

Erarbeitung einer Norm für einen standardisierten Prozess zur probabilistischen Bewertung von Prüfverfahren

Daniel KANZLER¹, Michael SCHMITT², Stefan MAACK³, Franziska BAENSCH²

¹Applied Validation of NDT, Berlin

²DIN, Berlin

³Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

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

Kurzfassung. Im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) wurde das Normungsgremium NA 062-08-28 AA „Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen“ reaktiviert. Das Ziel der Reaktivierung ist die Erarbeitung einer Norm für einen standardisierten Prozess zur probabilistischen Bewertung von Prüfverfahren.

In der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) führt die Ermittlung von Mess- / Prüfunsicherheiten von Prüfverfahren, in normativer Hinsicht in Deutschland und Europa, noch ein Schattendasein. Die Norm ISO IEC 17025 und auch der VDA-Band 5 wurden weiter in Richtung Messunsicherheit entwickelt, allerdings führt ihre Anwendung in der ZfP zu Problemen.

Der Arbeitsausschuss NA 062-08-28 AA soll hier den Brückenschlag zwischen Messunsicherheit, objektiver statistischer Bewertung für ZfP-Verfahren und eine weitere Stärkung der probabilistischen Bruchmechanik erreichen. Geplant ist daher die Erarbeitung einer DIN-Norm, welche die Kriterien für eine korrekte Versuchsplanung, ein praktikables Vorgehen zur Bewertung der Prüfergebnisse und die mathematische Überführung in eine Zuverlässigkeitsaussage enthält. Es soll ein Leitfaden erstellt werden, der für ein möglichst breites Branchenspektrum eingesetzt werden kann, unabhängig von den Besonderheiten verschiedener Industriezweige.

Dargestellt werden das relevante Normungsgremium sowie der Hintergrund des zu erstellenden Dokuments.

Einführung

Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) ist ein wesentlicher Teil des modernen Qualitätsmanagements. Während sich die ZfP-Community häufig als das unbeliebte Glied am Ende der Qualitätskette sieht, zeigt sich gleichzeitig, dass es an Kommunikationsstrukturen mangelt, welche die ZfP-Informationen für die weiteren Shareholder zur Verfügung stellen. Diese Tatsache ist belastend, da der Wert der ZfP kaum in der modernen Produktions- und Instandhaltungsstruktur genutzt werden kann. Dies führt letztlich zu einer reinen Kostenbetrachtung. Andererseits wird dadurch die doch so notwendige Eingliederung der ZfP in die Konzepte der Industrie 4.0 behindert.

In der jüngsten Vergangenheit wurden an einzelnen Stellen im Qualitätsprozess Normen eingeführt oder erneuert, um die Prozesse greifbarer und bewertbarer zu machen. Ein Beispiel ist DIN EN 16991 [1] aus dem Jahre 2018, die sich mit der risikobasierenden Instandhaltung beschäftigt. Während innerhalb der Norm die Bewertung der Zuverlässigkeit



eines ZfP-Systems vorgeschrieben ist, fehlt gleichzeitig jedoch der systematische Ansatz, wie eine solche Bewertung stattfinden kann. Dabei ist genau dieser Standard eine Möglichkeit der ZfP ihr volles Potential in der Instandhaltung zu entfalten.

Eine intensive Literaturrecherche zeigte, warum dieser Standard mit Fixwerten agieren musste, anstatt auf ein prozesszentriertes Verfahren zur Zuverlässigkeit zu verweisen. Es gibt aktuell in der allgemeinen Standardisierungsliteratur in Europa bzw. im ISO-Bereich keine Norm, die diese Aufgabe erfüllen könnte.

Werden darüber hinaus weitere Industriezweige betrachtet, so zeigt sich ein ähnliches Bild. Obwohl erst im Jahr 2021 der VDA-Band 5 [2] für Mess- und Prüfprozess im Automobilbau erneuert wurde, besitzt die ZfP auch hier nur eine sehr geringe Rolle. Dies wurde jedoch erkannt und unter VDA 236-XX [3] entsteht aktuell eine Richtlinie zur „Standardisierung Vorgehensweise zur Ermittlung der Prozessfähigkeit von ZFP-Anwendungen im Bereich Automotive“.

