

# **Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Trittschall in der neuen DIN 4109**

## **– Zusammenfassung –**

Volker Wittstock, Werner Scholl

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig,  
volker.wittstock@ptb.de

gefördert vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

### **1. Einleitung**

Die Überarbeitung der DIN 4109 erfordert Kenntnisse über die Trittschallpegel verschiedener Bauteiltypen und die mit diesen Werten verbundenen Unsicherheiten. Letztere sind dabei für die Bauakustik, ebenso wie für alle anderen technischen Disziplinen, von zentraler Bedeutung. Ob z.B. ein Bauteiltyp einer Spezifikation oder Anforderung genügt, kann nicht durch die Ermittlung eines Messwertes allein sondern nur unter Berücksichtigung der zugehörigen Messunsicherheit sowie der Bauteilstreuungen beurteilt werden. Für die Überarbeitung der DIN 4109 sind somit Kenntnisse über die Unsicherheit unerlässlich.

Der vorliegende Bericht bildet den Abschluss eines Projekts, in dessen Rahmen die Unsicherheiten beim Trittschall systematisch untersucht werden sollten. Im ersten Teilprojekt „Unsicherheiten bei der messtechnischen Beurteilung von Bauteilen und Gebäuden“ liegt der Fokus auf der Auswertung vorhandener Ringversuchsergebnisse und der Ermittlung der Unsicherheiten, die mit der Verwendung des Trittschall-Hammerwerks verbunden sind. Der zweite Teil „Unsicherheiten bei der Übertragung von Laborergebnissen auf reale Gebäude und bei der Prognoserechnung“ behandelt den Einfluss geometrischer Parameter auf den Normtrittschallpegel, der anhand von Modellmessungen untersucht wurde, sowie die Unsicherheit bei der Prognose.

### **2. Auswertung von Ringversuchen**

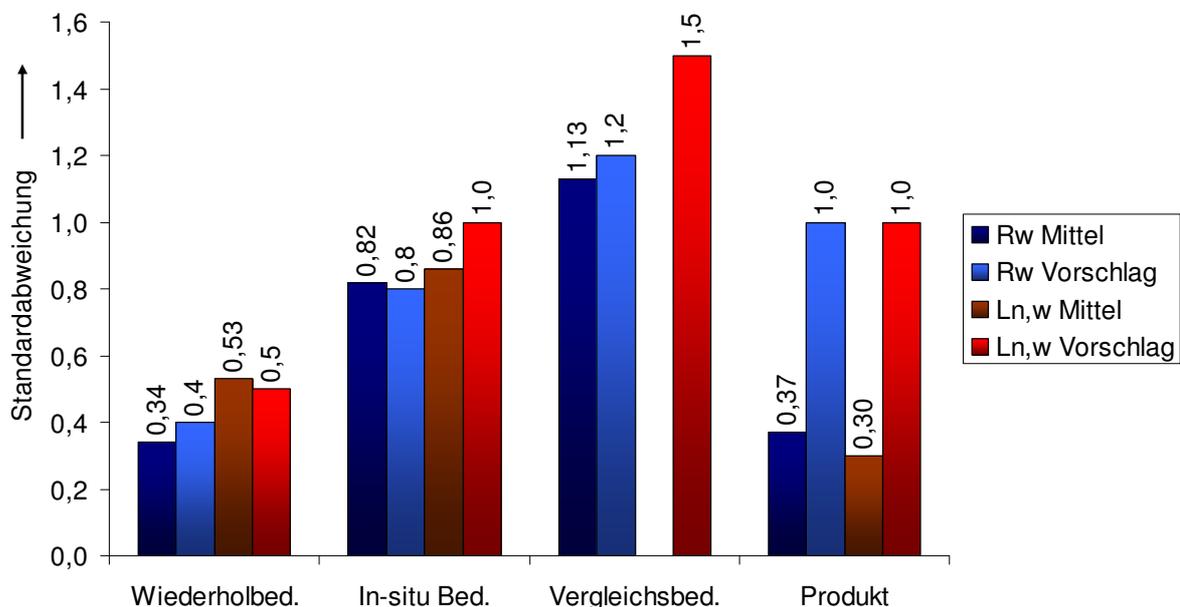
Da die Aufstellung eines detaillierten Unsicherheitsbudgets nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich ist, wird die Unsicherheit aus Ringversuchen ermittelt. Dabei sind die Versuchsbedingungen nach Tabelle 1 zu unterscheiden.

