# Die Anwendung der POD zum Nachweis der Güte zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen

Sascha FEISTKORN, (Sascha.Feistkorn@bam.de),
Alexander TAFFE, (Alexander.Taffe@bam.de),
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin

**Kurzfassung**. Der Nachweis der Güte von zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) ist neben der Kenntnis der Leistungsfähigkeit eine wichtige Grundlage für deren zunehmende Akzeptanz in der Baupraxis. Während die Ermittlung der Leistungsfähigkeit durch systematische Untersuchungen und Messunsicherheitsermittlung in der ZfP im Bauwesen zunehmend Verbreitung findet, ist der Einsatz der POD (Probability of Detection) im Bauwesen ganz im Gegensatz zur klassischen ZfP neu. In diesem Beitrag wird am Beispiel von Radarmessungen nachgewiesen, dass so genannte „a-versus-â-Beziehungen“ auch in der ZfPBau aufgestellt werden können und diese zu sinnvollen POD-Kurven führen. Dadurch wird es künftig möglich sein, Geräte oder Auswertungsalgorithmen nach festgelegter Vorgehensweise zu testen und deren Güte durch Kennwerte der POD-Analyse objektiv und quantitativ zu vergleichen.

## Einführung

Die Güte von klassischen zerstörungsfreien Prüfverfahren wird in der Luftfahrt und im kerntechnischen Bereich durch Anwendung der POD (Probability of Detection) nachgewiesen. Durch diese Vorgehensweise können Geräte, Verfahren und Auswertungsmethoden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Detektion von Fehlstellen untereinander verglichen werden. Bei der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) wird diese Verfahrensweise zum Nachweis der Güte von Verfahren derzeit noch nicht angewendet. In diesem Beitrag wird die klassische Vorgehensweise nach dem Berens-Report [1] zur Ermittlung von POD-Kurven erstmals auf die Untersuchung von *Betonbauteilen mit Radar* angewandt. Zunächst wird eine geeignete „a-versus-â-Beziehung“ ermittelt, um die Grundlagen für die Erstellung einer POD-Kurve zu erfüllen. Diese Wertepaare (a; â) bilden das Fundament der POD-Kurven und dienen dazu, zerstörungsfreie Prüfsysteme im Bauwesen erstmals *objektiv* hinsichtlich Ihrer Detektionstiefe zu charakterisieren und miteinander zu vergleichen sowie signifikante Einflussgrößen auf die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ zu quantifizieren. Dazu werden Testkörperserien erstellt, die eine geeignete Variation der betrachteten Einflussgrößen aufweisen, wobei immer nur ein Parameter variiert wird. Dieses faktorielle „Design of Experiment“ erweist sich bei mehr als fünf Einflussfaktoren und bei unbekannten Auswirkungen dieser Faktoren als sinnvoll [2].
Mit dieser Vorgehensweise ist erstmals eine objektive Aussage zur Güte zerstörungsfreier Prüfverfahren sowie ein objektiver Vergleich unterschiedlicher Prüfsysteme hinsichtlich Ihrer zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$ möglich.
Somit bildet die Dissertation die Grundlage, die Validierung quantitativer Prüfaufgaben, wie sie in Heft 574 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton dokumentiert ist [4], auf qualitative Prüfaufgaben zu übertragen, die sich mit den Aussagen „Reflektoren vorhanden/nicht vorhanden“ befassen.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

## 1 Vorüberlegung zur Übertragung der POD auf die ZfP im Bauwesen

Die Güte einer Messung wurde bislang nur für *quantitative* Prüfaufgaben (Wie lang? Wie tief?) durch die Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM [5] ermittelt. Beispiele für Fundamentdickenmessung sind in [6] und [7] dokumentiert.
Die Ermittlung der Güte von *qualitativen* Prüfaufgaben (Fehlstelle ja/nein?) erfolgt in der klassischen ZfP mittels POD und ROC [8]. Mit der Vorgehensweise der POD wird hierbei eine objektive Aussage über die Auffindungswahrscheinlichkeit einer Fehlstelle in Abhängigkeit Ihrer Defektgröße getroffen. Da die Auffindungswahrscheinlichkeit einer Fehlstelle maßgeblich von Ihrer Defektgröße abhängt, nimmt mit zunehmender Defektgröße auch die Wahrscheinlichkeit der Detektion dieser Fehlstelle zu. Diese Vorgehensweise soll im Rahmen einer Dissertation auf die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Radarverfahrens übertragen und in diesem Artikel vorgestellt werden. Hierbei wird die Auffindungswahrscheinlichkeit eines Reflektors in Abhängigkeit seiner *Tiefenlage* untersucht, um so eine objektive Aussage zur zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$ treffen zu können. Sollte die Übertragung der Vorgehensweise gelingen, wäre in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen erstmals eine Qualitätsbeurteilung von Prüfsystemen möglich. Im zweiten Schritt können dann Prüfsysteme miteinander verglichen werden. Zusätzlich ist es möglich, die maßgeblichen Einflussgrößen (u. a. Prüfsystem, Auswertung, Aushärtung des Betons, Größtkorn etc.) auf die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ erstmals zu quantifizieren.
Um die POD auf die ZfP im Bauwesen übertragen zu können, ist eine geeignete Beziehung zwischen der Reflektortiefe a [mm] und der Signalantwort des Prüfsystems â notwendig. Eine lineare Abhängigkeit, die gegebenenfalls durch ein Logarithmieren erzeugt werden kann, ist die Grundvoraussetzung für die Anwendung der POD:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \varepsilon$$