Im Bereich der Nukleartechnik finden sich in Europa ENIQ Richtlinien, die das Thema der Zuverlässigkeit von Prüfverfahren wohl am besten für ihren spezifischen Bereich ausgearbeitet haben.

Es stellt sich nun die Frage, wie alle anderen Bereiche, die ZfP nutzen und ihre Fähigkeit abschätzen wollen, um mit dieser Situation umzugehen. Besonders sicherheitsrelevante Anwendungen richten sich nach den ENIQ-Richtlinien oder nach dem aktuellen Goldenen Standard dem MIL-HDBK-1823A:2009 [4]. Die MIL-Richtlinie fasste bis 2009 die aktuellen Verfahren zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von ZfP-Applikationen zusammen. Tatsächlich war jedoch in dieser Zeit vor allem die Luftfahrt jener Industriesektor, der sich am stärksten mit dem Thema Zuverlässigkeit von Prüfverfahren auseinandergesetzt hat. Der Prozess ist daher sehr Luftfahrt-spezifisch.

Allerdings hat sich in der letzten Zeit die Notwendigkeit vor allem in Industriebereichen, wie dem Bauingenieurwesen [5], dem Automobilbau [6] und der Eisenbahninstandhaltung [7] gezeigt.

Gerade hier zeigt sich der Vorteil der Normung: Obwohl der Anwendungsbereich sehr unterschiedliche Facetten hinsichtlich Material, Anforderungen und Wissensstand über das Verfahren in der Anwendung hat, so ist davon auszugehen, dass das allgemeine Vorgehen bei der Bewertung von Prüfverfahren durchaus übertragbar ist. Dass diese Annahme berechtigt ist, konnte schon im WIPANO-geförderten Projekt normPOD: Normung für die probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit für zerstörungsfreie Prüfverfahren [8] anhand zweier unterschiedlicher Beispiele gezeigt werden.

1. Das normPOD-Projekt

1.1 Literaturrecherche

Innerhalb des normPOD-Projekts konnte in die umfangreichen Literaturrecherche gezeigt werden, dass die Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema Zuverlässigkeit auf hohem Niveau konstant bleiben (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dies ist einerseits auf die Tatsache zurückzuführen, dass aktuell noch in vielen Bereichen zu diesem Thema geforscht und experimentiert wird, bzw. dass die Anforderung für eine objektive Kennzahl sich weiter ausbreitet. Andererseits, dass basierend auf dem MIL-HDBK-1823A eine Grundlage geschaffen werden konnte, welche die Einarbeitung in das Thema deutlich erleichtert hat. Zudem hat die Literaturrecherche gezeigt, dass sich die Zuverlässigkeitsbewertung aktuell auch in anderen Themenbereichen wiederfindet, u.a. dem Bauingenieurwesen.

