

Unsicherheit quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren:

Laufzeitmessung zur Bauteil-Dickenbestimmung

Dr.-Ing. Alexander Taffe

MU-Ermittlung – warum erforderlich?

► „Die Genauigkeit des Verfahrens beträgt $\pm 5\%$.“

Genauigkeit?
Richtigkeit?
Präzision?
Unsicherheit?

Einheitliche
Bezeichnungen

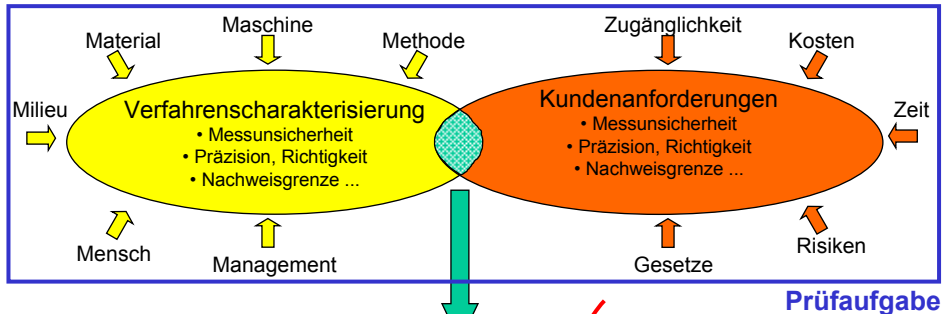
Messgerät?
Messprinzip?
Baustoff?
Bauteil?
Prüfer?

Einflussgrößen
identifizieren und
quantifizieren,
Budget

Standardabweichung?
Erweiterte
Messunsicherheit?
Vertrauensniveau?
Wiederholbedingungen?
Vergleichsbedingungen?

Richtige Bezeichnung,
Einheitliche
Vorgehensweise

MU als Teil der Validierung



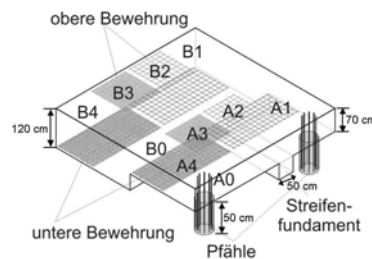
Nachweis: Kundenanforderung erfüllt ✓ **Validierung**

- Validierung steht am Ende des Prozesses zur Problemlösung.
- Eine Validierung gilt nur für eine bestimmte Prüfungsaufgabe unter bestimmten Randbedingungen.

Prüfungsaufgabe: Dickenmessung Fundament



- **Messung der Laufzeiten**
(Fundamentdicke d , Auswertungsmethode und Bewehrungsgehalt ρ)
- Ermittlung der **Schallgeschwindigkeit** und der zugehörigen Unsicherheit
- Ermittlung der **Fundamentdicke** und der zugehörigen Unsicherheit



Messobjekt: Fundament in Horstwalde vor Betonieren

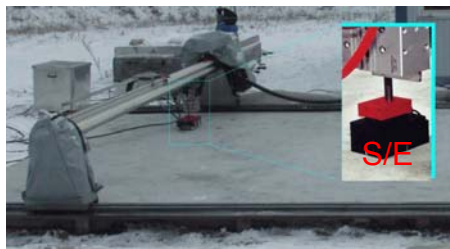
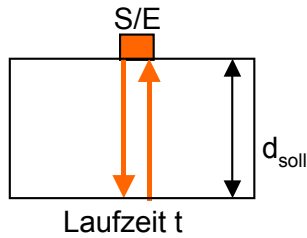


Dicke durch **Referenzstäbe** genau bekannt

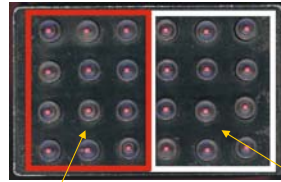


Verfahren: US-Echo mit Transversalwellen

Prinzip Laufzeitmessung:



US-Array A1220



Sendeeinheit:
12 Sender für
Transversalwellen

Empfangeinheit:
12 Empfänger für
Transversalwellen

Punkt-Kontakt-Prüfköpfe:

- Frequenz 25 kHz
- kein Koppelmittel
- Anregung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