Tabelle 1 Versuchsbedingungen für Ringversuche

	$\sigma$	Umgebung	Messgeräte	Personal	Zeitdifferenz
Wiederholbedingungen	$\sigma_r$	=	=	=	klein
In-situ Bedingungen	$\sigma_{situ}$	=	≠	≠	
Vergleichsbedingungen	$\sigma_R$	≠	≠	≠	

Für den Norm-Trittschallpegel liegen Messungen lediglich unter Wiederhol- und In-situ-Bedingungen vor. Über Messungen unter Vergleichsbedingungen ist nichts bekannt, d.h. Messergebnisse der selben Decke aus verschiedenen Prüfständen liegen nicht vor. Darüber hinaus gibt es Messergebnisse zur Bauteilreproduzierbarkeit von Holzbalkendecken, da 8 Exemplare einer nominell identischen Decke im selben Prüfstand vermessen wurden.

Die insgesamt 600 vorliegenden Einzelspektren wurden komplett neu ausgewertet, woraus die Unsicherheiten für die Terzbänder und für die bewerteten Norm-Trittschallpegel berechnet wurden. Diese Werte werden für die DIN 4109 und auch für die ISO 12999-1 vorgeschlagen (Bild 1). Es zeigt sich, dass die Unsicherheiten im Mittel etwas größer sind als die Unsicherheiten beim Luftschall. Dies lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei Luftschalldämmungs-Messungen um Relativmessungen handelt, bei denen die Eigenschaften der Schallquelle und auch der Messkette weitgehend kompensiert werden. Bei Trittschallmessungen müssen hingegen die Schalldruckpegel absolut korrekt gemessen werden und auch das Normhammerwerk muss den Spezifikationen entsprechen.



**Bild 1** Mittlere Standardabweichungen für bewertete Schalldämm-Maße und bewertete Norm-Trittschallpegel im Vergleich zu den Vorschlägen für die DIN 4109 und die ISO 12999

Für bewertete Trittschallminderungen wurde aus Ringversuchen eine Vergleichs-Standardabweichung von 1,0 dB ermittelt. Dieser Wert kann somit als Standard-Unsicherheit den bewerteten Trittschallminderungen zugeordnet werden. Dass der Wert niedriger ist als beim Norm-Trittschallpegel, ist wiederum darauf zurückzuführen, dass es sich bei Trittschallminderungs-Messungen um Relativmessungen handelt.

### **3. Unsicherheitsbeiträge durch das Hammerwerk**

Da das Hammerwerk eine entscheidende Rolle bei der Messung des Norm-Trittschallpegels spielt, wurden die mit seiner Verwendung verbundenen Unsicherheiten separat untersucht.

In einem ersten Schritt wurden die Normvorgaben zur Hammermasse, zur Schlagfolge und zur Fallgeschwindigkeit verwendet, um für einen idealen Empfänger die Unsicherheit der emittierten Körperschalleistung zu berechnen. Hierbei ergab sich eine Standard-Unsicherheit von 0,2 dB. Außerdem wurde überprüft, ob die bei den Vergleichsmessungen in der PTB verwendeten Hammerwerke den Normvorgaben entsprechen, und welche Unsicherheiten sich bei diesen in der Praxis eingesetzten Hammerwerken ergeben. Es zeigte sich, dass die Hammerwerke die Spezifikationen sehr gut einhalten und somit der Wert von 0,2 dB für die Unsicherheit der in einen idealen Empfänger emittierten Leistung realistisch ist.

