

Aktueller Stand der Diskussion zur Zuverlässigkeit der ZfP und den menschlichen Faktoren

Marija BERTOVIĆ¹, Daniel KANZLER², Mato PAVLOVIĆ¹, Ralf HOLSTEIN³

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Applied Validation of NDT, Berlin

³ DGZfP Ausbildung und Training GmbH, Berlin

Kontakt E-Mail: marija.bertovic@bam.de

Kurzfassung. Dass die Zuverlässigkeit der ZfP eine sehr wichtige Rolle bei der Bewertung sicherheitsrelevanter Systeme spielt, ist bekannt. Laut dem modularen Zuverlässigkeitsmodell für zerstörungsfreie Prüfprozesse hängt die Zuverlässigkeit von der innewohnenden (physikalisch-technischen) Fähigkeit der Prüfsystems, den Anwendungsparametern, den menschlichen Faktoren und dem organisatorischen Kontext ab. Seit Einführung des Modells während des ersten Workshops zur Zuverlässigkeit der ZfP (*European-American Workshop on Reliability of NDE*) wurde das Modell in weiteren fünf Workshops stetig weiterentwickelt, diskutiert und an den Stand der Wissenschaft angepasst. Das Ziel dieser Publikation ist es, den aktuellen Stand der Diskussion und die neusten Fragestellungen der internationalen Zuverlässigkeitgemeinschaft vorzustellen. Im Einzelnen werden die Entwicklung fortgeschrittener Modelle zur Bewertung der Probability of Detection (POD), Bewertungsansätze im Bereich Structural Health Monitoring und Fragestellungen zu den menschlichen Faktoren dargestellt. Besonderer Wert wurde sowohl auf die Entwicklung, als auch auf die Anwendung der Ansätze in der industriellen Praxis gelegt.

Einführung

Die „World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT)“ im Juni 2016 in München, stellte eine der größten Plattformen für den wissenschaftlichen Austausch zwischen Fachleuten zu den Themen der Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) dar. Mit dem Ziel, die aktuellen Interessen der ZfP-Gemeinschaft zu identifizieren und sie zu diskutieren, folgte dem wissenschaftlichen Teil des Programms eine offene Gruppendiskussion.

Die Diskussion fand nach den Grundsätzen der Open Space Technology, OST [1] statt. Im Allgemeinen bietet die OST eine Plattform für eine Diskussion, der jeder beitreten kann und für die Themen, die ihn/sie interessieren. Die Teilnehmer werden zuvor gebeten, Zettel mit Fragen an eine „Wand der Ideen“ zu heften, deren mögliche Antworten dann in Gruppen bearbeitet werden. Dieser Workshop-Stil wurde im 5. und 6. Europäisch-Amerikanischen Workshops zur Zuverlässigkeit der zerstörungsfreien Prüfung (*European-American Workshop on Reliability of NDE, EAW*) erfolgreich angewendet (siehe [2], [3])



für die Beschreibung der Methode und die ausführlichen Berichte zu den beiden vorangegangenen Diskussionen).

Das Ziel dieser Publikation ist es ist es, den aktuellen Stand der Diskussion und die neusten Fragestellungen dazu der internationalen Zuverlässigkeitsgemeinschaft vorzustellen. Im ersten Kapitel wird das modulare Zuverlässigkeitsmodell [4] vorgestellt. Das zweite Kapitel bietet einen Überblick über die bisherigen OST Diskussionen während des fünften und sechsten EAW und das dritte Kapitel über die Ergebnisse der letzten Diskussion während der WCNDT.

1. Modulares Zuverlässigkeitsmodell

Zuverlässigkeit wird definiert als die Fähigkeit eines Systems oder einer Komponente die geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen und in einer definierten Zeitspanne zu erfüllen [5].

Im Mittelpunkt der Diskussion zur Zuverlässigkeit der ZfP steht das sogenannte modulare Zuverlässigkeitsmodell, dass im Jahr 1997, während des ersten EAW von der ZfP-Gemeinschaft postuliert [6] und über die Jahre weiter entwickelt wurde. Laut diesem Model hängt die Zuverlässigkeit eines Prüfsystems von der innewohnenden (physikalisch-technischen) Fähigkeit der Prüfsystems, den Anwendungsparametern, den menschlichen Faktoren und dem organisatorischen Kontext ab [4].