Vorgehensweise, 1. Schritt

- 1. Schritt: Ermittlung der Schallgeschwindigkeit an Stelle(n) bekannter Dicke

„Kalibrierung“
der Schallgeschwindigkeit

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum \frac{2d_{ref}}{t_j}$$

Messgröße

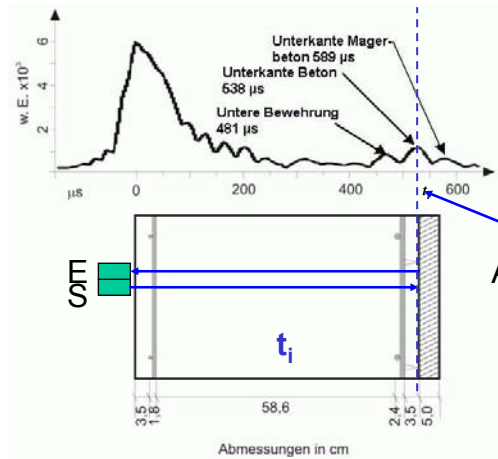
Dicke durch
Referenzstäbe mit geringer
Unsicherheit bekannt



Vorgehensweise, 2. Schritt



- 2. Schritt: Ermittlung der Bauteildicke



$$d_i = \bar{v} \cdot t_i / 2$$

Messgröße

Ablesung der Laufzeit t_i

Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren
VIII.2

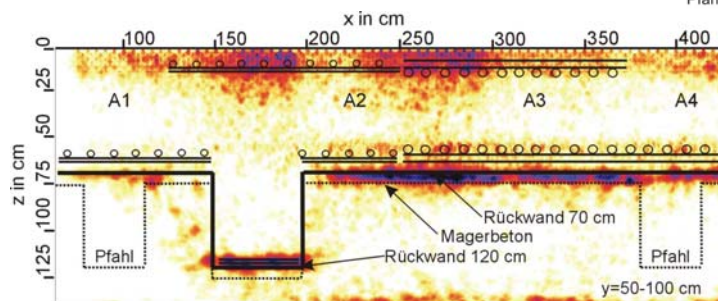
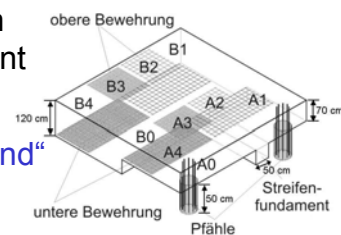
Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 7

Ergebnisse: Fundamentgeometrie



- Ergebnisse der US-Echo-Messungen als Längsschnitt durch das Fundament nach SAFT-Rekonstruktion
- Messunsicherheit als „unscharfes Band“ erkennbar

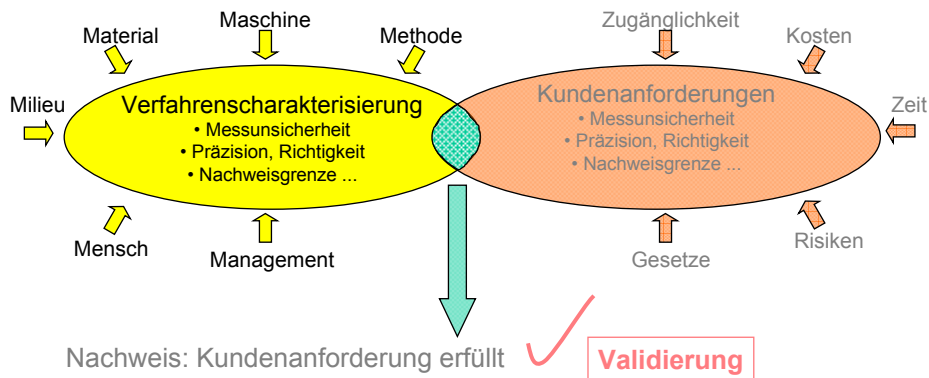


Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren
VIII.2

Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

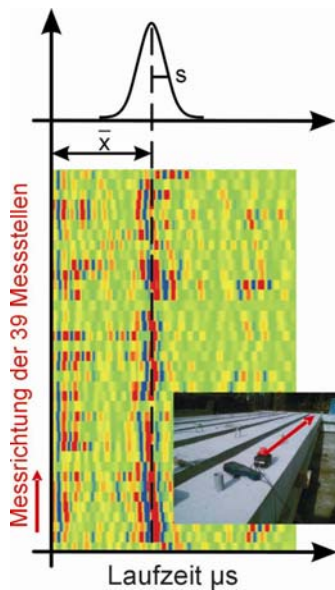
Folie 8

Verfahrenscharakterisierung



► Identifizieren und Quantifizieren von Einflussgrößen

Unsicherheit Messgerät / Messung



Streuung der Rückwandreflexion

- durch Streuung beim Messvorgang (Ankopplung)
- durch variierende Betonqualität infolge ungleichmäßiger Verdichtung
- durch unplanmäßige Dickenschwankungen des Bauteils

Taffe, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/2008

Messunsicherheit – heutige Praxis



- Aus den Messdaten wird nur die Gesamtstandardabweichung berechnet.
- Die Standardabweichung gilt nur für die vorhandenen Randbedingungen.
- Der Anteil einzelner Unsicherheitsbeiträge an der Gesamtunsicherheit ist unbekannt.

