

# Lasst uns mal POD standardisieren!

Daniel KANZLER<sup>1</sup>, Vamsi Krishna RENTALA<sup>1</sup>, Marija BERTOVIĆ<sup>2</sup>,  
Thomas HECKEL<sup>2</sup>, Viktoriya TKACHENKO<sup>2</sup>, Joseph GIVEN<sup>2</sup>, Sylvia KEBLER<sup>3</sup>,  
Fabian DETHOF<sup>3</sup>, Anne JÜNGERT<sup>4</sup>, Johannes VRANA<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Applied Validation of NDT, Malplaquetstrasse 14a, Berlin

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung, Berlin

<sup>3</sup> Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg

<sup>4</sup> Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

<sup>5</sup> Vrana GmbH, Rimsting

Kontakt E-Mail: KanzlerD@av-ndt.com

**Kurzfassung.** Seit beinahe 50 Jahren werden Zuverlässigkeitsbewertungen zerstörungsfreier Prüfverfahren erfolgreich in unterschiedlichen Industriebranchen eingesetzt. Dennoch gibt es weiterhin viele Vorbehalte, da die Bewertungsgrundlage nicht standardisiert ist und konkrete Handlungsanweisungen fehlen. Dem gegenüber steht die Anerkennung in der ZfP-Community. Es ist bisher nur Wenigen bekannt, dass dem Wissen über die Zuverlässigkeit eines zerstörungsfreien Prüfverfahren eine Schlüsselfunktion für die ZfP 4.0 zukommt.

Im Vortrag wird die Notwendigkeit für eine Norm oder eine Richtlinie zum Thema Zuverlässigkeitsbewertungen aufgezeigt. Es wird darauf eingegangen, warum es bisher (in Deutschland) noch keine Richtlinie gab und gibt und was der:die Anwender:innen aus einer Richtlinie zur Zuverlässigkeitsbewertung von ZfP-Prüfverfahren erwarten kann.

Es werden konkrete Schritte und Vorgehensweisen zur Bewertung der Zuverlässigkeit eines Verfahrens aufgezeigt; von der Definition eines Anwendungsfalls, über die Herstellung geeigneter Testkörper bis hin zur Durchführung und Bewertung von Prüfungen unter Einbeziehung von menschlichen Einflüssen. Die Beispiele umfassen sowohl Anwendungen aus dem Bauwesen als auch aus dem Maschinen- und Anlagenbau.

Der Vortrag fasst die bisherigen und geplanten Arbeiten in dem WIPANO Projekt „Normung für die probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit für zerstörungsfreie Prüfverfahren“ zusammen.

## Einführung

In vielen Branchen spielen Bewertungsverfahren für zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) eine wichtige Rolle. In unterschiedlichen Arbeitsgebieten werden teilweise bereits objektive Bewertungen gefordert: Allgemein (DIN EN 16991:2018 [1]), Raumfahrt (NASA -STD 5009 [2]), Luftfahrt (AITM 6-0014 [3]) oder auch dem Bauingenieurwesen (E DIN 4871:2021-11 [4]), um nur einige Beispiele zu nennen.

Wird hingegen eine Bewertung eines ZfP-Verfahrens z.B. mittels Probability of Detection (POD) gefordert, so wird in der Regel die bekannte Richtlinie MIL-HDBK-1823 [5] herangezogen. Diese Richtlinie ist heutzutage veraltet, spezifisch für die Luftfahrt und somit überwiegend nicht übertragbar auf andere Bereiche.