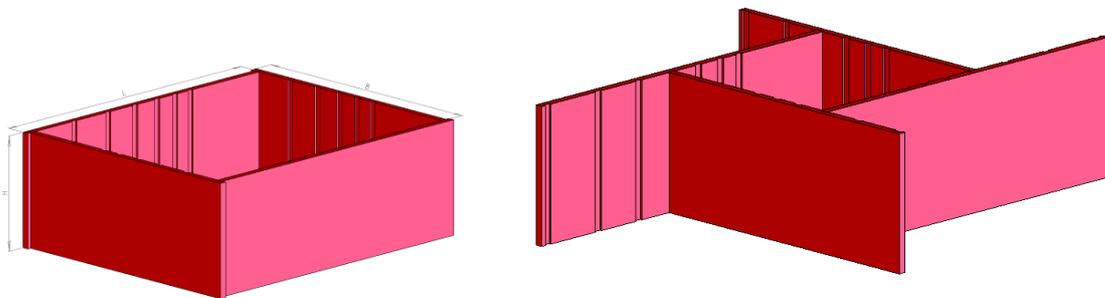
In der Praxis muss jedoch zusätzlich die Ankopplung des Hammerwerks an den Prüfgegenstand berücksichtigt werden. Um diesen Einfluss einzubeziehen, wurden mit vier verschiedenen Hammerwerkstypen Messungen an verschiedenen Empfangsplatten durchgeführt. Die in die Empfangsplatten eingespeiste Körperschalleistung, die aus dem Verlustfaktor und der mittleren Schnelle berechnet wurde, streut dabei um 0,4 dB. Dieser Wert, der sowohl in Terzen als auch für den Einzahlwert gilt, ist eine realistische Abschätzung der Unsicherheit der Körperschalleistung, die von Normhammerwerken in reale Empfangsstrukturen eingeleitet wird.

Eine weitere mit der Verwendung von Hammerwerken verbundene Frage betrifft das emittierte Spektrum. Eine Schmalbandanalyse der in einer Holzbalken- und in einer Betondecke vorliegenden Körperschallschnellen ergab ein breitbandiges Spektrum. Lediglich bei tiefen Frequenzen (Holzbalkendecke bis ca. 200 Hz, Betondecke bis ca. 50 Hz) liegt ein Linienspektrum mit 2 Hz Linienabstand vor. Der Linienabstand ist damit so gering im Vergleich zur Bandbreite von Körperschallmoden, dass man immer von einer ausreichenden Anregung aller Moden ausgehen kann.

## 4. Geometrische Einflüsse beim Trittschall

In Vorgängerprojekten hatte sich für die Luftschalldämmung eine Abhängigkeit von der exakten Bauteilgeometrie ergeben. Daraus erwuchs die Frage, ob eine solche Abhängigkeit auch für den Norm-Trittschallpegel vorliegt. Um dies zu untersuchen, wurden bauakustische Modellmessungen durchgeführt, bei denen die Geometrie des Empfangsraums variiert werden konnte (Bild 2). Auf diesen Empfangsraum wurden jeweils Modelle von Holzbalken- und Betondecken aufgebracht, die in einem ersten Untersuchungsschritt in ihrer Größe genau der Prüföffnung entsprachen. Diese Decken waren bis auf ihre Größe identisch.

Als Anregung diente eine fallende Kugel, deren Masse nach den Skalierungsgesetzen für Luft- und Körperschall ausgewählt wurde. Die gemessenen Norm-Trittschallpegel sind für homogene Beton- bzw. einfache Holzbalkendecken in ihrer Größe und spektralen Form realistisch. Dies zeigt, dass die verwendeten Modellgesetze korrekt sind.



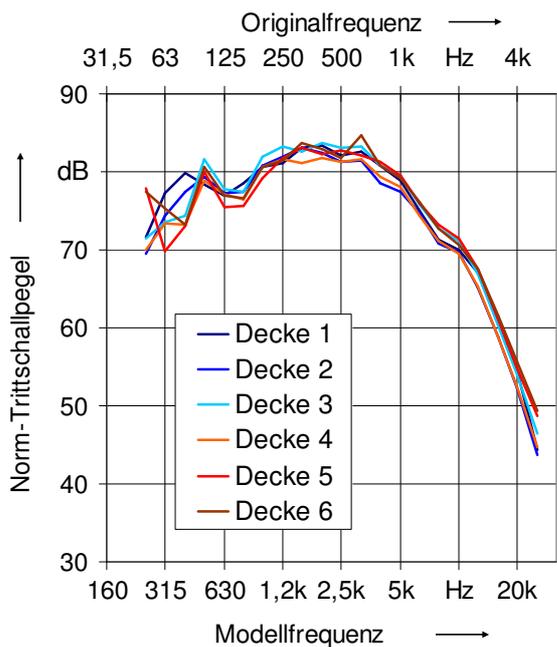
**Bild 2** Aufbau des Empfangsraums zur Realisierung unterschiedlicher Geometrien

Für die Norm-Trittschallpegel zeigte sich kein systematischer Einfluss der Deckengröße (Bild 3, Bild 4). Bei den Betondecken zeigt sich zwar aufgrund der fehlenden Modendichte im Körperschallfeld bei tiefen Frequenzen eine größere Schwankung. Diese ist jedoch eher als zufällig anzusehen und ist im bewerteten Norm-Trittschallpegel nur gering sichtbar (Bild 6).