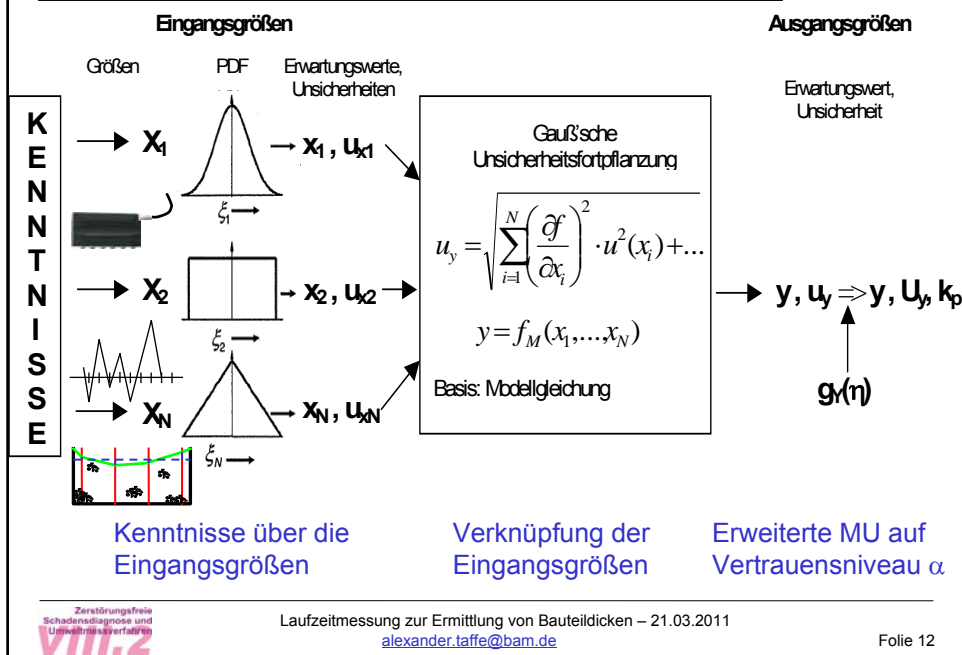
Es wird eine Methode benötigt, mit der

- einzelne Unsicherheitsbeiträge berücksichtigt werden.
- einzelne Unsicherheitsbeiträge quantifiziert werden können.
- mit der eine Gesamtunsicherheit bei abweichenden Randbedingungen berechnet werden kann.

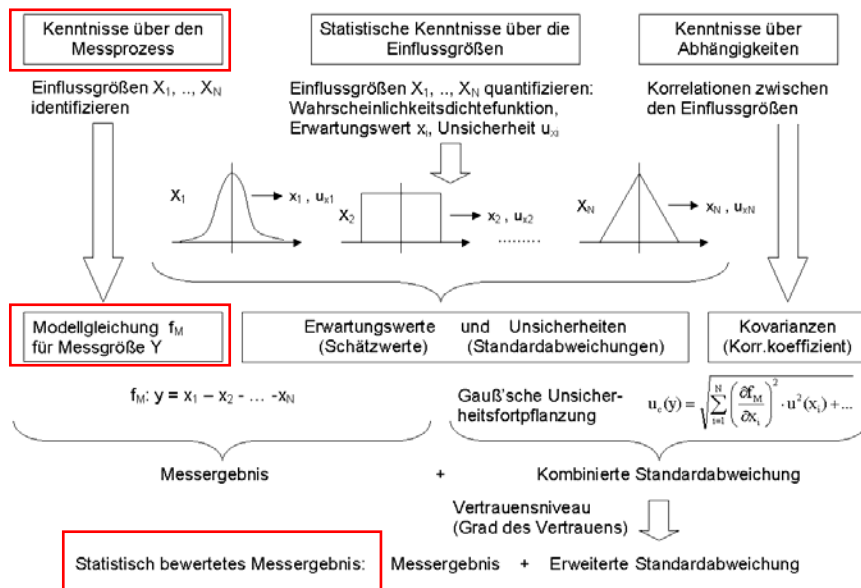
Der GUM stellt eine solche Methode zur Verfügung.