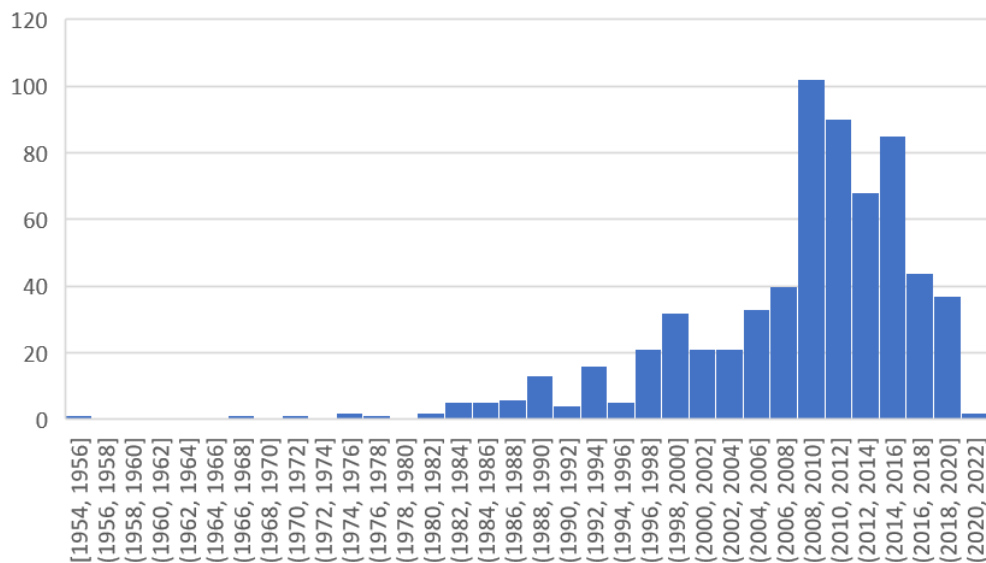
Hier wird deutlich, dass eine allgemeine Richtlinie fehlt, die es auch Einsteiger:innen ermöglicht, die Zuverlässigkeitsbewertung für ihren Anwendungsfall korrekt anzuwenden. Es fehlt an einem einheitlichen Vorgehen, welches als Leitfaden dient, um die Zuverlässigkeit der zerstörungsfreien Prüfung richtig abzuschätzen. Dieses wird zusätzlich erschwert, da es nicht nur eine Prozedur zur Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse gibt. Vielmehr ist die Zuverlässigkeitsanalyse von unterschiedlichen Aspekten, wie dem Ziel der Entscheidungsanalyse, dem Antwortverhalten des Prüfverfahrens oder der betrachteten Einflüsse auf das Prüfverfahren abhängig.

Um Klarheit zu schaffen, wird eine allgemeine Richtlinie angestrebt, die als Leitlinie für jegliche Zuverlässigkeitsbewertung von ZfP-Verfahren dienen soll. Im Folgenden werden die wesentlichen Schritte der Zuverlässigkeitsbewertung kurz angesprochen.

## 1. Strukturierung der Richtlinie

### 1.1 Literaturrecherche

Immer mehr Branchen erkennen die Nützlichkeit von unabhängigen, objektiven Kennzahlen, die die Zuverlässigkeit eines Prüfverfahrens einschätzen können. Besonders durch den Einsatz des Damage-Tolerance-Design-Konzepts [6] wurde die Zuverlässigkeitsbewertung in den letzten Jahren massiv vorangebracht. Dies zeigt sich auch an Entwicklung der Veröffentlichungen oder am Anstieg der Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema POD, in **Abb. 1**.



**Abb. 1.** Anzahl der Publikationen zum Thema Zuverlässigkeit bezogen auf das Jahr der Veröffentlichung

Allein die Anzahl der neuesten Veröffentlichungen (nach Veröffentlichung des MIL-HDBK-1823) gibt einen Einblick dahingegen, dass es nicht ein allgemeingültiges Vorgehen für die Zuverlässigkeitsbewertung geben kann. Obwohl es kostenlose Softwarelösungen für die Erstellung von, z.B. Probability of Detection Kurven gibt, liegt die eigentliche Analyse hingegen in der Aufbereitung der Daten sowie der korrekten Nutzung der Ergebnisse.

Die zukünftige Richtlinie soll daher weniger ein Werkzeug vorstellen, mit der jeder Datensatz in eine POD-Kurve umgeformt werden soll, sondern ein Vorgehen beschreiben, wie die notwendigen Daten für eine aussagekräftige Bewertung erhalten werden können. Ein

grober Abriss über eine richtige Durchführung einer Analyse, die sich auch später in der Richtlinie wiederfinden wird, soll an dieser Stelle vorab skizziert werden.