mit

| | | |
|---|---|---|
| $X$ | variierte Einflussgröße: | Reflektortiefe a oder ln(a) [mm] |
| $Y$ | abhängige Messgröße: | Prüfsystemantwort â oder ln(â) |
| $\beta_0$ | Achsenabschnitt des linearen Zusammenhangs zwischen $X$ und $Y$ | |
| $\beta_1$ | Steigung des linearen Zusammenhangs zwischen $X$ und $Y$ | |
| $\varepsilon$ | Abweichungen mit dem Erwartungswert 0 | |

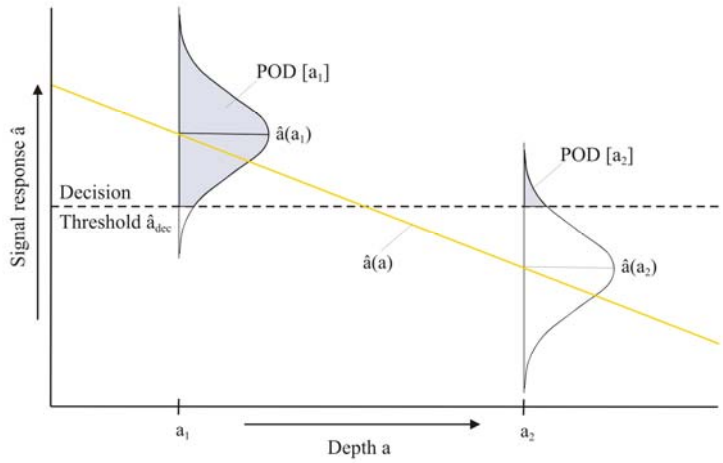



**Abbildung 1: Darstellung einer notwendigen linearen â vs. a Beziehung als Voraussetzung für die Anwendung der POD; in Anlehnung an [1]**

Diese Korrelation muss linear und eindeutig sein, sodass einer Reflektortiefe a nur eine Prüfsystemantwort â mit Ihrer zugehörigen Varianz zugeordnet sein darf. Dieser notwendige Zusammenhang zwischen Reflektortiefe a und Prüfsystemantwort â existiert bei Verwendung der Signalamplituden im Scheitelpunkt der Reflexionshyperbeln als Prüfsystemantwort â. Die Gerade mit den geringsten Abweichungen wird mithilfe des statistischen Analyseverfahrens der einfachen linearen Regression bestimmt.