GUM: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; DIN V ENV 13005 DIN Taschenbuch 303

GUM-Schema nach Sommer



GUM-Schema nach Heft 574 DAfStb



Durchführung nach GUM



6-stufige Vorgehensweise:

1. Messprozess und Eingangsgrößen X_i beschreiben.
2. **Modellieren** der Messung (Modellgleichung)
3. Ermitteln der **Erwartungswerte** x_i und deren zugeordneten **Standardunsicherheiten** u_{xi}
(Berücksichtigung nur relevanter Eingangsgrößen)
4. **Kombinieren** der Erwartungswerte und Unsicherheiten und Berechnen von y und u_y
5. Berechnen der **erweiterten Messunsicherheit** U , k_p
6. Angeben und Bewerten des **Messergebnisses** $Y=y \pm U$

Allgemeine Modellgleichung



► Modellieren der Messung

Entwicklung der *allgemeinen Modellgleichung*

Berücksichtigung der identifizierten Einflussgrößen:

$$t_i = f(t) = t_{i,Anzeige} - \dots \quad \text{Messgröße} \neq \text{angezeigte Größe}$$

$$\dots - \Delta t_{\text{Vorlauf}} - \Delta t_{\text{AbstandSender/ Empfänger}} - \Delta t_{\text{FormänderungSignal}} - \dots$$

$$\dots - \sum_{j=1}^n \Delta t_{i,Ursache,systematisch,j} - \dots \quad \text{Systematische Abweichungen}$$

$$- \delta_{i,Messgerät} - \delta_{i,Zeitachse} - \delta_{i,Auswertung} - \delta_{i,Baustoff} - \delta_{i,Unebenheit} - \delta_{i,Rauigkeit} - \dots$$

$$- \sum_{k=1}^m \delta_{i,Ursache,zufällig,k} \quad \text{Zufällige Abweichungen}$$

Diese Gleichung kann auf Verfahren mit der Messgröße *Laufzeit* angewandt werden: **US, Low-Strain, Radar**

Ableitung der Messunsicherheit



► Kombinieren der Unsicherheiten

Anwendung der *Gauß'schen Unsicherheitsfortpflanzung* nach GUM:

$$u_c(t_{ges})^2 = \text{Aus Messungen bekannt (empirische Stabw.)}$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t_M}\right)^2 \cdot u(t_M)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_Z}\right)^2 \cdot u(t_Z)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_A}\right)^2 \cdot u(t_A)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_B}\right)^2 \cdot u(t_B)^2$$

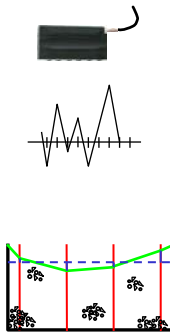
$$\dots + \left(\frac{\partial f}{\partial t_U}\right)^2 \cdot u(t_U)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t_R}\right)^2 \cdot u(t_R)^2 + \sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial t_k}\right)^2 \cdot u(t_k)^2 + \text{zu quantifizierende Unsicherheitsbeiträge}$$

$$\dots + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad \text{Korrelationen}$$

M = Messgerät; Z = Zeitachse; A = Auswertung; B = Baustoff;

U = Unebenheit; R = Rauigkeit

Quantifizierung der Einflussgrößen

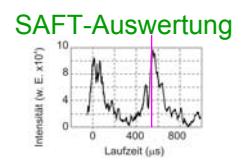
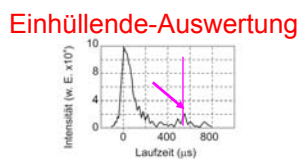
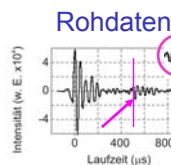


Einflussgröße	Standard-unsicherheit	Angenommene Verteilung
Unsicherheit des Messgeräts	$u_{t,M} = 2 \mu\text{s}$	Normalverteilung
Begrenzte Auflösung der Zeitachse	$u_{t,Z} = 1,7 \mu\text{s}$	Rechteckverteilung
Variierende Betonqualität	$u_{t,B} = 2,5 \mu\text{s}$ ($D=70\text{cm}$)	Normalverteilung
	$u_{t,B} = 10 \mu\text{s}$ ($D=120\text{cm}$)	Normalverteilung
Variierende Dicke des Bauteils	$u_{d,D} = 5 \text{ mm}$ ($u_{t,D} \cong 4 \mu\text{s}$)	Normal- und Rechteckverteilung

Quantifizierung der Einflussgrößen



Unsicherheit des Auswertungsalgorithmus	Unbewehrt	Ø12-15 unten	Ø28-10 unten	Ø12-15 unten und oben	Ø28-10 unten und oben
U_r Auswertung Rohdaten; D=70 cm	$\approx 0 \mu\text{s}$	24 μs	25 μs	26 μs	40 μs
Auswertung Rohdaten; D=120 cm	$\approx 0 \mu\text{s}$	14 μs	16 μs	15 μs	38 μs
Einhüllende-Auswertung D=70 cm	6 μs	12 μs	14 μs	9 μs	8 μs
Einhüllende-Auswertung D=120 cm	7 μs	10 μs	10 μs	19 μs	k.A.
SAFT-Auswertung D=70 cm	9 μs	5 μs	15 μs	9 μs	13 μs
SAFT-Auswertung D=120 cm	5 μs	10 μs	16 μs	15 μs	k.A.