## 1.2 Normative Literatur

Während sich die Zuverlässigkeit in einigen Ländern schon in Normen und Richtlinien wiederfindet, so gibt es in Deutschland hauptsächlich nur firmeninterne Richtlinien (z.B. AITM 6-0014 [3]), oder brancheninterne Richtlinien (DNV-Rp-F118:2010 [7]), die Zuverlässigkeitsbewertungen fordern. Dennoch gibt es auch Forderungen aus der normativen Literatur, die zwar eine probabilistische Bewertung eines Prüfverfahrens verlangen (z.B. DIN EN 16991:2018 [1]), die jedoch bei der Frage, wie sie durchzuführen ist, ins Leere laufen. Die geplante Richtlinie soll diese Lücke schließen.

## 2. Wesentliche Schritte der Analyse

### 2.1 Definition der Bewertungsaufgabe

Der erste wesentliche Schritt ist die **Definition der Bewertungsaufgabe**. In der praktischen Anwendung tauchen immer wieder Prozessfehler auf, die sich in dem Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse niederschlagen. So werden wesentliche Einflussgrößen in der Bewertung unterschlagen, oder die Anzahl von Daten ist für eine statistische Bewertung nicht ausreichend. Folgende Punkte geben eine Auswahl von Kriterien wieder, welche in der Richtlinie angesprochen werden sollten:

- Die zu bewertende Prüfapplikation: Neben der Auswahl des Prüfverfahrens (z.B. Ultraschallprüfung, Radiographie, Wirbelstromprüfung, etc.) muss auch eine Beschreibung der Gerätetechnik, der eingesetzten Prüfköpfe und der Sensoren stattfinden.
- Die zu prüfende Komponente: Neben dem Produktionsverfahren, das Aufschluss über die möglichen Defekte gibt, spielen auch die Variationen der möglichen Prüfgeometrien eine Rolle, wie z.B. die Zweiblechverbindungen mit unterschiedlichen Blechdicken für die Widerstandspunktschweißung im Automobilbau.
- Das Prüfziel: Soll eine neue Technologie validiert oder zwei Prüfverfahren einander gegenübergestellt werden? Soll es um eine Grobabschätzung der Realisierbarkeit einer Prüfung gehen oder um die sicherheitsrelevante Festlegung von Prüfintervallen oder Designvorschläge für Bauteile? Das Prüfziel muss genau definiert werden.
- Entwicklungsgrad der Prüfapplikation: Handelt es sich um ein Prüfprozess mit bestimmten Rahmenbedingungen oder kann auf die Prüfapplikation vollständig Einfluss genommen werden (Laborprüfung vs. Serienprüfung vs. Prüfauftrag im Feld)?

Die klare Abgrenzung der Prüfaufgabe hilft einerseits dabei, die Kosten der Untersuchung auf ein Minimum zu reduzieren und andererseits, den Bewertungsprozess auf das Ziel der Bewertung auszurichten.

### 2.2 Identifikation der Datenakquiseparameter

Der zweite Schritt der Bewertung ist die **Identifikation der Parameter für die Datenakquise**. Hier soll auf dem vorherigen Schritt aufgebaut werden.

- Identifikation vom ZfP-Antwortverhalten: Klärung der Frage, ob es sich um eine binäre Antwort (Anzeige/ keine Anzeige) oder um ein kontinuierliches Signal (z.B. Grauwert bei der Radiographie) handelt.
- Festlegung des wahren Wertes (z.B. durch metallographischen Schliff, oder Master-ZfP-Verfahren).
- Identifikation und Umgang mit sonstigen Einflüssen (Einflüsse aus dem Modularen Modell der Zuverlässigkeit [8])
- Festlegung der Key Performance Indicators (KPIs): Bestimmung der POD, Fehlalarmrate, Wiederholbarkeit, Genauigkeit u.a.
- Eingliederung von möglichen Human Factors Einflüssen

### 2.3 Entwicklung der Versuchsplanung

Der Fokus der **Versuchsplanung** ist, die notwendigen Schritte zu definieren, die eine Bewertung ermöglichen:

- Anzahl der möglichen Defektgeometrien, -Positionen, -Typen (Defektgröße, reale oder künstliche Defekte, etc.)
- Anzahl der Komponenten (reale Komponente oder vereinfachte Geometrie)
- Ausgestaltung der Versuchsumgebung (reale Prüfpraxis oder vereinfachte Laborprüfung)
- Anzahl von Prüfer:innen und Expert:innen innerhalb der Bewertung
- Abgrenzung von bestimmten Einflussgrößen (z.B. Miniaturroboter vs. Industrieroboter)
- Methodik der Bewertung der Human Factors