Abb. 1. Modulares Zuverlässigkeitsmodell: Einflüsse auf die Zuverlässigkeit der ZfP

2. Bisherige Diskussionen über die Zuverlässigkeit und die menschlichen Faktoren

Der Fokus der ersten OST-Diskussion [2] lag darauf, den Unterschied zwischen den Qualifikations- und Zuverlässigkeitsmodellen und der realen Zuverlässigkeit im Feld zu verstehen. Die Teilnehmer organisierten sich in Gruppen und diskutierten über die grundlegenden und fortgeschrittenen Konzepte der Zuverlässigkeit von ZfP (Probability of Detection (POD), Multi-Parameter POD, Bayes'scher Ansatz für POD, modellgestützte POD - MAPOD), Structural Health Monitoring (SHM) und angewandten Zuverlässigkeitskonzepten (Automatisierung, menschliche Faktoren).

Die Gruppen schlossen mit folgenden Erkenntnissen ab:

- Trotz der Fortschritte in den Zuverlässigkeitskonzepten besteht noch die Notwendigkeit, die Grundprinzipien der Charakterisierung der Zuverlässigkeit zu diskutieren (Vertrauensintervalle, Anwendbarkeit von POD auf verschiedene Defekttypen, Beurteilung der Risiken in die POD-Analyse). Die Diskussion deutete darauf hin, dass die Entwicklung von Lernmaterialien über grundlegende Zuverlässigkeitskonzepte (Bücher, Tutorials, Kurse) eine gute Einstiegsmöglichkeit für neue Fachleute im Bereich der ZfP-Zuverlässigkeit bieten würde, aber auch Personen, die schon auf dem Gebiet Erfahrung gesammelt haben, bei einem tieferen Verständnis der Materie unterstützen könnte.
- Weiteres Interesse wurde für die fortgeschrittenen POD-Modelle gezeigt, d.h. die Verwendung der Bayes'schen Statistik für die Kombination von Daten aus verschiedenen Quellen und die Nutzung von weiteren Modellen für die POD-Schätzung. Es wurde vorgeschlagen, einen Anwendungsleitfaden zu schaffen, der die Arbeitsprobleme, sowie die weitere Forschung und den Austausch von Erfahrungen durch Richtlinien enthält.
- Die Structural Health Monitoring (SHM)-Gruppe erörterte die Unterschiede zwischen der Zuverlässigkeitsbewertung von konventioneller ZfP und SHM, insbesondere aufgrund fehlender fester Schwellen und der sich kontinuierlich ändernden Bedingungen, unter denen die Daten erworben wurden. Es wurde gefolgert, dass es notwendig ist Wege zu finden, die Zuverlässigkeit im SHM zu charakterisieren, Sensoren mit definierter Zuverlässigkeit zu entwickeln und zu untersuchen, wie man die POD unter wechselnden Bedingungen definiert.
- Das Thema der menschlichen Faktoren fand ein erhebliches Interesse. Themen wie Arbeitsbedingungen, Vigilanz, menschliche Redundanz und die mutmaßlichen Vorteile der mechanisierten ZfP wurden diskutiert. Die Gruppe stimmte darin überein, dass die vorhandene Forschung in der Psychologie über die Auswirkungen der Umwelt auf die menschliche Leistung zur Verfügung steht, aber in der ZfP-Gemeinschaft nahezu unbekannt ist. Zudem sind die bekannten Erkenntnisse kaum in der Praxis umgesetzt. Mechanisierte Prüfungen, die viele Vorteile mit sich bringt, kann dennoch auch zu neuen Risiken führen und ist immer noch für menschliche Fehler anfällig. Und schließlich ist es nicht bekannt, wer die Verantwortung für den Umgang mit den menschlichen Faktoren übernehmen sollte - der Betreiber, der Dienstleister oder die wissenschaftliche Gemeinschaft? Zusammenfassend zeigten die Diskussionen einige wichtige Lücken, die Aufmerksamkeit erfordern. Diese sind Lücken in der Kommunikation, Lücken im Wissen und Lücken in der Umsetzung.