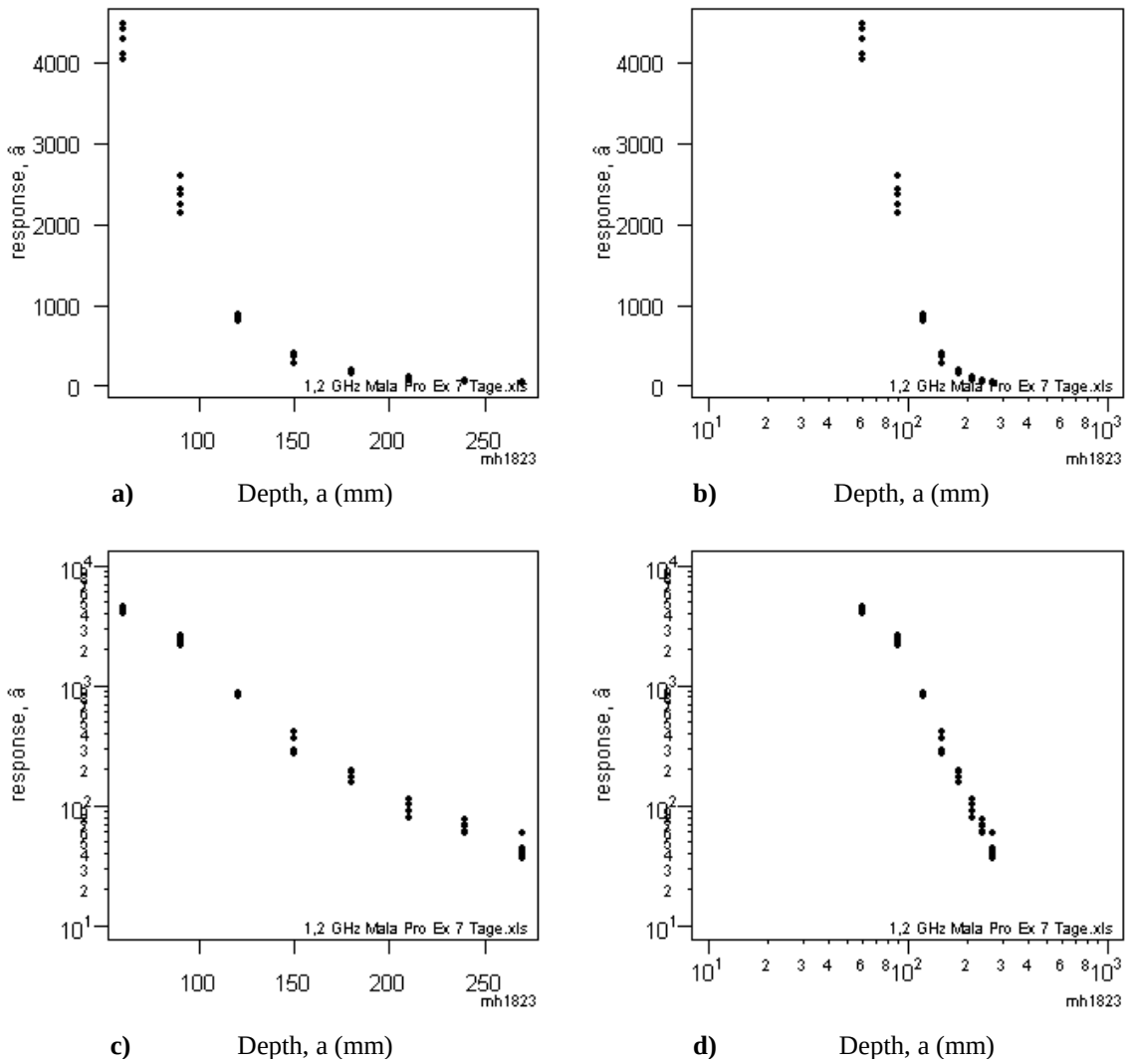



**Abbildung 2:** **Messdaten des Mala Pro Ex Radarsystems mit 1,2 GHz Antenne; Betonalter 7 Tage Zusammenhang zwischen**
**a) Reflektortiefe <u>a</u> und Prüfsystemantwort <u>â</u>**
**b) Reflektortiefe <u>ln(a)</u> und Prüfsystemantwort <u>â</u>**
**c) Reflektortiefe <u>a</u> und Prüfsystemantwort <u>ln(â)</u>**
**d) Reflektortiefe <u>ln(a)</u> und Prüfsystemantwort <u>ln(â)</u>**

In Abbildung 2 sind die vier möglichen Zusammenhänge zwischen der Reflektortiefe a und der Systemantwort â dargestellt. In dieser Abbildung wird deutlich, dass eine Gegenüberstellung von *a vs. ln(â)* den besten *linearen* Zusammenhang für die Erstellung einer POD-Kurve liefert und deshalb als Grundlage für die Erstellung einer POD-Kurve herangezogen wird.

Nachdem eine eindeutige Korrelation zwischen Reflektortiefe a und Prüfsystemantwort â nachgewiesen wurde, werden sinnvolle Testkörper konzipiert, die eine geeignete Abstufung der Reflektortiefen a und darüber hinaus die Verfahrensgrenzen der einzelnen Prüfsysteme beinhalten. Zusätzlich müssen Randeffekte sowie Überlagerungen von Hyperbeln werden als auch Bereiche für die Aufzeichnung des Rauschens integriert werden. Eine genügend große Messfläche muss vorliegen, um das heterogene Gefüge des Betons und die daraus resultierenden Streuungen in den Amplitudenwerten der Reflektoren in mehreren Messspuren erfassen zu können. Für eine aussagekräftige POD-Kurve werden 40 Wertepaare (a, â) empfohlen [3], so dass die Testkörper so gestaltet werden, dass auf jeder Seitenfläche der Testkörper mindestens 5 Messspuren aufgezeichnet werden können, um bei schon 8 Reflektoren die empfohlene minimale Wertepaaranzahl für die Erstellung einer POD-Kurve erzielen zu können. Aus diesen Vorüberlegungen wurden zwei Betonreferenztestkörper entwickelt, die in definierten Tiefen metallische Reflektoren in Form von Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 12 mm enthalten (siehe Abbildung 3).