Einsetzen der Einflussgrößen



➤ Kombinierte Standardunsicherheit Laufzeit

$$u_c(y_i)^2 = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t_M}\right)^2 \cdot u(t_M)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t_Z}\right)^2 \cdot u(t_Z)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t_A}\right)^2 \cdot u(t_A)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t_B}\right)^2 \cdot u(t_B)^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t_D}\right)^2 \cdot u(t_D)^2$$

$M =$ Messgerät; $Z =$ Zeitachse; $A =$ Auswertung; $B =$ Betonqualität; $D =$ Dickenschwankung

Für Kunden von Interesse

➤ Kombinierte Standardunsicherheit Schallgeschwindigkeit

$$u_c(y_v)^2 = \left(\frac{\partial f_2}{\partial t_M}\right)^2 \cdot u(t_M)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t_Z}\right)^2 \cdot u(t_Z)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t_A}\right)^2 \cdot u(t_A)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t_B}\right)^2 \cdot u(t_B)^2 + \dots$$

$$+ \left(\frac{\partial f_2}{\partial t_D}\right)^2 \cdot u(t_D)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial d_D}\right)^2 \cdot u(d_D)^2 + 2 \frac{\partial f_2}{\partial t_D} \frac{\partial f_2}{\partial d_D} u(t_D) \cdot u(d_D) \cdot r(u_{t,D}, u_{d,D})$$

➤ Kombinierte Standardunsicherheit Bauteildicke

$$u_c(y_d)^2 = \left(\frac{\partial f_3}{\partial \bar{v}}\right)^2 \cdot u(\bar{v})^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial t_M}\right)^2 \cdot u(t_M)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial t_Z}\right)^2 \cdot u(t_Z)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial t_A}\right)^2 \cdot u(t_A)^2 + \dots$$

$$+ \left(\frac{\partial f_3}{\partial t_B}\right)^2 \cdot u(t_B)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial t_D}\right)^2 \cdot u(t_D)^2 + 2 \sum_{i=1}^N \frac{\partial f_3}{\partial x_i} \frac{\partial f_3}{\partial \bar{v}} \cdot u(x_i) \cdot u(\bar{v}) \cdot r(x_i, \bar{v})$$

Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren
VIII.2

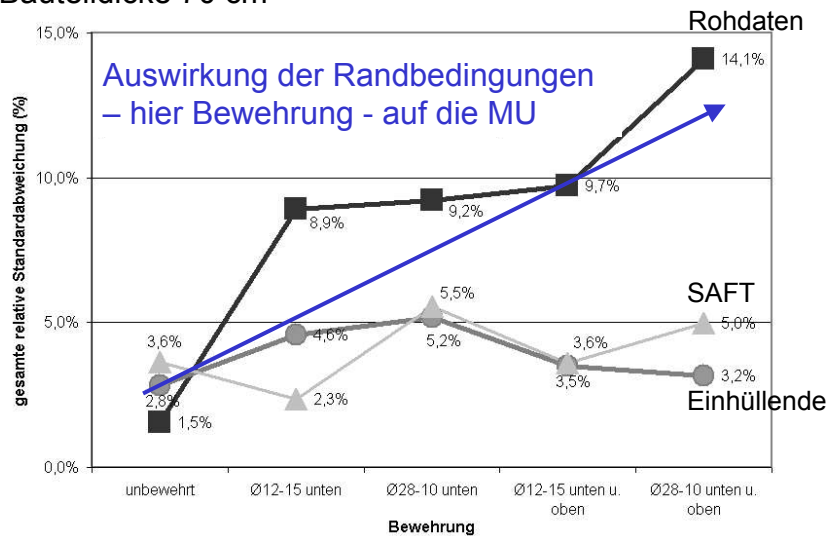
Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 19