Der Schwerpunkt der zweiten OST-Diskussion [3] lag auf dem ganzheitlichen Ansatz zur Zuverlässigkeit in der Praxis. Die Gruppen konzentrierten sich auf folgende Themen: grundlegende und fortschrittliche Zuverlässigkeitsansätze, menschliche Faktoren und die integrierten Lösungen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Schlussfolgerungen zusammengefasst:

- Die technische POD-Gruppe erörterte die mathematischen Anforderungen an die statistische POD-Berechnung und die Definition der Eingangsparameter für die POD. Für die Definition von "a", wenn es mehr als einen relevanten Einflussfaktor gibt, wurde ein multiparametrischer POD-Ansatz vorgeschlagen. Für die Erzeugung einer "richtigen" POD-Kurve muss die Aufmerksamkeit u.a. auf die Datenmenge (die die Vertrauensgrenzen bestimmt), die Wahl eines passenden statistischen Modells und die Unabhängigkeit der Datenpunkte gelegt werden. Ein ebenfalls diskutiertes Thema war, wie man die Wahrscheinlichkeit von Fehlalarmen in die Zuverlässigkeitsschätzung

einbezieht und wie man die in der Praxis vorhandenen Unsicherheiten in die POD-Modellierung einbezieht. Zukünftig muss besonders in den Bereichen der Einbeziehung der menschlichen Variabilität in MAPOD (Engl. *Model-assisted POD*) sowie dem Verständnis der Unterschiede in der Variabilität zwischen den Simulationen und den Experimenten gearbeitet werden.

- Die Diskussion über den Zweck der Berechnung einer POD begann mit den Anforderungen aus Vorschriften oder von Behörden und verlagerte sich auf die Themen der Schadenstoleranz-Auslegung. Die Beziehung zwischen der strukturellen Integrität und der POD wurde als entscheidend für die Sicherheit der Komponenten und der Prozesse angesehen.
- Der Umgang mit variablen Schwellwerten ist nach wie vor ein ungelöstes Thema im Bereich des Structural Health Monitoring. Um eine aussagekräftige POD in SHM zu erhalten, muss auf ein entsprechendes Design von Experimenten geachtet werden, welche, wie in den klassischen ZfP-Studien, die unterschiedliche Variabilitätsquellen berücksichtigen.
- Der Aufmerksamkeitsverlust der Prüfer im Laufe der Zeit, die Anpassung des Prüfverfahrens, sowohl für neue, als auch für erfahrene Prüfer, die Aufrechterhaltung der Wachsamkeit bei monotonen Prüfungen und das Potenzial, menschliche Faktoren in MAPOD einzubeziehen, wurden im Bereich der menschlichen Faktoren diskutiert. Re-Qualifizierungen in regelmäßigen Abständen und die Einführung der "Demonstrationsaufgabe" kurz vor der Prüfung könnten genutzt werden, um die Fähigkeiten der Prüfer aufrecht zu erhalten. Der Prüfablauf muss für den am wenigsten erfahrenen Benutzer maßgeschneidert sein, aber dabei auch so konzipiert, dass auch die erfahrenen Prüfer ihm konsequent folgen. Dies kann durch benutzerzentriertes Design erreicht werden. Es konnte bei Wachsamkeitserhaltung helfen, die Prüfer aufzufordern, geometrische Anzeigen zu melden oder Scheinanzeigen zu bewerten. Die Modellierung der menschlichen Leistung wurde von den teilnehmenden Experten als für sehr schwierig erachtet. Daher ist eine weitere Überlegung, wie man MAPOD-Ansätze realistischer macht, notwendig. Es wurde vereinbart, dass weitere Untersuchungen, aktuelle Berichte und die Stärkung der Kommunikation zwischen der ZfP-Gemeinschaft und dem Bereich der menschlichen Faktoren erforderlich sind, um die zuvor identifizierten Lücken zu schließen [2].
- Dass es einen Unterschied in Zuverlässigkeit zwischen den Experimenten und der Praxis gibt, wurde weithin anerkannt. Während experimentelle POD-Modelle nur die intrinsische Fähigkeit berücksichtigen (siehe Kapitel 1 für die Beschreibung des modularen Zuverlässigkeitsmodells), werden Anwendungsfaktoren und menschliche Faktoren nur teilweise abgedeckt. Was wir in unseren Experimenten und bei einer *Performance Demonstration* sehen, kann nur die maximale Leistung im Feld vorhersagen. Daher ist es von größter Wichtigkeit, die anderen Einflussfaktoren zu verstehen.
- Die Teilnehmer der OST-Diskussion waren sich einig, dass die ZfP-Gemeinschaft sich derzeit nicht ausreichend um die Sicherheitskultur kümmert. Sicherheitsprobleme werden zumeist erst dann aufgeworfen und untersucht, wenn etwas schiefgegangen ist. In der Regel erfolgt das durch das Sammeln und Analysieren von Daten und führt zu Änderungen an Prozessen und den Prüfanweisungen. Die ZfP-Gemeinschaft sollte jedoch versuchen, proaktive Schritte in Richtung Sicherheit zu gehen, dabei in Erwägung ziehen, was schiefgehen könnte und die notwendigen Schritte unternehmen, bevor etwas Unerwünschtes passiert. Außerdem ist es notwendig, ein derartiges Sicherheitsdenken in die organisatorische Kultur zu übernehmen.