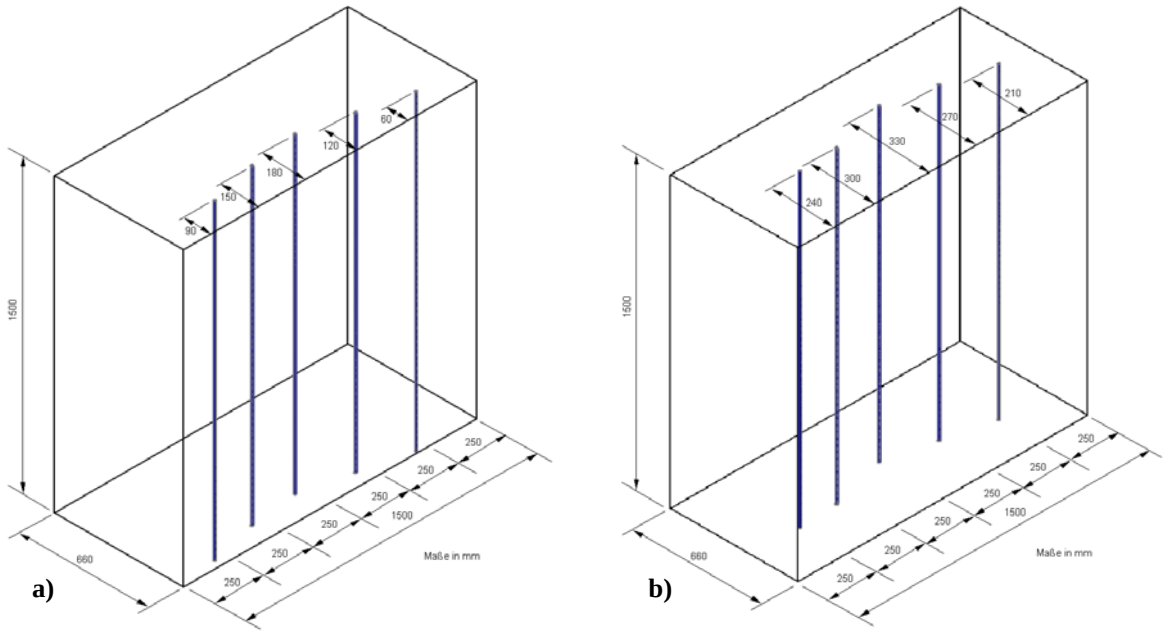



**Abbildung 3: Referenztestkörper für die Bestimmung der zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$**
**a) Reflektortiefen von 60 mm – 180 mm und 480 mm – 600 mm**
**b) Reflektortiefen von 210 mm – 330 mm und 330 mm – 450 mm**

An den erstellten Referenztestkörpern werden festgelegte Messspuren in definierten Zeitabständen und Richtungen aufgezeichnet, um die Einflussgrößen „Betonerhärtung“ und „Polarisation“ zusätzlich zu erfassen. In erster Auswertung soll anhand der Daten bei erfolgreicher Übertragung der Vorgehensweise der POD auf die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen jedes Prüfsystem hinsichtlich der zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$ charakterisiert werden und ein Vergleich der Prüfsysteme erfolgen.
Die Messdatenaufnahme erfolgt mit jedem Prüfsystem ohne Verstärkung und Filterung, sodass die für einen aussagekräftigen Vergleich erforderlichen Messrohdaten zu Verfügung stehen. Jedoch müssen systematische Abweichungen wie z. B. das Nachschwingen einer Antenne, das sich in horizontalen Reflexionshorizonten darstellt (siehe Abbildung 5), entfernt werden, damit die POD-Kurve keine Charakterisierung einer speziellen Antenne darstellt.
Für die Bearbeitung der Messdaten wurde die Datenbearbeitungs- und Interpretationssoftware Reflexw Version 5.0.8 von K. J. Sandmeier verwendet.

Eine genaue Betrachtung erfordert die Ermittlung des Entscheidungsschwellwertes $\hat{a}_{dec}$. (Abbildung 1) Liegt eine Signalantwort des Prüfsystems $\hat{a}$ oberhalb des Entscheidungsschwellwertes $\hat{a}_{dec}$, wird die Signalantwort des Prüfsystems einem Reflektor zugeordnet. Ist die Signalantwort des Prüfsystems $\hat{a}$ kleiner als der Entscheidungsschwellwert $\hat{a}_{dec}$, wird die Signalamplitude dem Rauschen zugewiesen. Um einen sinnvollen Entscheidungsschwellwert $\hat{a}_{dec}$ zu bestimmen, wird bei jeder Messdatenaufnahme zusätzlich das Rauschen in den rückseitigen, reflektorfreien Bereichen des ersten Referenztestkörpers zeitgesteuert aufgezeichnet. Die Rauschaufnahme erfolgt zeitgesteuert an 10 Messpunkten, um zusätzlich zum elektronischen Rauschen des Prüfsystems das Kornrauschen, das als quasi-zufällig durch nicht reproduzierbare Messspuren bezeichnet werden kann, zu ermitteln. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Schwellwertermittlung $\hat{a}_{dec}$ mittels ROC (Receiver Operating Characteristic) wird der Rauschverteilung jedoch nicht die Signalverteilung gegenübergestellt. Dies liegt darin begründet, dass sich als Grundvoraussetzung für die Erstellung der POD-Kurve die Signalantworten $\hat{a}$ des Prüfsystems mit jeder Reflektortiefe a ändern müssen. Deshalb verschiebt sich die Signalverteilung in Abhängigkeit der Reflektortiefe a, wogegen die Rauschverteilung unabhängig von der Tiefe konstant bleibt (siehe Abbildung 4). Die Anwendung der ROC würde aus diesen Gründen für jede Tiefenlage a des Reflektors einen Entscheidungsschwellwert $\hat{a}_{dec}$ erfordern und ist somit für die gewählte Vorgehensweise nicht zielführend.