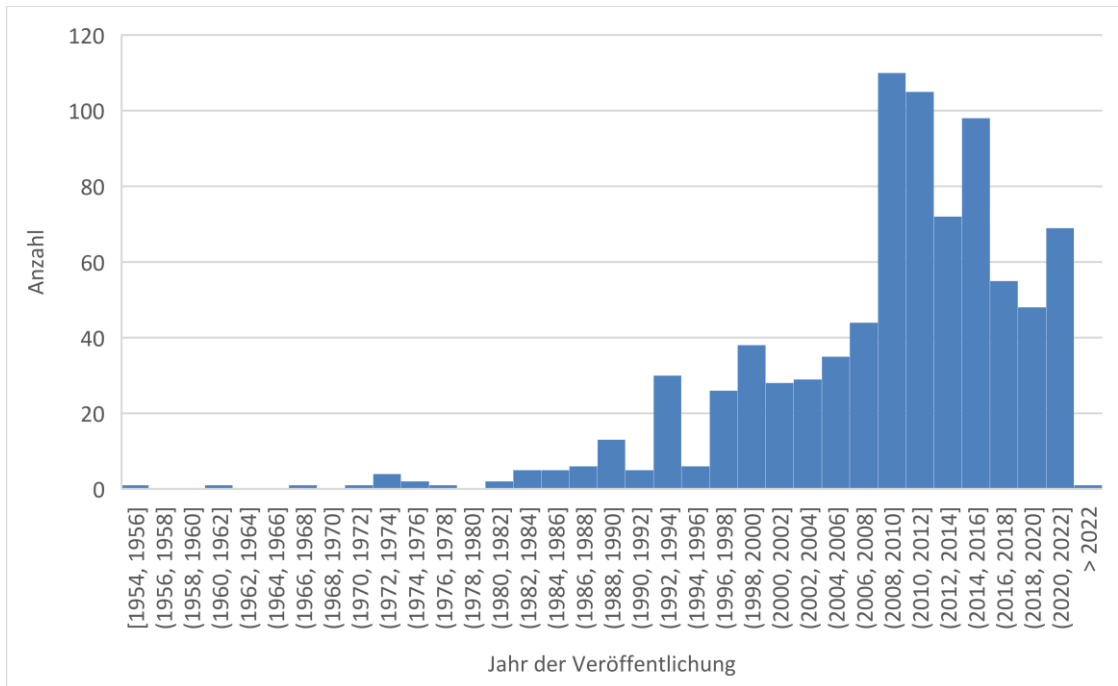


Abb. 1: Anzahl der Publikationen zum Thema Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren

Ein allgemeines Vorgehen, wie hier vorgeschlagen wird, ergibt daher Sinn und unterstützt die Erarbeitung einer allgemeinen deutschen Norm, die den positiven Trend weiterführen und auch neue Erkenntnisse mitaufführen kann.

1.2 Methodik

Ein weiterer Trend, der teilweise auch die Anzahl der Publikationen erklärt, sind die unterschiedlichen mathematisch / statistischen Vorgehen, die in letzter Zeit entwickelt wurden. Grundsätzlich gilt hier, dass ein passendes mathematisches Modell auf die Datengrundlage angepasst werden sollte und das unterschiedliche mathematische Modelle einen Einfluss auf das Ergebnis, beispielsweise dem Vertrauensintervall einer probabilistischen Kennzahl, haben können.

So wurde beispielweise gezeigt, dass bei der Bewertung der Auffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection - POD), das Konfidenzband stark von der statistischen Anforderung abhängt.

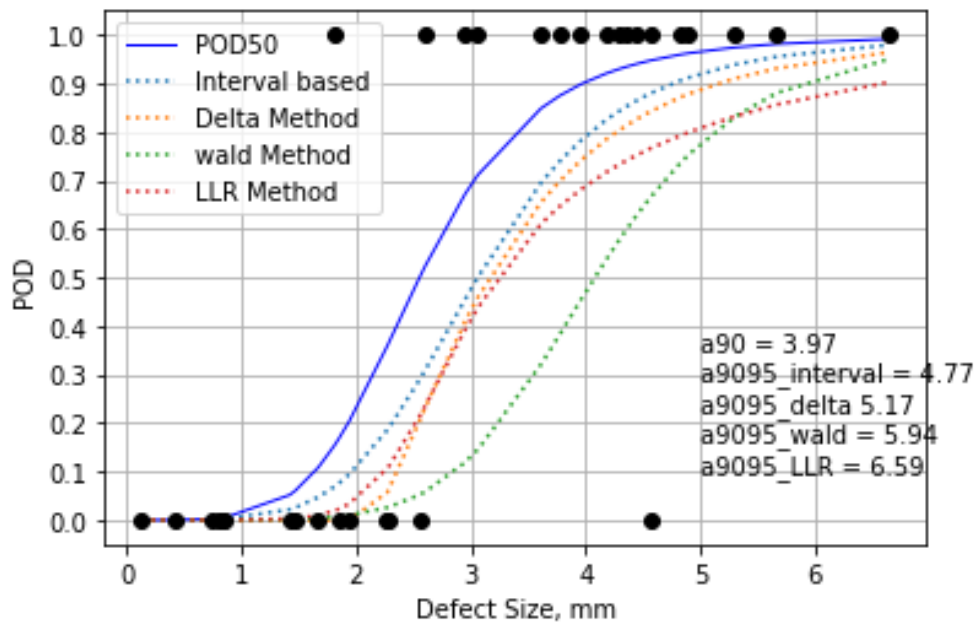


Abb. 2: Unterschiedliche statistische Grundlage für die Berechnung des Konfidenzbands einer POD

Prinzipiell soll hier gezeigt werden, dass die Integration des statistisch-physikalischen Modells die höchste Einstiegsbarriere bei der Einführung der Zuverlässigkeitsbestimmung darstellt. Einerseits stehen hierfür auch einige Hilfen auf dem Markt zur Verfügung (sei es durch Tutorials, Softwareprogrammen und Beratungsdienstleistung), andererseits kann jedoch nur ein Teil innerhalb des Bewertungsprozesses dargestellt werden.