### 2.4 Durchführung Datenakquise

Auch wenn vereinfacht häufig von einer „experimentellen Durchführung“ gesprochen wird, so handelt es sich hingegen auch um die Einflechtung von Simulationsergebnissen und dem Wissen aus der technischen a-priori Abschätzung:

- Aufnahme der Daten
- Auswertung möglicher Ausreißer
- Aussage über prinzipielle Zusammenhänge (z.B. Schwächungsgesetz in der radiographischen Prüfung)
- Bestimmung möglicher Rauschquellen (z.B. elektrisches Rauschen oder Artefakte)
- Festlegung der Schwellen (z.B. Entscheidungsschwellen, Grenzwerte, Reportschwellen)

### 2.5 Statistische Auswertung

Bei der statistischen Auswertung helfen in der Regel Softwareprogramme, sofern die vorgegangenen Schritte korrekt durchgeführt wurden. Darüber hinaus sollte bekannt sein, wie die Software das statistische Ergebnis berechnet; auch hinsichtlich Näherungsansätzen:

- Bestimmung der mathematischen Modelle (z.B. Logistische Regression bei einer HIT/MISS POD basierend auf einem Logit-Modell)
- Bestimmung des statistischen Bewertungsgrundlage hinsichtlich der Datenaussage (z.B. Konfidenzintervall 95% mit Hilfe der Deltamethode)
- Bewertung der Daten (z.B. mit Hilfe der MIL-HDBK-1823a Software)

## 2.6 Bewertung und Dokumentation

Der finale Schritt ist die Bewertung der statistischen Ergebnisse in Hinblick auf das Bewertungsziels:

- Bewertung hinsichtlich der statistischen Aussage
- Evaluierung in Hinblick auf das Bewertungsziel (z.B. Berechnung von Inspektionsintervallen auf Basis der Bruchmechanik)
- Nachvollziehbare Dokumentation mit den Hintergrundinformationen zu den jeweiligen Entscheidungszielen
- Abschlussbewertung (beispielsweise innerhalb des Expertenkreises)

Obgleich die einzelnen Schritte eine sukzessive Abarbeitung nahelegen, soll hier darauf hingewiesen werden, dass es sich in der Praxis häufig um einen Prozess handelt, der immer wieder in Entscheidungs- und Feedbackschleifen abläuft. So trägt beispielsweise die Durchführung von Einflussanalysen dazu bei, dass wichtige Einflüsse identifiziert werden, die in der ursprünglichen Planung nicht auftauchen.

Im Weiteren sollen nun einzelne Prozessschritte, in Hinblick auf die im Projekt durchgeführten Fallbeispiele, näher beleuchtet werden. Dies soll zeigen, dass das strukturierte Vorgehen ein wichtiger Teil der Standardisierung darstellt.

### **3. Versuchsplanung am Beispiel der ferritischen Schweißnahtprüfung mit der Ultraschallprüftechnik**

Mit dem Fallbeispiel der Schweißnahtprüfung für Rohre aus dem Energiesektor wurde ein Beispiel gewählt, das sich auf Grund verschiedener Aspekte für die Zuverlässigkeitsbewertung eignet.

