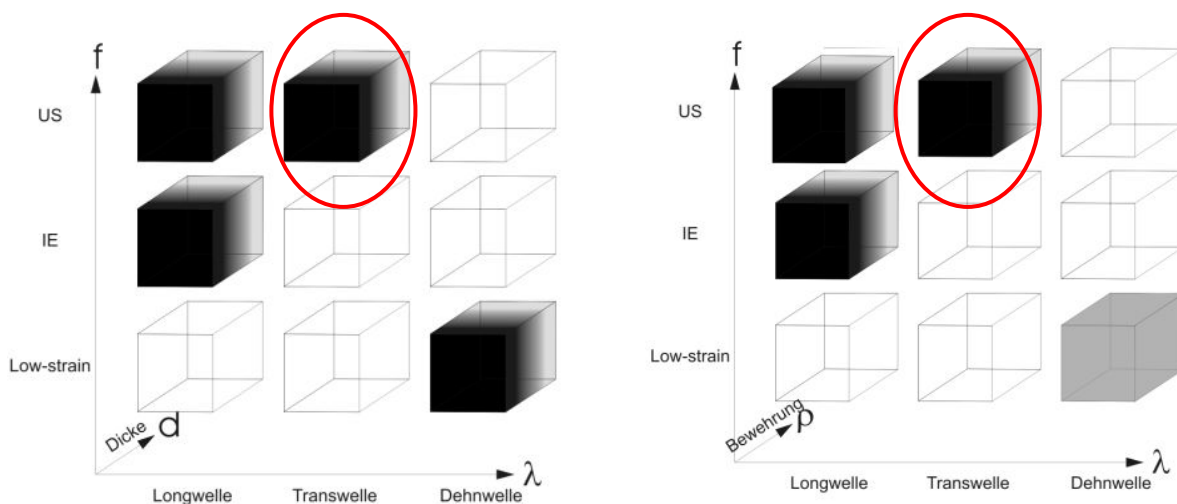


Abbildung 5: 3. Stufe des Validierungskonzepts: die grau bzw. schwarz unterlegten Kästchen sind Anwendungsbereiche, die validierbar sind. Die weißen Kästen sind Anwendungsbereiche, für die noch keine technische Realisierung besteht (Z. B. Impakt-Echo mit Transversalwellen).

² Auch Hammerschlagmethode genannt; wird zur Längenmessung und Integritätsprüfungen von Pfahlgründungen aus Beton verwendet.

Die grafische Darstellung des Validierungskonzepts dient als Navigationshilfe und soll zeigen, wie systematisch ein dichtes Netz validierter Verfahrensweisen erzeugt werden kann. Dies wird in der BAM, Fachgruppe „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ durch systematische Erstellung von Bauteilen und Teststandorten (z. B. Fundamentplatte und Pfahlprüfstandort mit definiert hergestellten Bohrpfählen) mit definierten Randbedingungen und systematischen Untersuchungen – auch an bestehenden Bauwerken – umgesetzt. Die vorgestellte Vorgehensweise zur modularen Betrachtungsweise des Messvorgangs und der Ermittlung von Messunsicherheiten soll auf die durchgeführten Messungen und Messdatenauswertung einheitlich angewendet werden.

Die aus Validierungen gewonnenen Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Verfahren sollen in Regelwerken veröffentlicht werden, um so die Anwendungssicherheit von ZfPBau-Verfahren zu verbessern und eine gute Grundlage für neue zuverlässige Dienstleistungen zu schaffen.

5 Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie) Teil 1 bis 4, Berlin: Beuth Verlag (2001).
- [2] Der Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) Teil 3, Abschnitt 4, "Schutz und Instandsetzung (SIB)", Ausgabe März 2003, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.), Dortmund: Verkehrsblattverlag (2003).
- [3] Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU) Ausgabe 2001, Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrsblatt-Dokument Nr. S 1050, Verkehrsblatt-Verlag (2001).
- [4] Hack, E.: Grundbegriffe zur Messunsicherheit in: EMPA-Akademie (Hrsg.) Bildgebende Methoden der ZfP, Dübendorf (CH), 01.04.2004
- [5] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:1999); Ausgabe:2000-04, Beuth Verlag, Berlin
- [6] Taffe A.: Methodik zur Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren in: Seminar „Physikalische Probleme der zerstörungsfreien Prüfverfahren“, Universität des Saarlandes, 05.12.2005
- [7] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
- [8] Taffe, A., Krause, M., Milmann, B. und E. Niederleithinger: Zerstörungsfreie Untersuchungen an Fundamentplatten, Beton und Stahlbetonbau 99 (2004)12, S. 1000-1004.