Allerdings hat sich in der Vergangenheit immer wieder gezeigt, dass zwar das Ziel, eine bestimmte Kennzahl (Key-Performance Indicator), angestrebt wurde, häufig jedoch der Weg häufig deutlich mehr Mehrwert für den zukünftigen Einsatz des Verfahrens mitgebracht hat. Das ist auch der Grund, warum sich Richtlinien wie die ENIQ-Richtlinien oder das MIL-HDBK-1823A auf den gesamten Bewertungsprozess beziehen. Dies soll auch innerhalb dieser zukünftigen Norm passieren, wie Abb. 3 zeigt.

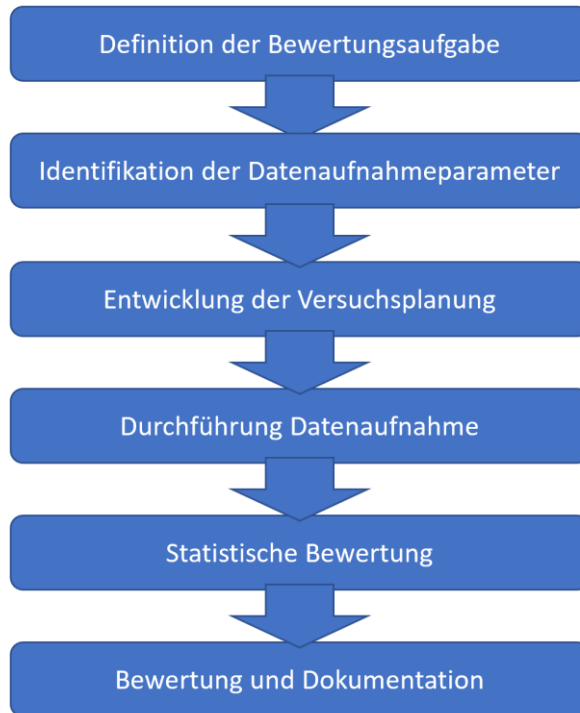


Abb. 3: Standardisiertes Vorgehen zur Bestimmung einer Zuverlässigkeitskennzahl.

Dabei sind die Unteraufgaben wie folgt beschrieben:

1. Definition der Bewertungsaufgabe

Der erste wesentliche Schritt ist die **Definition der Bewertungsaufgabe**. In der praktischen Anwendung treten häufig Prozessfehler auf, die sich im Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse niederschlagen. Als Folge können wesentliche Einflussgrößen in der Bewertung unterschlagen werden oder die Anzahl von gewonnenen Daten stellt sich für eine statistische Bewertung ggf. als nicht ausreichend heraus.

Folgende Punkte geben eine Auswahl von Kriterien wieder, welche in der zukünftigen Richtlinie angesprochen werden:

- 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 sollen 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 einen 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 entsprechende Ziel der Einschätzung auszurichten.

2. Identifikation der Datenaufnahmeparameter

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

- 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
- Festlegung der Key Performance Indicators (KPIs): Bestimmung der POD, Fehlalarmrate, Wiederholbarkeit, Genauigkeit u.a.
- Eingliederung von möglichen Human Factors Einflüssen

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

4. Durchführung Datenaufnahme

Auch wenn vereinfacht häufig von einer „experimentellen Durchführung“ gesprochen wird, handelt es sich jedoch 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
- Abgrenzung der technischen Parameter von menschlichen Einflüssen

5. Statistische Auswertung

Bei der statistischen Auswertung helfen in der Regel Softwareprogramme, sofern die vorangegangenen 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

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

1.3 Fallbeispiele

Dieses Vorgehen konnte an zwei unterschiedlichen Anwendungen gezeigt werden. Einerseits wurde hierzu die Schweißnahtprüfung einer ferritischen Rohrnaht im Kraftwerksbetrieb mit Ultraschall und andererseits die Impulsehochprüfung von Stahlbetonbauteilen aus dem Bauingenieurwesen [9] betrachtet. Beide Ansätze zeigten, dass das vorgeschlagene Vorgehen sinnvoll durchgeführt werden konnte, was eine Einführung in der Normung daher zusätzlich unterstützt.

