

# Ganzheitliche Zuverlässigkeit – Prüfung von Bauteilen mit komplexer Geometrie

Christina MÜLLER, Mato PAVLOVIC, BAM, Berlin

[Christina.mueller@bam.de](mailto:Christina.mueller@bam.de) [mato.pavlovic@bam.de](mailto:mato.pavlovic@bam.de)

**Kurzfassung.** Selbst die modernsten ZfP-Systeme können, wenn sie bis an die Grenzen ihrer Möglichkeiten z. B. kleine Fehler zu finden beansprucht werden, nicht alle Fehler der gleichen Größe finden. Sogar wenn ein und derselbe Fehler mehrmals geprüft wird, wird er nicht immer gefunden. Deshalb wurde, besonders für solche Anwendungsfälle wo das Übersehen eines Fehlers zu schwerwiegenden Konsequenzen führt, das Konzept der Zuverlässigkeit der ZfP eingeführt. Das Konzept der BAM beinhaltet eine ganzheitliche Betrachtungsweise mittels eines modularen Modells. Die Hauptmodule des Modells sind die innewohnende Fähigkeit, die die physikalisch technischen Aspekte behandelt. Weiterhin werden die Einflüsse der Umgebung betrachtet, die den Prüfprozess stören, aber nicht zum Prüfsystem selbst gehören. Einen wesentlichen Aspekt, sowohl bei manuellen als auch bei mechanisierten Prüfungen stellt der menschliche Faktor dar. Die Betrachtungen im vorliegenden Artikel beziehen sich hauptsächlich auf die innewohnende Fähigkeit.

Wegen der dem Prüfprozess innewohnenden Unsicherheit wird die Leistungsfähigkeit eines ZfP-Systems durch eine Funktion POD ( $a$ ) ausgedrückt. Zu verschiedenen Fehlergrößen ( $a$ ) gehören verschiedene Fehlerauffindwahrscheinlichkeiten (POD). Die Fehlergröße ( $a$ ), bei der die untere 95 % Vertrauensgrenze das Niveau von 90 % POD schneidet wird  $a_{90/95}$  genannt. Dieser Punkt wird als Maß für das Leistungsvermögen der ZfP-Methode benutzt.

Während der letzten 10-20 Jahre wurden auf diese Weise verschiedene Inspektionssysteme für eine gewählte ZfP-Methode mit einer einfachen Anwendungsgeometrie bewertet.

Wenn man über diese einfachen Anwendungssituationen hinaus, die Zuverlässigkeit in realen industriellen Prozessen betrachtet, treten als erstes industrielle Bauteile mit komplexer Geometrie und Defekte, die mit mehr als nur einem Parameter (Größe und Tiefe, Orientierung, Oberflächenrauigkeit) charakterisiert werden müssen, auf die Tagesordnung. Neue hochentwickelte und automatisierte ZfP-Systeme, wie z. B. Ultraschallgruppenstrahler, lassen die Möglichkeit zu die Prüfungen digital aufzuzeichnen und später erst auszuwerten. Weiterhin erlauben es moderne Modellierungswerkzeuge den ZfP-Prozess zu simulieren und damit die Einflüsse der Wellenausbreitung und deren Wechselwirkung mit Defekten sowie die Wirkung der zusätzlichen Einflussparameter (z. B. Abstand vom Prüfkopf oder Orientierung) auf die POD zu untersuchen. Damit entsteht die Möglichkeit die räumliche Verteilung der POD im Prüfstück zu ermitteln – die Volumen-POD. Die Volumen-POD kann ebenso wie die konventionelle POD als Maß für die Leistungsfähigkeit des ZfP-Systems benutzt werden. Darüber hinaus kann man das ZfP-System optimieren. Wenn z. B. bestimmte Volumenelemente nur ungenügende POD-Werte aufweisen, müssen zusätzliche Prüfungen einbezogen werden. Aber auch der umgekehrte Fall, Bereiche in denen mehrere Prüfköpfe ein POD Niveau von 100 % haben und die Zahl der Prüfungen reduziert werden kann, werden mit der Volumen-POD erkannt.

## Einführung

Die stetig wachsenden Anforderungen an die Integrität stark beanspruchter Bauteile – zum Beispiel in der Luftfahrtindustrie oder im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle – stellen auch für die zerstörungsfreien Prüfsysteme eine ständige Herausforderung zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit dar. Wird das Prüfsystem bis an seine Grenzen beansprucht, zum Beispiel sehr kleine Fehler aufzufinden, dann werden nicht mehr alle Fehler gefunden. Je kleiner die Fehler, desto größer die Gefahr, dass in einer Gruppe von Fehlern gleicher Größe nicht alle gefunden werden. Auch wenn man einen bestimmten Fehler wiederholt prüft, wird er nicht jedes Mal detektiert. Deshalb hat man zur Beschreibung der Qualität der zerstörungsfreien Prüfung das Konzept der Zuverlässigkeit eingeführt. Wie bestimmt man nun diese Zuverlässigkeit?

Der modulare Ansatz bzw. die systematische Auflistung aller wesentlichen Einflussfaktoren stehen am Anfang jeder Bewertung, die jeweils spezifisch für einen industriellen bzw. Feldeinsatz angelegt wird.