Darstellung Gesamtunsicherheit Dicke



➤ Bauteildicke 70 cm



Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren
VIII.2

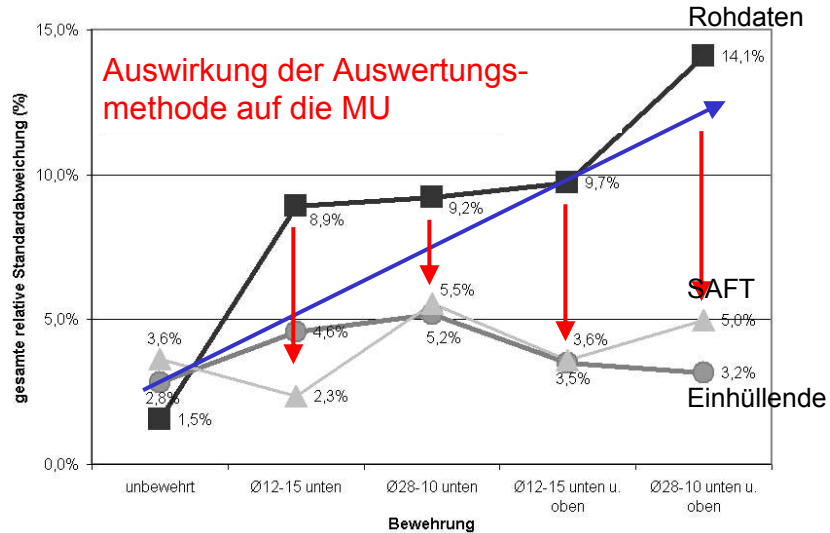
Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 20

Darstellung Gesamtunsicherheit Dicke



► Bauteildicke 70 cm



Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umwertungsverfahren
VIII.2

Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 21

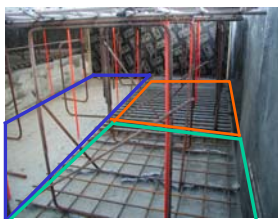
Messunsicherheit - anschaulich



Dicke 120 cm, SAFT-Auswertung

Unbewehrt:

95%-Vertrauensniveau:
 $d = 120 \pm 6$ cm



Bewehrter Bereich:
Ø28, 10cm Abstand,
obere und untere Lage

Keine zuverlässigen
Ergebnisse.

Bewehrter Bereich:
Ø12, 15 cm Abstand
Obere und untere Lage

95%-Vertrauensniveau:
 $d = 120 \pm 11$ cm

Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umwertungsverfahren
VIII.2

Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 22

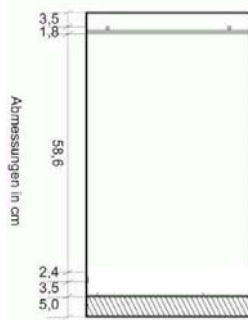
Unsicherheitsbudget: Rohdaten



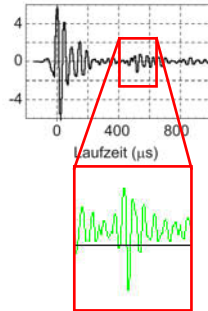
Bauteil:

Messergebnis:

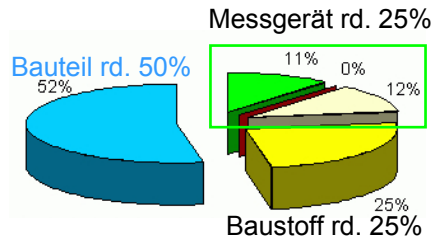
Unsicherheitsbudget:



D = 70 cm unbewehrt



Ablesung eindeutig



Stabw. Laufzeiten 5 µs (0,9%)
=> Sehr präzise

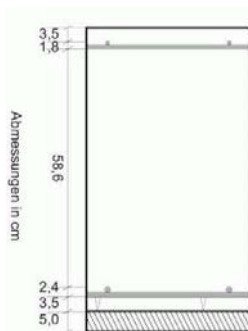
Unsicherheitsbudget: Rohdaten



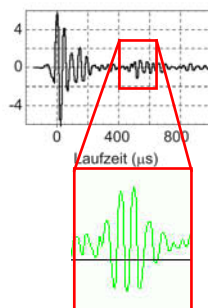
Bauteil:

Messergebnis:

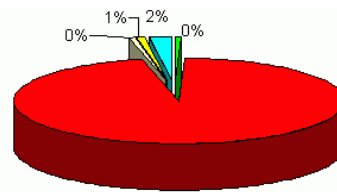
Unsicherheitsbudget:



D = 70 cm Unten bewehrt



Ablesung unsicher



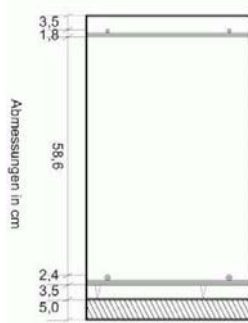
Stabw. Laufzeiten 24 µs (4,5%)
=> unpräzise