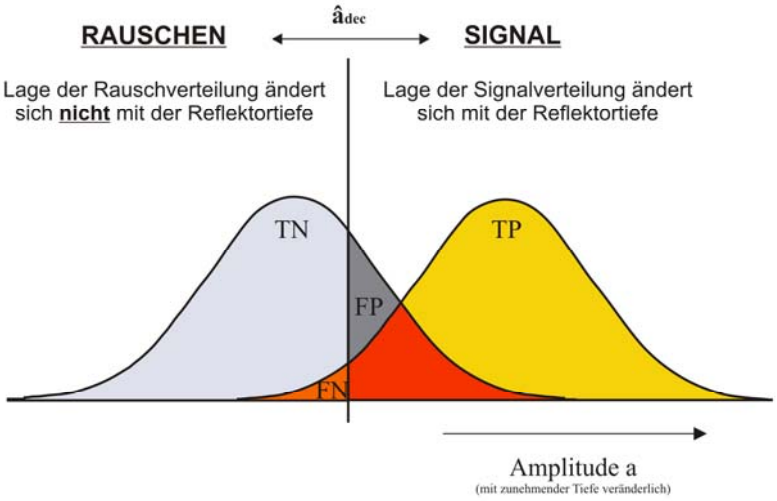
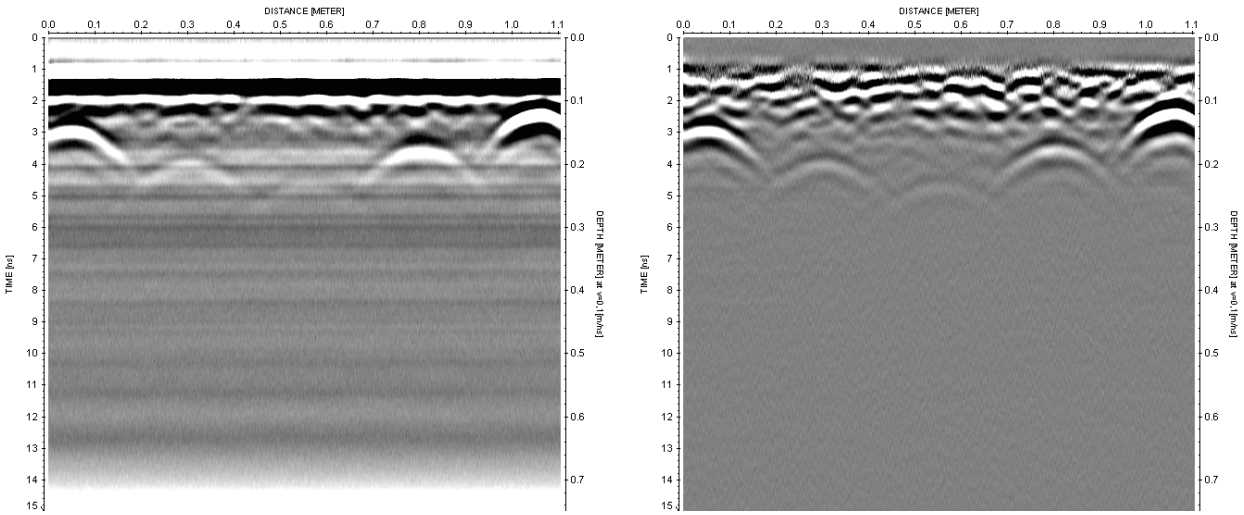



**Abbildung 4: Problem der Anwendung der ROC: für jeder Reflektortiefe a muss ein Entscheidungsschwellwert $\hat{a}_{dec}$ erstellt werden**

Der Entscheidungsschwellwert $\hat{a}_{dec}$ wird deshalb unabhängig von den Signalamplituden so festgelegt, dass 95 % der Rauschamplituden unterhalb der Entscheidungsschwelle $\hat{a}_{dec}$ liegen müssen, so dass eine sinnvolle Falschalarmrate (false positive) von 5 % vorliegt.
Für die Erstellung der POD-Kurven wurde auf die Software „mh1823 POD“, die auf der Programmiersprache R basiert, zurückgegriffen. Die Richtigkeit dieser Software wurde vor Ihrer Anwendung an einem Beispieldatensatz aus [1] verifiziert.

## 2 Übertragung der POD Analyse auf die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen am Beispiel eines Vergleichs zweier verschiedener Prüfsysteme

Zur Erstellung der POD-Kurven für die Ermittlung der zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$ von metallischen Reflektoren unter Anwendung von verschiedenen Radarsystemen wurden in Kapitel 1 Vorüberlegungen getroffen, die in diesem Kapitel am Beispiel eines Antennenvergleichs angewendet werden.
In einem Betonalter von 7 Tagen wurden an beiden Referenztestkörpern Messungen mit zwei verschiedenen Radarprüfsystemen (GSSI SIR 20 mit 1,5 GHz Antenne vs. MALA Pro Ex mit 1,2 GHz Antenne) durchgeführt. Für die Charakterisierung dieser Prüfsysteme und einen anschließenden Vergleich werden auf Grundlage der in Kapitel 1 beschriebenen Erläuterungen POD-Kurven für die Ermittlung der zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$ erstellt.
Dazu wurden mit beiden Prüfsystemen jeweils 5 horizontale Messspuren auf den Testkörperseiten mit den geringsten Reflektortiefen durchgeführt. Die aufgenommenen Messspuren weisen wie beschrieben systematische Abweichungen auf, die vor der Ermittlung der Signalantwort â des Prüfsystems eliminiert werden müssen. Systematische Abweichungen, die zu entfernen sind, bestehen sowohl in Messrichtung als auch in Tiefenrichtung in einer konstanten Signalverschiebung und sind in Abbildung 5 dargestellt.