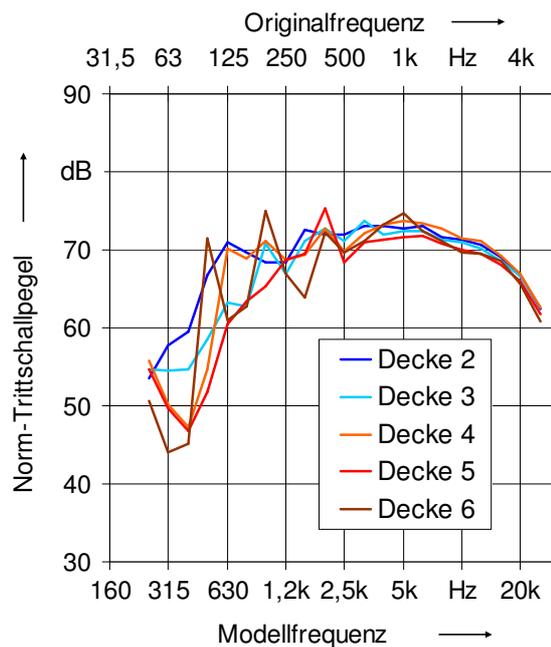
Mit den Betondecken wurde dann ein zweites Experiment durchgeführt, bei dem der kleinste Empfangsraum mit den verschiedenen Decken abgedeckt wurde. Die Deckenfläche war damit größer als die Öffnungsfläche, was im Skelettbau häufig anzutreffen ist. In diesem Fall sinkt der Norm-Trittschallpegel mit wachsender Deckengröße (Bild 5, Bild 6). Ursache ist, dass sich die Schwingungsenergie auf eine immer größere Deckenfläche verteilt. Es wird jedoch nur derjenige Energieanteil gemessen, der in den Empfangsraum eingespeist wird. Im Mittel wurde folgender Zusammenhang für den bewerteten Norm-Trittschallpegel festgestellt

$$L_{n,w}(S_1) = L_{n,w}(S_2) - 8 \lg \frac{S_2}{S_1} \text{ dB} . \quad (1)$$

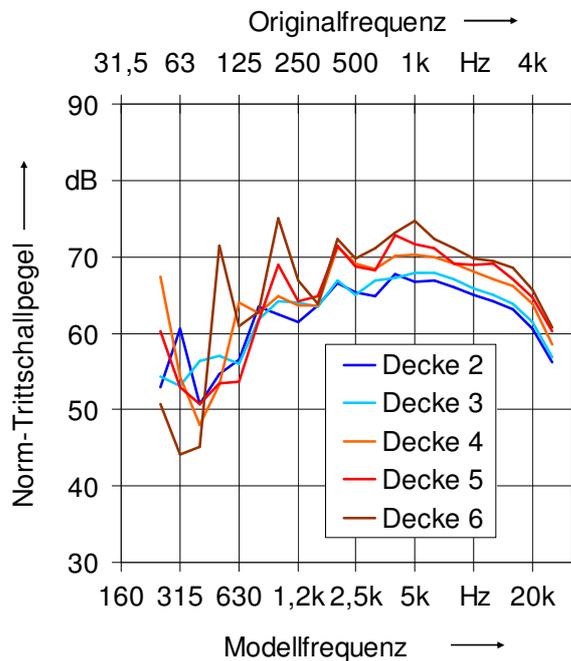
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Norm-Trittschallpegel nur wenig von den geometrischen Parametern abhängen.