2. Normierungsarbeit

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem normPOD-Projekt wurde das Normungsgremium NA-62-08-28 AA reaktiviert. Da sich die Thematik keiner spezifischen Prüfung unterordnen lässt, jedoch die notwendige Kenntnis innerhalb der Arbeit zu spezifisch für den Obleuteausschuss NA-62-08-20 AA ist, ist die Reaktivierung eine gute Möglichkeit das Thema weiter voranzubringen. Dass das Thema auf ein breites Interesse stößt, zeigt bereits das Treffen zur Konstituierung und Reaktivierung des Gremiums am 20.09.2022. Da jedoch vor allem auf die Kenntnisse aus dem normPOD-Projekt aufgebaut werden soll, wird aktuell noch auf die Fertigstellung des offiziellen Endberichts gewartet, auf dem basierend wiederum ein erster Vorschlag für den Standard erarbeitet werden soll. Die nächste Sitzung findet am 14. Juni 2023 statt. Alle Interessent:innen an einer aktiven Mitarbeit sind herzlich eingeladen, teilzunehmen.

4. Fazit

Grundsätzlich hat sich innerhalb der Arbeit gezeigt, wie wichtig die weitere Normungsarbeit auch aus Deutschland ist. Aktuell kann mit Hilfe der Arbeit an dem vorgestellten Standard die zerstörungsfreie Prüfung und deren Produkte aus Deutschland sehr stark unterstützt werden. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass allein für die Vorarbeit eines neuen Standards, sehr viel Arbeit geleistet werden muss und weitere Kosten entstehen, was ohne die Unterstützung im WIPANO-Projekt kaum leistbar wäre.

Die Arbeit rund um das Thema Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren ermöglicht es Komponentenhersteller, Prüfdienstleister und Gerätehersteller in optimaler und kosteneffizienter Weise zusammenzuarbeiten. Daher soll dieser Standard als Möglichkeit erkannt werden und wir freuen uns, bald über die weiteren Schritte zu informieren.

Referenzen

- [1] DIN EN 16991:2018, *Risikobasierte Inspektion (RBIF); Deutsche Fassung EN 16991:2018*
- [2] VDA Band 5 Mess- und Prüfprozesse. Eignung, Planung und Management, 3., überarbeitete Auflage, Juli 2021
- [3] VDA 236-XXX VDA Gruppe, Verband der Automobilindustrie e.V. „Standardisierung Vorgehensweise zur Ermittlung der Prozessfähigkeit von ZFP-Anwendungen im Bereich Automotive“ <https://webshop.vda.de/VDA/de/vda-236-xxx-tba-2>
- [4] MIL-HDBK-1823A, 2018, Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, Department of Defense Handbook
- [5] Feistkorn, S. “Developments to improve the performance of non-destructive concrete inspections” 12491-4 8th International Workshop on Reliability of NDT/NDE 2023 Long Beach, USA
- [6] Lehmann N., et al. “An industry-suited NDE 4.0 approach: validation of automated ultrasound technologies using POD in the production floor” 12491-16 8th International Workshop on Reliability of NDT/NDE 2023 Long Beach, USA
- [7] Rohrschneider A., et al. „Absenkung der Fehlernachweisgrenze an Radsatzwellen mit Längsbohrung bei der Ultraschallprüfung – Praxiseinführung“ 12. Fachtagung ZfP im Eisenbahnwesen ZfP an Schienenfahrzeug- und Fahrbahnkomponenten 2022, Erfurt
- [8] Kanzler D., et al. „Lasst uns mal POD standardisieren“ DGZfP-Jahrestagung 2022, Kassel
- [9] Keßler S., et al. „Reliability Assessment of NDT in Civil Engineering—the German Approach for Standardization (normPOD)“. NDE NucCon 2023 - International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, 2023, Espoo, Finland