**a)** **b)**

**Abbildung 5: Radargramm des Prüfsystems GSSI SIR 20 mit 1,5 GHz Antenne, Betonalter 7 Tage**
**a) mit systematischen Messabweichungen (horizontale Reflexionshorizonte)**
**b) ohne systematischen Messabweichungen (Reflexionshorizonte eliminiert)**

Zu einer Bereinigung der Messdaten werden alle aufgenommenen Messspuren der gleichen Korrektur unterzogen, die ein Entfernen der systematischen Messabweichungen beinhalten. Mit den Algorithmen „subtract DC-Shift“ und „subtract mean“ der Reflexw Software werden sowohl konstante Signalverschiebungen in Tiefenrichtung als auch die über das gesamte Radargramm verlaufenden Reflexionshorizonte entfernt. Dies wird im Vergleich von Abbildung 5a) zu Abbildung 5b) deutlich.
Die nun vorliegenden Radargramme beinhalten die notwendigen Signalantworten â der Prüfsysteme. Diese Signalantworten â in Form von Signalamplituden können durch die genau bekannte geometrische Lage der Reflektoren ermittelt werden. Dazu werden die positiven Signalamplituden â in den Scheitelpunkten der Reflexionshyperbeln ausgelesen und den jeweils bekannten Reflektortiefen a zugeordnet. Der erzeugte Datensatz wird der

Auswertesoftware „mh1823 POD“ übergeben. Zusätzlich wird wie in Kapitel 1 beschrieben der Entscheidungsschwellwert $\hat{a}_{dec}$ durch Analyse der Rauschmessungen ermittelt und festgelegt. Es erfolgt keine Beschränkung der Messdaten durch eine obere (Sättigungsschwelle $\hat{a}_{sat}$) oder untere (Reizschwelle $\hat{a}_{th}$) Zensierung der Messdaten, da weder die maximale noch die minimale Systemantwort des Prüfsystems bei der Aufzeichnung der Prüfsystemantworten $\hat{a}$ erreicht wird.
In Abbildung 6 sind beispielhaft aufgezeichnete Radargramme der Prüfsysteme Mala Pro Ex mit 1,2 GHz Antenne und GSSI SIR 20 mit 1,5 GHz Antenne dargestellt. Abbildung 7 stellt die Weibull Verteilung des Rauschens beider Prüfsysteme mit der 95 % Fraktile dar, die die Grundlage für die Ermittlung der Entscheidungsschwelle $\hat{a}_{dec}$ bildet. Diese Verteilung wurde angenommen, da die Rauschverteilung im Vergleich mit weiteren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (z. B. Gauß, Exponential, Lognormal) durch diese Verteilung am besten dargestellt wird. Die getroffene Annahme wird zusätzlich in [9] bestätigt.