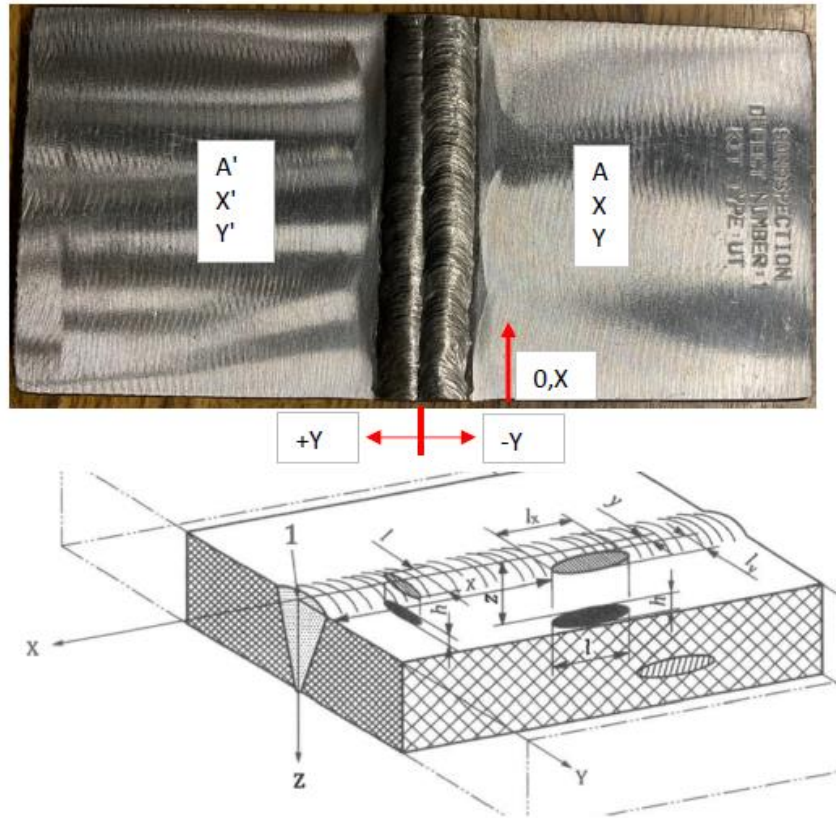
Im Fallbeispiel wird das Vorgehen dargestellt, wie eine POD bestimmt werden kann. Der Fokus der Prüfung liegt hier auf der physikalischen Fähigkeitsbewertung des Prüfverfahrens. Im Fall der Versuchsplanung, stehen somit die Anzahl der möglichen Defekte und der jeweiligen Komponenten zur Diskussion.

Grundsätzlich werden hinsichtlich der Komponenten realistische und vereinfachte Prüflinge unterschieden, während bei Defekten von realen, realistischen und künstlichen Defekten [9] gesprochen wird. Jeder dieser genannten Anordnungen hat Vor- und Nachteile hinsichtlich ihrer Aussagekraft in Bezug auf das Bewertungsziel.

Im Fall der vorliegenden Bewertung wurden vereinfachte Komponenten mit realistischen Defekten sowie realistischen Komponenten mit künstlichen Defekten in Betracht gezogen.

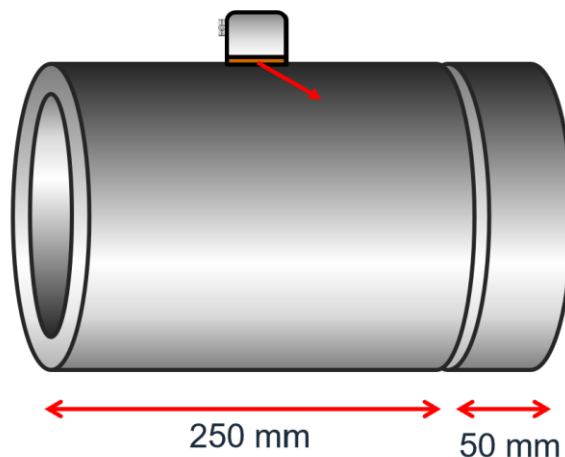
Während die vereinfachten Komponenten bei Dienstleistern bestellt werden können, ist deren Auslegung eine Entscheidung, welche von Expert:innen getroffen werden muss.

An dieser Stelle können folgende Schwierigkeiten auftreten: Die Defekte sind entweder zu klein, um zuverlässig detektiert zu werden oder zu groß, um eine sinnvolle Zuverlässigkeitsaussage zu generieren.



**Abb. 2:** Beispiel für eine vereinfachte Komponenten mit realistischen Schweißdefekt.

Im Fall von realistischen Komponenten, wird die Produktion innerhalb der MPA durchgeführt, wodurch aber ein größerer Planungs- und Durchführungsaufwand anfällt. Allerdings kann so auch das Ziel erreicht werden, eine möglichst realitätsnahe Prüfaufgabe zu generieren, besonders in Hinblick auf die Prüfbarkeit von bestimmten geometrischen Bereichen.



**Abb. 3:** Realistische Komponenten mit künstlich eingebrachten Defekten

Des Weiteren wurden auch Daten aus einem vorherigen Projekt, mit sowohl realistischen Defekten als auch realen Komponenten als Datengrundlage, geprüft, ob sie für das Fallbeispiel genutzt werden können. Die schrittweise Entwicklung der Bauteile und der Defekte, von einfachen bzw. künstlichen zu komplexen Geometrien, ist sinnvoll. Einerseits,



um die tatsächliche Fähigkeit des Prüfverfahrens, andererseits, um die Einflüsse auf die Verfahren des Referenzfehlererzeugung abschätzen zu können.