Unsicherheitsbudget: bearbeitete Daten

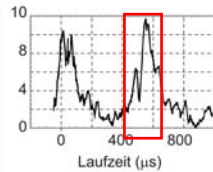
Bauteil:

Messergebnis:

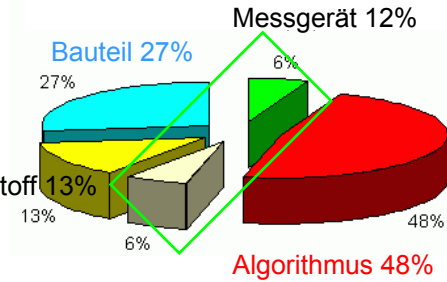
Unsicherheitsbudget:



D = 70 cm
Unten bewehrt



Ablese-
sicherheit
verbessert



Stabw. Laufzeiten 7 µs (1,3%)
=> Präzision verbessert

Praktischer Nutzen

- Kenntnisse über Einflussgrößen können einfach durch Statistik quantifiziert werden.
 - Diese Kenntnisse werden nach GUM einheitlich zur Gesamtunsicherheit kombiniert.
 - Ändern sich Randbedingungen, wird nur für die veränderten Einflussgrößen „nachvalidiert“.
 - Der Kunde erhält vorab die Einschätzung, ob Kundenanforderungen
 - **sicher erfüllt**
 - **möglicherweise erfüllt**
 - **sicher nicht erfüllt**
 werden.
- } Dazu bedarf es geeigneter Nachweise

Verbesserung durch Validierung



➤ ~~„Die Genauigkeit des Verfahrens beträgt $\pm 5\%$.“~~

➤ „Die erweiterte Messunsicherheit (95%-Niveau) der Bauteildicke mit einem Mittelwert von 70 cm beträgt $\pm 3,2$ cm.“

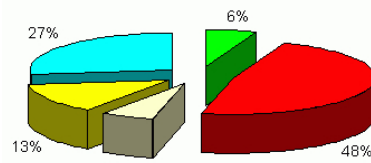
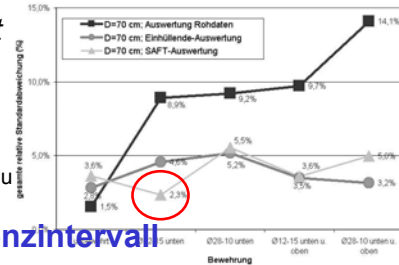
(US-Echo, Transversalwelle, Bewehrung $\varnothing 12-15$ u SAFT-Auswertung)

➔ **Belastbarkeit durch Konfidenzintervall**

Sie setzt sich zusammen aus:

- 48% Algorithmus (Bewehrung)
- 27% Dickenschwankung
- 13% Betonqualität
- 12% Messgerät

➔ **Transparenz durch Unsicherheitsbudget**



Standardabweichung der Laufzeiten: 6,7 μ s (1,3%)

Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren
VIII.2

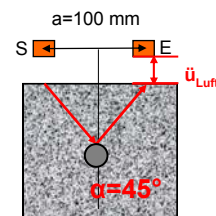
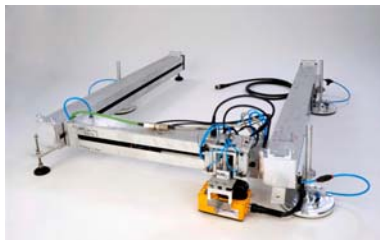
Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 27

Nachweis der Eignung von Verfahren



- Ist ein ZfPBau-Verfahren wie Radar zur Betondeckungsmessung geeignet?
- Wie stark wirken sich die Abweichungen aus der Entfernung Sender / Empfänger aus?
- Wie stark wirkt sich die variierende Größe des Luftspalts aus?

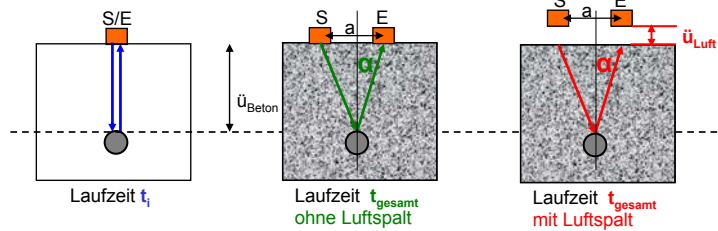


Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren
VIII.2

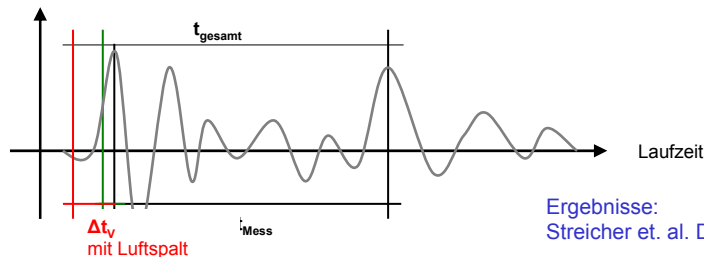
Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 28