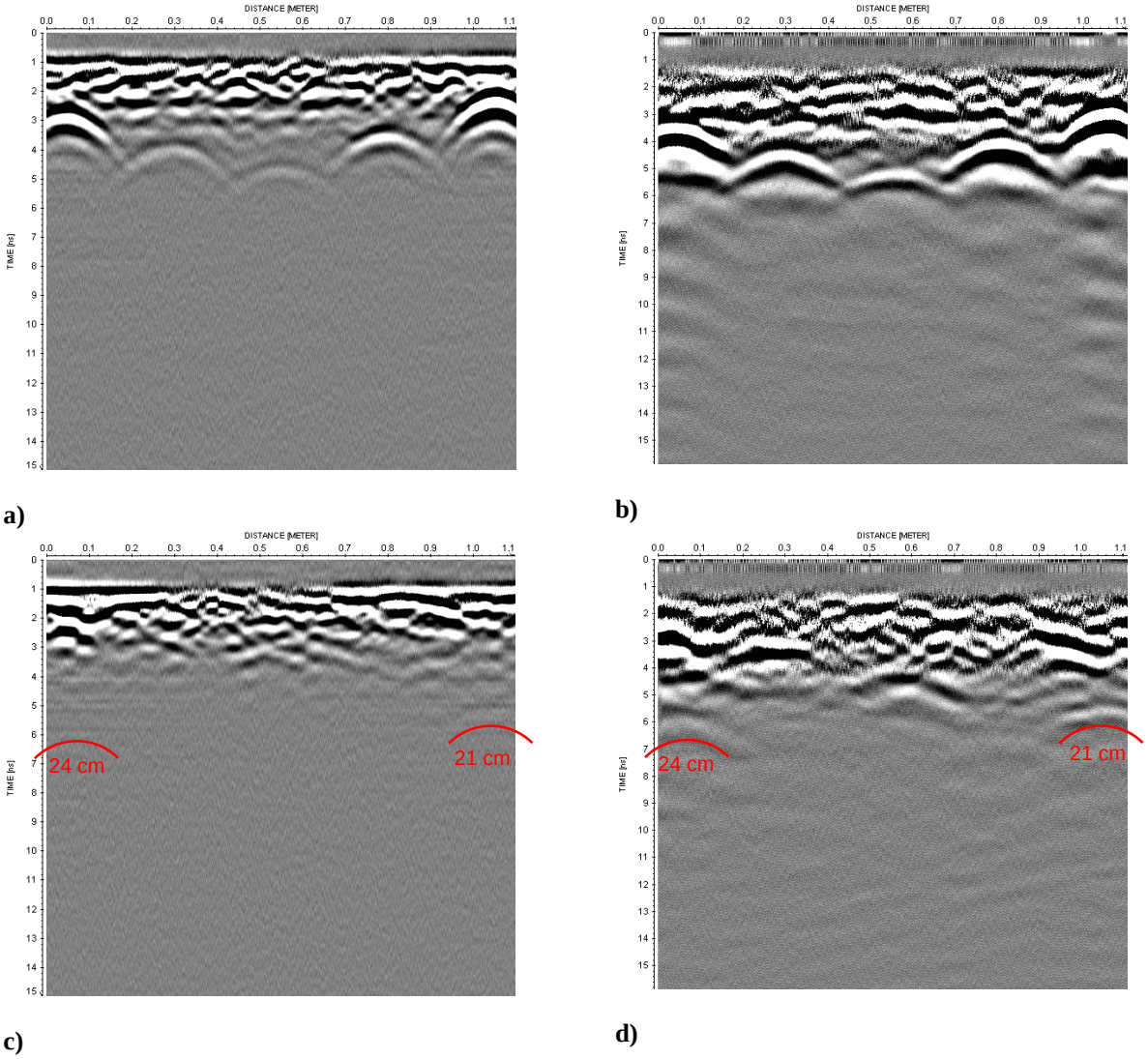
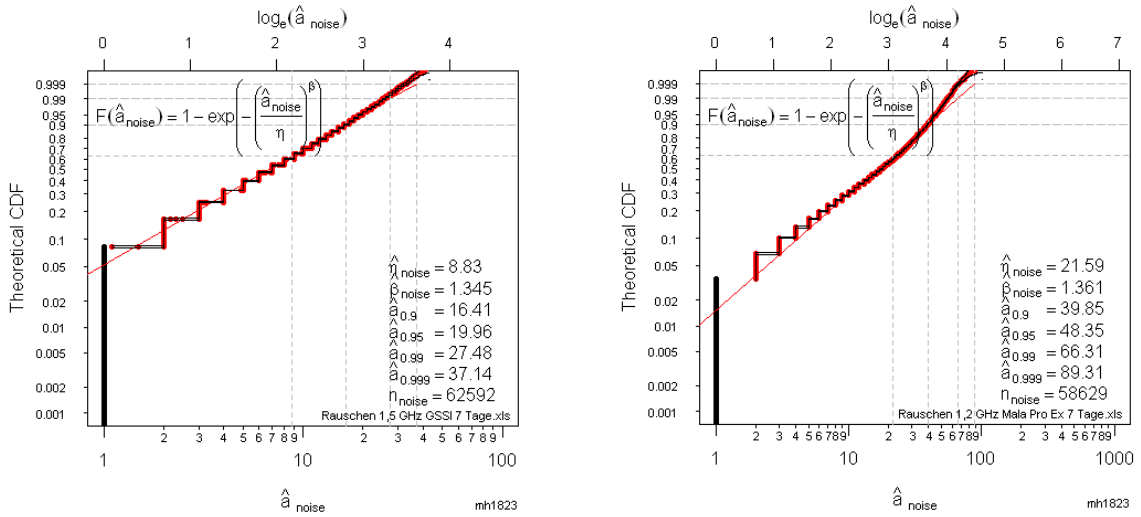



**Abbildung 6:** **horizontal aufgenommene Radargramme mit gleicher Verstärkung; Betonalter 7 Tage**
**a) GSSI SIR 20 1,5 GHz in Reflektortiefen von 6 -18 cm**
**b) MALA Pro Ex 1,2 GHz in Reflektortiefen von 6 – 18 cm**
**c) GSSI SIR 20 1,5 GHz in Reflektortiefen von 21 – 33 cm**
**d) MALA Pro Ex 1,2 GHz in Reflektortiefen von 21 – 33 cm**

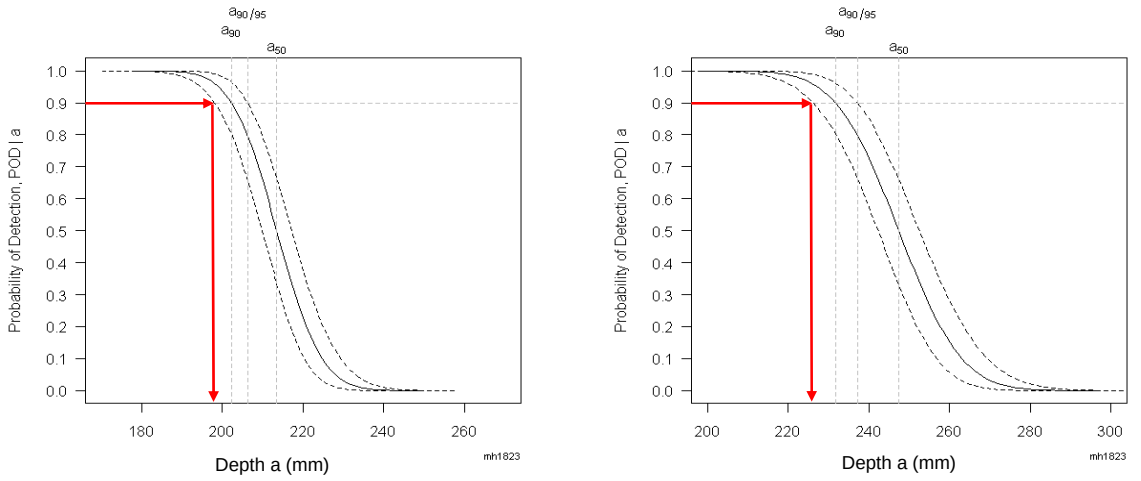



a) b)