Besonders die Simulation der späteren Prüfapplikation ist hierbei ein hilfreiches Mittel, um beispielsweise komplexe Abhängigkeiten, von z.B. Geometrie, Defektart und Defektgeometrie abschätzen zu können.

#### **4. Datengewinnung am Beispiel der Impuls-Echo Prüfung von Tunnelinnenschalen**

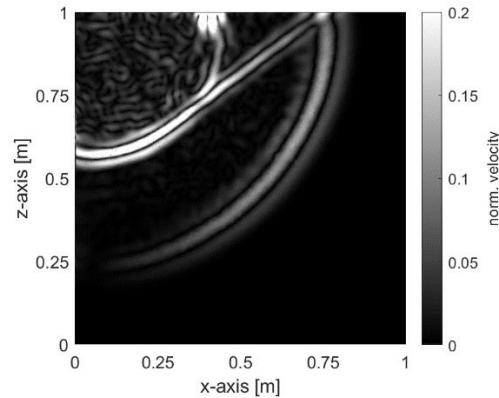
Die Zuverlässigkeitsbewertung zerstörungsfreier Prüfungen gewinnt auch im Bauwesen kontinuierlich an Bedeutung. Jedoch unterscheiden sich die Herausforderungen zur Umsetzung der Zuverlässigkeitsbewertung im Bauwesen teilweise von denen im Maschinenbau.

Die größte Herausforderung im Bauwesen ist, dass es keine standardisierten Bauteile mit definierten Geometrien und Materialwiderständen gibt. Das wichtigste Material im Bauwesen ist Stahlbeton und die Eigenschaften von Stahlbeton sind abhängig von den aufgetragenen statischen und dynamischen Belastungen sowie den Umgebungsbedingungen (Feuchte, Temperatur, etc.). Dies hat zur Folge, dass die Stahlbetoneigenschaften an einer Struktur sowohl zeitabhängig sind und zudem räumlichen Streuungen unterworfen sind. Daher ist das Bauwesen erst am Anfang der Entwicklung geeigneter Referenzprobekörper zur Realisierung von Zuverlässigkeitsbewertungen.

Ein maßgebliches Tool zur Unterstützung der Zuverlässigkeitsbewertung ist die numerische Simulation, um zunächst zeitliche und räumliche Streuungen der Materialeigenschaften zu kontrollieren. Eines der wesentlichen Ziele der numerischen Simulation ist, Defektgrößen einzugrenzen, die später in den Referenzprobekörpern implementiert werden, damit weder zu kleine Defekte, die nicht detektiert werden können bzw. nur zu große Defekte, die immer detektiert werden, hergestellt werden. Zudem können über die numerische Simulation Skaleneffekte eingegrenzt werden, da die Referenzbauteile im Labor wesentlich kleiner sind als reale Strukturen. Somit kann der Aufwand zur Herstellung der Referenzprobekörper gezielt optimiert werden. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen sollen in der Zukunft mit in die Zuverlässigkeitsbewertung einfließen, da hierbei, anders als bei realen Inspektionen, die exakte Größe und Lage eines Defektes, sowie alle weiteren Rahmenparameter, wie beispielsweise die exakte Geometrie des Bauteils, bekannt sind.

Eine typische Prüfaufgabe im Bauwesen ist die Detektion und Lokalisation von Hohlstellen, Kiesnestern, Rissen, etc., die durch Impakt-Echo oder Ultraschall, also mit Prüfverfahren basierend auf elastischen Wellen, aufgefunden werden können. Momentan konzentrieren sich die Arbeiten der HSU auf die numerischen Simulationen zur Ausbreitung elastischer Wellen in Beton. Solch eine Simulation ist beispielhaft in Abb 4. dargestellt, um die Komplexität des gestreuten Feldes aufzuzeigen. Diese Simulationen können für die Auswertung der Simulationsergebnisse einen Informationsmehrwert bieten [10].