3. Aktuelle Diskussion über die Zuverlässigkeit und die menschlichen Faktoren

Das Thema der letzten Diskussion in 2016 während der WCNDT war es, die Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Modulen des modularen Zuverlässigkeitsmodells [4], d.h. zwischen der innenwohnenden Fähigkeit, den Anwendungsparameter und den Human Factors, zu verstehen und zu bewerten.

Folgende Themen wurden diskutiert und die Schlussfolgerungen gemacht:

- Das erste Thema war die Kombination von Daten aus verschiedenen Systemen (z. B. verschiedenen ZfP-Verfahren) zu einer "aussagekräftigen" POD. Die herkömmlichen Ansätze, wie z. B. das Mischen der Daten oder das Erzielen des besseren Verfahrens als kombinierter POD, wurden als unzureichend beurteilt und stattdessen wurde eine sogenannte "modularisierte Kombination" von Daten vorgeschlagen. Der Ansatz für die Kombination könnte Inspiration aus dem MAPOD und multiparametrischen POD-Ansätzen ziehen, in denen verschiedene Parameter extrahiert und dann mit einem gemeinsamen Modell kombiniert werden.
- Darüber hinaus wurde die Interaktion zwischen Menschen und automatisierten Systemen diskutiert. Im Allgemeinen gelten automatisierte Systeme als zuverlässiger als manuelle Systeme. Allerdings sind die Menschen immer noch Teil der Systeme, da sie die Messungen auszuführen und die Daten auswerten. Dies hat sowohl Vor- als auch Nachteile. Zu den Vorteilen zählt die Fähigkeit von Menschen, Informationen aus verschiedenen Quellen zu synthetisieren und zu analysieren (z. B. verschiedene UT-Scans: A-Scan, B-Scan, C-Scan, Materialeigenschaften usw.). Allerdings werden die Menschen auch durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, wenn sie mit automatisierten Systemen arbeiten, welche die Unabhängigkeit reduzieren, die Voreingenommenheit erhöhen und die Leistung negativ beeinflussen können [7]. Es gibt verschiedene Quellen von Voreingenommenheit, z.B. Beeinflussung durch Informationen über die Komponente oder das Prüfsystem, durch eigene Erfahrungen mit dem System oder durch blindes Vertrauen in automatisierte Systeme.
- Eine weitere Frage der Gruppe war, wie die praktischen Erfahrungen der wiederkehrenden Prüfung bei der Bestimmung von POD berücksichtigt werden? Die Gruppe kam zu dem Schluss, dass, wenn die POD im Labor bestimmt wird, kein Verfahren bekannt ist, um sie quantitativ auf der Grundlage von Feldbedingungen zu modifizieren, d.h. es ist keine Übertragungsfunktion bekannt. Allerdings können die folgenden Überlegungen nützlich sein, um eine qualitative Bewertung durchzuführen und die Aspekte der Praxis zu identifizieren, welche die meiste Aufmerksamkeit erhalten sollten:
 - Das Ausmaß der Simulation der Felderfahrung: der erwartete Unterschied zwischen Labor-POD und der tatsächlicher POD, die im Feld erwartet wird, hängt davon ab, wie genau die Laborbedingungen die Feldbedingungen simulieren. Beispiele für eine gute Abstimmung sind die Durchführung von Untersuchungen an sehr realistischen Musterteilen, in einer realistischen Umgebung (gleiche Arbeitsbedingungen). Beispiele für eine schlechte Abstimmung sind in einem reinen Laborumfeld durchgeführten Qualifizierungen.
 - Die Verfügbarkeit der Ressourcen: In Praxis hat der Inspektor mehr Ressourcen zur Verfügung (kann Ratschläge abrufen oder in einem Team arbeiten)
 - Die Motivation des Prüfers im Labor vs. seiner Motivation in der Praxis