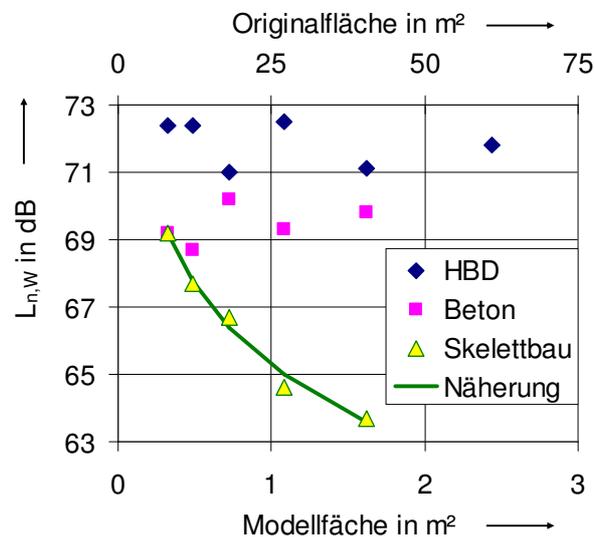
**Bild 3** Norm-Trittschallpegel von sechs unterschiedlich großen Holzbalkendecken



**Bild 4** Norm-Trittschallpegel von fünf unterschiedlich großen Betondecken



**Bild 5** Norm-Trittschallpegel von fünf unterschiedlich großen Betondecken, Senderaumvolumen blieb konstant (Skelettbau)



**Bild 6** Bewertete Norm-Trittschallpegel der unterschiedlich großen Beton- und Holzbalkendecken (HBD) sowie Näherung (1)

## **5. Unsicherheiten bei der Prognose**

Die bisherige Philosophie für den Umgang mit Unsicherheiten in der DIN 4109 bestand darin, vor Durchführung der Rechnungen bestimmte Abschläge (Vorhalte-maße) zu berücksichtigen, damit das Prognoseergebnis auf der sicheren Seite liegt. Beim Luftschall wurde diese Philosophie durch ein neues Konzept ersetzt. Dabei wird z.B. von Laborwerten für die Schalldämmung ausgegangen, denen Unsicherheiten beigemessen sind, die aus Ringversuchen ermittelt wurden. Unter Berücksichtigung der Produktstreuung, der abweichenden Baurealität und der Unsicherheit des Prognoseverfahrens ergibt sich schließlich ein Prognoseergebnis und eine zugehörige kombinierte Standard-Unsicherheit. Daraus kann anschließend ein Vertrauensbereich bei einer gewählten statistischen Sicherheit berechnet werden. Für die Bauakustik üblich wäre hier ein einseitiger Vertrauensbereich bei einer Sicherheit von 84%. Damit müsste die einfache Standardunsicherheit vom Prognosewert subtrahiert werden.