In einem nächsten Schritt wird eine Handlungsanweisung entwickelt, die zum einen die Entwicklung von Referenzprobekörpern im Bauwesen mit numerischen Ergebnissen unterstützt, als auch aufzeigt, wie die numerischen Ergebnisse in die Zuverlässigkeitsbewertung integriert werden können.



**Abb. 4:** Exemplarische Darstellung der Wellenausbreitung bei einer 25 kHz Anregung in einem Beton mit einem Größtkorn von 16 mm.

## 5. Abschätzung der Human Factors bei der Zuverlässigkeitsanalyse

In dem Projekt werden verschiedene Möglichkeiten zur Einbeziehung menschlicher Faktoren in die Zuverlässigkeitsbewertung geprüft und bewertet. Einerseits versuchen wir, die Einflussfaktoren zu beschreiben und der Zuverlässigkeitsgemeinschaft einen Leitfaden an die Hand zu geben, wie man menschliche Faktoren berücksichtigen kann, um die Zuverlässigkeit auf dem Gebiet zu erhöhen. Während es eine Vielzahl von Studien über die Prüfung von metallischen Bauteilen gibt, gibt es bis heute keine Literatur über menschliche Faktoren bei der Prüfung von Betonbauteilen. Um die Einflussfaktoren zu identifizieren, haben wir eine menschenorientierte Fehler- und Einflussanalyse durchgeführt, um menschenbezogene Risiken bei der visuellen Prüfung der Tunnelinnenwand zu identifizieren und zu bewerten.

Parallel zum Verständnis der Einflussfaktoren werden verschiedene Methoden erwogen, wie HF quantifiziert und in die POD-Berechnung bzw. die Simulation integriert werden könnten, getestet und bewertet [11].

## 6. Ausblick: Die nächsten Schritte

Seit März 2022 ist bekannt, dass der Normausschuss Materialprüfung (NMP)-Beirat des DINs, der Reaktivierung, des Ausschusses NA 062-08-28 AA, zum Thema „Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen“, zugestimmt hat. Daraus bildet sich ein Gremium im DIN, welches sich intensiv mit der zukünftigen Richtlinie auseinandersetzen wird.

Erste Diskussionen hinsichtlich eines ersten Entwurfes sind im Sommer 2022 geplant.

Des Weiteren laufen auf europäischer und internationaler Ebene Gespräche, um ein gemeinschaftliches Vorgehen zum Thema Zuverlässigkeit in der zerstörungsfreien Prüfung zu gewährleisten. Besonders erwähnenswert sind die Aktivitäten der ICNDT Specialist International Group „NDT Reliability“, in der eine breite internationale Expertengruppe an der Erstellung einer internationalen ZfP.-Zuverlässigkeits-Richtlinie arbeitet.



## 7. Ausblick: Zuverlässigkeit und ZfP 4.0

ZfP 4.0 ist die Konfluenz der Emerging Technologies aus dem Umfeld von Industrie 4.0 mit den Methoden der zerstörungsfreien Prüfung [12] und die Use-Cases von ZfP 4.0 lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Industrie 4.0 für ZfP: Nutzung der Emerging Technologies zur „Verbesserung“ der ZfP – also z.B. die Nutzung einer künstlichen Intelligenz zur sichereren Klassifikation von Anzeigen, die Nutzung einer erweiterten Realität zur intuitiveren Visualisierung, oder digitale maschinelle Identifizierung eines Bauteils und Einsatz von ZfP Workflow-Systemen für die Sicherstellung einer eindeutigen, reversionssicheren Zuordnung der Ergebnisse.
- ZfP für Industrie 4.0: Nutzung von ZfP Daten zur Verbesserung der Produktion, der Instandhaltung und des Designs von Produkten mit Hilfe von Cyber-Physical Loops und Digitalen Zwillingen [13] – also z.B. die Verwendung von ZfP Daten für eine holistische prädiktive Instandhaltung [14] oder um ein genaueres Wissen in einer probabilistische Bruchmechanik Implementierung verwenden zu können [15].

Bei der ersten Use-Case Gruppe „Industrie 4.0 für ZfP“ liegt der Fokus auf der Verbesserung der Zuverlässigkeit der Prüfung und dessen Dokumentation. Solche automatisierten Methoden müssen aber vor deren Verwendung erprobt und zertifiziert werden. Es muss also der Grad der Verbesserung nachgewiesen werden.