- Wie viel „qualifizierter ZfP“ vertraut werden kann, war ein weiteres Thema. Während die Qualifikation dem Prüfer eine Art "Führerschein" zur Verfügung stellt, wird die Menge und Qualität der Erfahrung bestimmen, wie er in der Praxis arbeitet. Zu diesem Zweck werden wiederholte Schulungen und Re-Qualifizierungen als vorteilhaft angesehen.
- Schließlich diskutierte eine Expertengruppe die Abhängigkeiten zwischen drei wichtigen Bestandteilen des modularen Zuverlässigkeitsmodells [4] – innewohnenden Fähigkeit, Anwendungsparameter und menschlichen Faktoren. Folgende Liste von Faktoren, die man bei der Bewertung der Zuverlässigkeit einer bestimmten Anwendung berücksichtigen werden sollen, wurde erarbeitet:
 - Abhängigkeit 1: **Innewohnende Fähigkeit ↔ Anwendungsparameter:** Die Konfiguration der Komponente, die die Zugänglichkeit für Geräte oder Prüfer, die physikalische Umgebung (z. B. das Vorhandensein von Schmutz, Temperatur), das Personal und die Ausrüstung beeinträchtigen können.
 - Abhängigkeit 2: **menschliche Faktoren ↔ Anwendungsparameter:** physikalische (z. B. Zugänglichkeit, Temperatur, Lärm, Strahlung) und das organisatorische Umfeld (persönliche Sicherheit, Management, effektive Einweisung und Nachbesprechung).
 - Abhängigkeit 3: **Innewohnende Fähigkeit ↔ menschliche Faktoren:** Ergonomie, Qualifikation, Prüfverfahren, Auswahl des Herstellers und der ZfP-Technik.

Ausblick

Die nächsten Diskussionen über dem aktuellen Stand der Bewertung der Zuverlässigkeit und der menschlichen Faktoren finden im Rahmen des „7. European-American Workshop on Reliability of NDE“ in Potsdam im September 2017 statt. Der Fokus des Workshops wurde auf die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Einflussfaktoren gelegt. Unter anderem werden folgende Themen diskutiert: der Zusammenhang zwischen der POD und Bruchmechanik für die ganzheitliche Komponentensicherheit und Integritätsbewertung; neue Herausforderungen, wie z.B. Verbundwerkstoffe, additive Fertigung, Structural Health Monitoring, Fehlergrößenbestimmung, Modellierungsansätze; Rolle der Menschen und der Organisation für die Gesamtzuverlässigkeit, usw.

Danksagung

Die Autoren möchten allen Teilnehmer der Diskussion für ihre wertvollen Einsichten und Beiträge danken. Wir danken Bernard McGrath für die Moderation der Diskussion. Eine besondere Anerkennung gilt der vor kurzem verstorbenen Dr. Christina Zanotelli (geb. Müller), der Initiatorin und treibenden Kraft der European-American Workshops on Reliability of NDE und nimmermüden Streiterin für die Sache „Zuverlässigkeit der ZfP“.

Referenzen

- [1] O. Harrison, *Open Space Technology: Ein Leitfaden für die Praxis*. Schäffer-Poeschel Verlag, 2011.
- [2] M. Bertovic, P. Calmon, L. Carter, J. Fischer, D. Forsyth, R. Holstein, B. McGrath, C. Müller, M. Pavlovic, U. Ronneteg, W. Rummel, F. Schubert, and G. Selby, “Summary

- of the ‘Open Space Technology Discussions’ on Reliability of NDE,” *Mater. Test.*, vol. 56, no. 7–8, pp. 602–606, 2014.
- [3] C. Mueller, M. Bertovic, D. Kanzler, and U. Ronneteg, “Conclusions of the 6th European American Workshop on Reliability of NDE,” *42st Annu. Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. AIP Conf. Proc.*, vol. 1706, pp. 20006-1-9, 2016.
- [4] C. Müller, M. Bertovic, M. Pavlovic, D. Kanzler, U. Ewert, J. Pitkänen, and U. Ronneteg, “Paradigm Shift in the Holistic Evaluation of the Reliability of NDE Systems,” *Mater. Test.*, vol. 55, no. 4, pp. 261–269, 2013.
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard Computer dictionary: A compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*. New York, NY, 1990.
- [6] C. Nockemann and C. Fortunko, “Summary of the workshop,” in *Proceedings of the European-American Workshop: Determination of Reliability and Validation Methods on NDE, 18-20 June 1997, Berlin, Germany*, Berlin: DGZfP, 1997, pp. 11–17.
- [7] M. Bertovic, *Human Factors in Non-Destructive Testing (NDT): Risks and Challenges of Mechanised NDT. Doctoral dissertation*. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2016.