Herleitung der Modellgleichung



$$\text{Laufzeit } t_i = t_{\text{gesamt}} \cdot \cos \alpha \quad \text{mit } \alpha = f(\epsilon_R, a, t_{\text{Mess}}, \Delta t_V)$$



Ergebnisse:
Streicher et. al. DGZfP 2010

Allgemeine Form der Modellgleichung



- Die allgemeine Modellgleichung berücksichtigt **systematische** und **zufällige** Abweichungen

$$t_i = f(t) = t_{i,\text{Anzeige}} - \dots \quad \text{Messgröße} \neq \text{angezeigte Größe}$$

$$\dots - \Delta t_{\text{Vorlauf}} - \Delta t_{\text{Abstand Sender / Empfänger}} - \Delta t_{\text{Formänderung Signal}} - \dots$$

$$\dots - \sum_{j=1}^n \Delta t_{i,\text{Ursache,systematisch},j} - \dots$$

Systematische Abweichungen

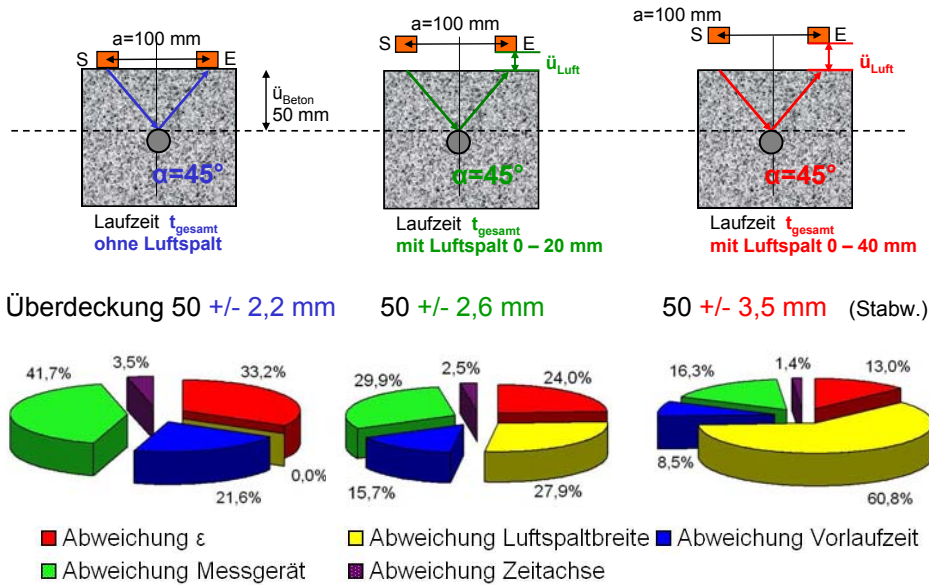
$$- \delta t_{i,\text{Messgerät}} - \delta t_{i,\text{Zeitachse}} - \delta t_{i,\text{Auswertung}} - \delta t_{i,\text{Baustoff}} - \delta t_{i,\text{Unebenheit}} - \delta t_{i,\text{Rauigkeit}} - \dots$$

$$- \sum_{k=1}^m \delta t_{i,\text{Ursache,zufällig},k}$$

Zufällige Abweichungen

Nach Heft 574 des DAfStb

Budget der Messunsicherheit (Radar)



Überdeckung 50 +/- 2,2 mm

50 +/- 2,6 mm

50 +/- 3,5 mm (Stabw.)

Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltprüfverfahren
VIII.2

Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 31

Zusammenfassung und Ausblick



- ▶ Allgemeine Vorgehensweise zur Validierung nach GUM-Ansatz erarbeitet (Heft 574 DfStb)
=> Übertragung auf andere ZfPBau-Verfahren
- ▶ Validierung für Laufzeitmessung mit Ultraschallecho und Low-Strain Verfahren durchgeführt (Heft 574 DfStb)
=> Durchführung für Radar (Diss. Streicher Uni SB/BAM)
- ▶ POD zur Quantifizierung der Güte qualitativer Verfahren
=> Bewehrungsdetektion mit Radar (Diss. Feistkorn TUB/BAM)



Zerstörungsfreie
Schadensdiagnose und
Umweltprüfverfahren
VIII.2

Laufzeitmessung zur Ermittlung von Bauteildicken – 21.03.2011
alexander.taffe@bam.de

Folie 32