**Abbildung 7: kumulative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Weibull-Verteilung**
**a) Rauschen GSSI SIR 20 1,5 GHz Antenne mit $\hat{a}_{noise95}$=20**
**b) Rauschen MALA Pro Ex 1,2 GHz Antenne mit $\hat{a}_{noise95}$=49**

## 3 Ergebnisse der POD Analyse

Der subjektive Eindruck, dass die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ des Prüfsystems MALA Pro Ex 1,2 GHz größer ist als die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ des Prüfsystems GSSI SIR 20 1,5 GHz, wird mit den erzeugten POD-Kurven in Abbildung 8 bestätigt. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da mit einer niederfrequenten Antenne eine größere zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ erreicht wird. Zugleich wird deutlich, dass das Prüfsystem GSSI SIR 20 1,5 GHz eine steilere POD-Kurve liefert, sodass die Trennschärfe zwischen Signal- und Rauschamplituden dieses Prüfsystems im Vergleich zum Prüfsystem MALA Pro Ex 1,2 GHz ausgeprägter ist. Aufgrund der geringeren Trennschärfe des Prüfsystems MALA Pro Ex 1,2 GHz ergeben sich auch breitere Bänder des 95 %-Vertrauensniveaus.




a) b)

**Abbildung 8: POD-Kurven für zwei verschiedene Prüfsysteme; Betonalter 7 Tage**
**a) GSSI SIR 20 1,5 GHz mit einer zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$=198,1 mm**
**b) MALA Pro Ex 1,2 GHz mit einer zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$=226,2 mm**

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die POD kann als eine Vorgehensweise zum Gütenachweis zerstörungsfreier Prüfverfahren angewendet werden und liefert eine objektive Aussage in Form einer zuverlässigen Detektionstiefe $a_{90/95}$. Da die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ nur aus den Signalamplituden in den Scheitelpunkten der Reflexionshyperbeln bestimmt wird, wird die Form der Reflexionshyperbel, die dem menschlichen Betrachter das Auffinden von Reflektoren erleichtert, bei der Erstellung der POD-Kurven nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wird die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ zur sicheren Seite hin abgeschätzt. Somit kann eine objektive Charakterisierung unterschiedlicher Prüfsysteme in Bezug auf Ihre zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ erfolgen. Zusätzlich kann aus der Steilheit der POD-Kurve eine Aussage zur Trennschärfe des Prüfsystems gezogen werden. Dadurch ist es möglich, verschiedene Prüfsysteme miteinander zu vergleichen. Parallel werden Untersuchungen durchgeführt, die die Auswirkung signifikanter Einflussgrößen auf die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ quantifizieren. Dazu wird unter Verwendung eines faktoriellen Versuchsplanes eine Testkörperserie erstellt, die folgende Einflussgrößen auf die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ von metallischen Reflektoren methodisch untersucht:

| **Einflussgrößen Prüfsystem** | **Einflussgrößen Testkörper** |
|---|---|
| - Prüfsystem | - Aushärtung |
| - Antenne | - Größtkorn |
| - Polarisation der Antenne | - Reflektordurchmesser |
| - Auswertung | - Oberflächennahe Bewehrung |

Durch die genau festgelegte Verfahrensweise unter jeweils nur einer geänderten Randbedingung kann deshalb der Einfluss auf die zuverlässige Detektionstiefe $a_{90/95}$ jeder Einflussgröße direkt und präzise quantifiziert werden.

## Referenzen


[1] Berens, A. P.: NDE Reliability Analysis, Reprinted from METALS HANDBOOK® Volume 17, 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control, University of Dayton Research Institute, 1989

[2] Kleppmann, W.; Taschenbuch Versuchsplanung, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2009

[3] Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823A, 7. April 2009, Department of Defence, S. 15-20

[4] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth Verlag Berlin, Heft 574 (Dissertation RWTH Aachen, 2008)

[5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth-Verlag, Berlin (1995)

[6] Taffe, A. and H. Wiggenhauser: Validation for Thickness Measurement in Civil Engineering with Ultrasonic Echo , In: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, Th. 2.5.3

[7] Taffe, A.: Dickenmessung von Fundamenten und Ermittlung der Messunsicherheit in Bergmeister, K. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 12, S. 573-581

[8] Müller, C., Scharmach, M., Gaal, M., Guelle, D., Lewis, A. und A. Sieber: Performance demonstration for humanitarian demining, in: MP Materialprüfung, Jahrg. 45 (2003) Heft 11-12, S. 504-512

[9] Schickert, M.: Tiefenausgleich verrauschter Ultraschallbilder, in: DGZFP-Jahrestagung 2003; 26.-28. Mai, 2003, Mainz: DGZFP, BB 83-CD