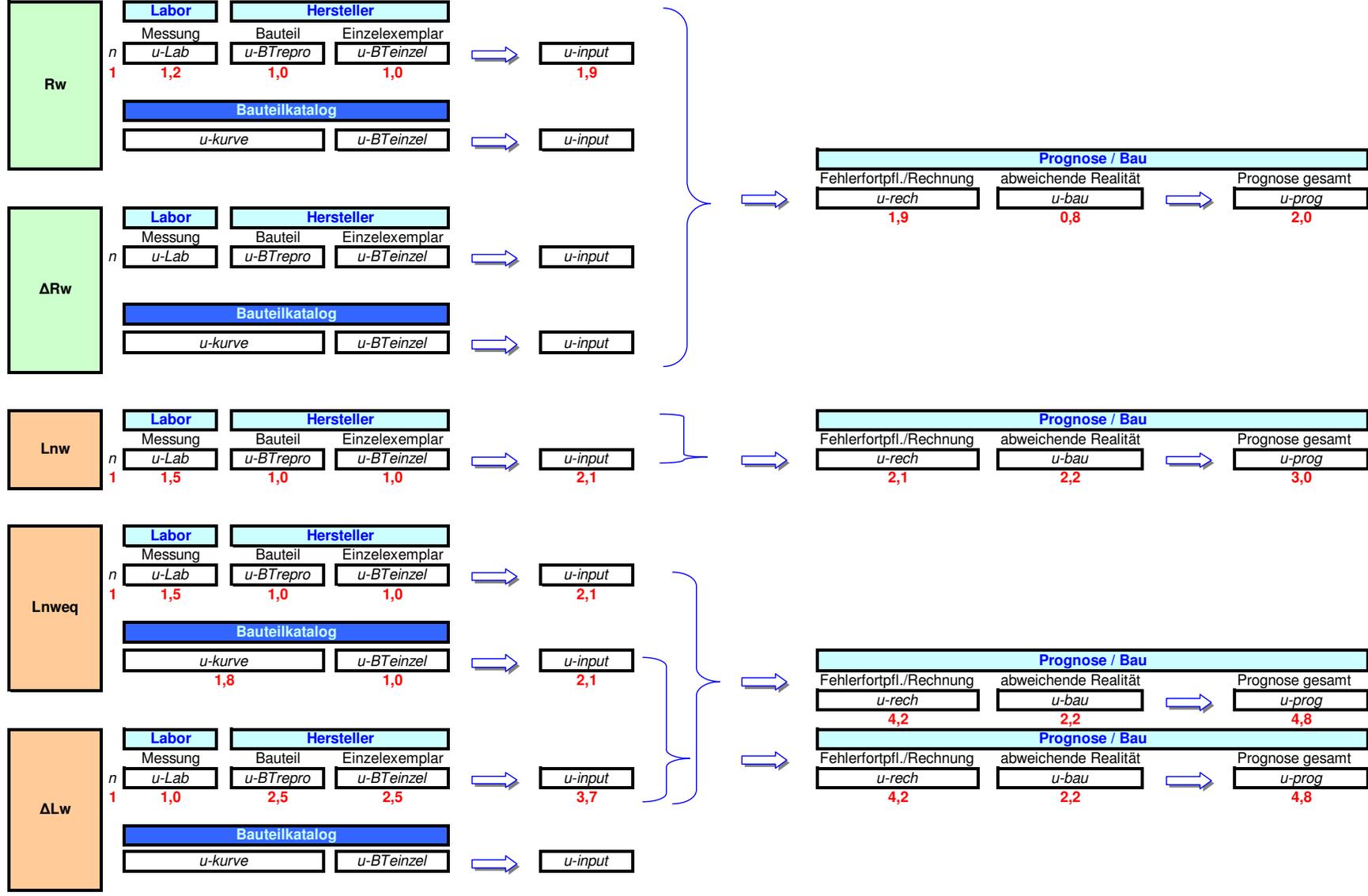
Dieses Verfahren besitzt entscheidende Vorteile, vor allem durch die große Transparenz in Bezug auf die Herkunft der einzelnen Unsicherheitsbeiträge. Es ist daher anzustreben, dieses Verfahren auch für den Trittschall anzuwenden.

Im Rahmen des Projekts wurden die bei der Prognose einfließenden Unsicherheitsbeiträge abgeschätzt. Für den prognostizierten Norm-Trittschallpegel ergab sich eine Standardunsicherheit von 4,8 dB. Werden nun die gleichen statistischen Sicherheiten wie beim Luftschall herangezogen, so müsste dieser Wert zum prognostizierten Norm-Trittschallpegel addiert werden, um mit 84% Wahrscheinlichkeit zu einer Unterschreitung zu kommen.

Eine Zusammenfassung des Vorschlags zum Umgang mit den Unsicherheiten in der DIN 4109 zeigt Bild 7. Hier sind Luft- und Trittschall miteinander verglichen. In beiden Fällen besteht die Möglichkeit, die Prognose auf Labordaten aufzubauen. Die zugehörigen Unsicherheiten wurden für den Luftschall in Vorgängerprojekten und für den Trittschall in diesem Projekt ermittelt. Liegen Messergebnisse für die Gesamtkonstruktion aus einem Prüfstand vor, so beträgt die kombinierte Standardunsicherheit des prognostizierten Norm-Trittschallpegels 3,0 dB. Ergibt sich der Norm-Trittschallpegel dagegen aus der Kombination einer Deckenauflage mit einer Rohdecke, so liegt die Standardunsicherheit bei 4,8 dB.

Werden die Prognosen dagegen auf Bemessungskurven, z.B. Massekurven, aufgebaut, so steht die Frage, welche Unsicherheit den Bemessungskurven und vor allem Werten, die aus Bemessungskurven berechnet wurden, beizumessen sind. Die entsprechenden Prognosezweige in Bild 7 sind daher noch nicht mit Zahlenwerten versehen.

**DIN 4109: Unsicherheitsschema**



**Bild 7** Vorschlag für ein Konzept zur Berücksichtigung der Unsicherheiten bei Prognosen in der DIN 4109, Luft- und Trittschall im Vergleich