Bei der Use-Case Gruppe „ZfP für Industrie 4.0“ gilt es ZfP als eine Datenbasis für das Engineering zu etablieren. Eine jede Datenquelle hat eine inhärente Genauigkeit, die bei den verschiedenen Ansätzen zur Wandlung von Daten in Wissen mit einbezogen werden sollten [16]. Die Zuverlässigkeitsinformation von Daten sollte also in dem Metadatensatz, der die eigentlichen Messdaten beschreibt, mit enthalten sein. Für die ZfP bedeutet dies, dass für eine Verwendung von ZfP Daten in digitalen Zwillingen und anderen Datenveredelungsmethoden die Zuverlässigkeit der Messmethode ermittelt und mit übertragen werden sollte.

All dies wird dazu führen, dass der Zuverlässigkeitsbeurteilung an Wichtigkeit gewinnen wird – in der klassischen ZfP, in der Zustandsüberwachung und ganz generell in der Sensorik.

Mehr Information zum Thema ZfP 4.0 findet sich in den Büchern „Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0“ [17] und „The World of NDE 4.0“ [18].

## 8. Förderung durch den BMWi

Das Projekt „normPOD“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Namen „Normung für die probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit für zerstörungsfreie Prüfverfahren“ gefördert und verzeichnet das Förderkennzeichen 03TN0006A.

## Referenzen

- [1] DIN EN 16991:2018-07 „Risikobasierte Inspektion (RBIF)“ (2018)
- [2] NASA-STD-5009, NASA Technical Standard: “Nondestructive Evaluation Requirements for Fracture Critical Metallic Components” (2006)
- [3] Airbus standard AITM 6-0014 “Probability of Detection”
- [4] DIN 4871:2021-11 – Entwurf “Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen“ (ZfPBau)

- [5] MIL-HDBK-1823 "Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation (NDE) System, Reliability Assessment" (1999)
- [6] Rentala, V.K., Mylavarapu, P., Kumar, A. "POD of NDT Techniques Using High Temperature Oxidized Fatigue Cracks in an Aero Engine Alloy". *J Nondestruct Eval* 40, 41 (2021).
- [7] DNV-RP-F118, 19th Edition, "Pipe girth weld automated ultrasonic testing system qualification and project specific procedure validation" (2010)
- [8] Kanzler, D and Rentala V.K. "Reliability Evaluation of Testing Systems and Their Connection to NDE 4.0." *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0* (2021)
- [9] EN 1330 ENIQ Report nr. 12. "ENIQ Glossary" Issue 2 (1999)
- [10] Dethof, F.; Keßler, S.: *Simulation von Impakt-Echo Inspektionen in Beton zur Analyse der Detektionswahrscheinlichkeit*, DGZfP-Jahrestagung 2022 (2022)
- [11] Bertovic, M., Given, J., Lehlleitner, J., Heckel, T., Kanzler, D. & Rentala, V.K. „Human Factors in der POD - ist das möglich?“, DGZfP-Jahrestagung 2022 (2022)
- [12] Vrana, J., Singh, R. "NDE 4.0—A Design Thinking Perspective" *J Nondestruct Eval* 40, 8 (2021)
- [13] Vrana, J., Singh, R. "Cyber-Physical Loops as Drivers of Value Creation in NDE 4.0." *J Nondestruct Eval* 40, 61 (2021).
- [14] Vrana, J., Singh, R. "NDE 4.0: NDT and sensors becoming natural allies by digital transformation and IoT". *Proc. SPIE 11594, NDE 4.0 and Smart Structures for Industry, Smart Cities, Communication, and Energy*, 1159404 (2021)
- [15] Vrana, J., Kadau, K., Amann C. "Smart data analysis of the results of ultrasonic inspections for probabilistic fracture mechanics". *VGB PowerTech* 2018(7):38-42 (2018).
- [16] Vrana, J. "The Core of the Fourth Revolutions: Industrial Internet of Things, Digital Twin, and Cyber-Physical Loops". *J Nondestruct Eval* 40, 46 (2021).
- [17] Meyendorf N., Ida N., Singh R., Vrana J. "Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0" Springer, Cham (2022).
- [18] Singh R., Vrana J. "The World of NDE 4.0: Let the Journey Begin". Amazon (2021).