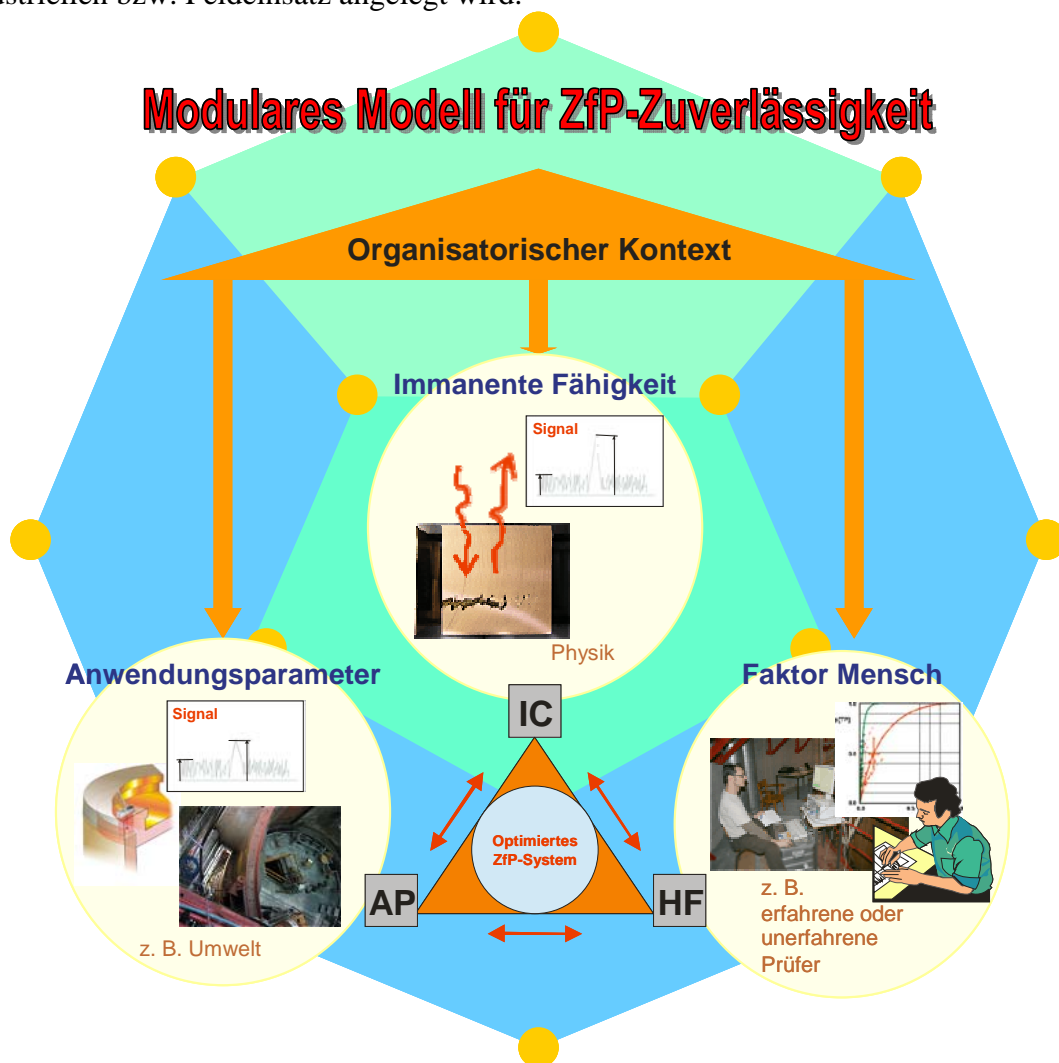
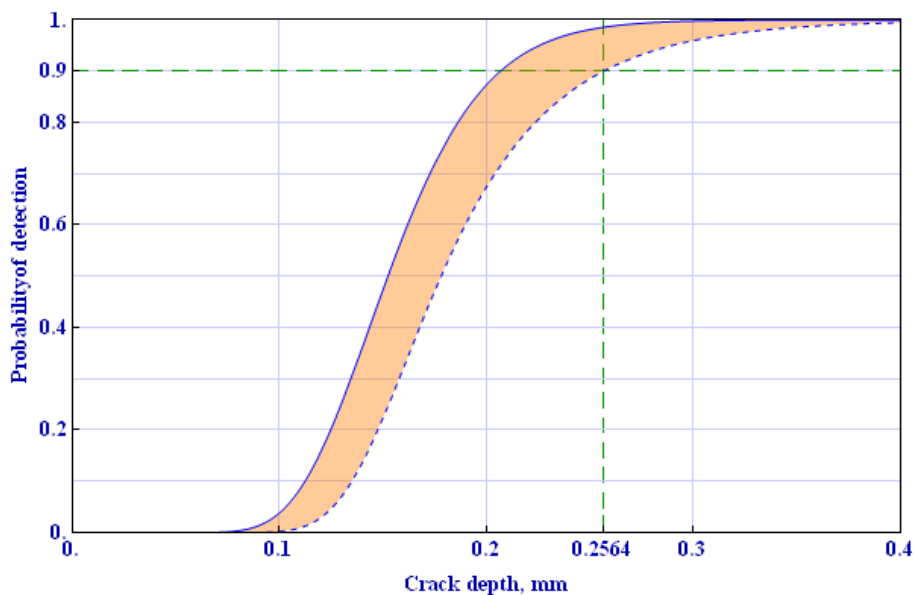


Abbildung 1: Modulares Modell für die ZfP-Zuverlässigkeit

Das modulare Modell in Abbildung 2 hilft hierbei die unterschiedliche Natur der Einflussfaktoren zu verstehen und entsprechende Maßnahmen zur Optimierung einzuleiten. Die „Innewohnende Fähigkeit“ (intrinsic capability IC) muss hierbei über physikalische Gesetze der Wellenausbreitung und Reflexion etc. sicherstellen, dass der zugrunde liegende physikalische Effekt auch ein registrierbares Signal über die Anwesenheit eines Defektes anzeigt. Die Anwendungsparameter beschreiben wie dann der „reine“ physikalische Effekt

durch die Einbettung in das industrielle Anwendungsfeld meistens abgeschwächt wird wie z. B. durch mangelnde Ankopplung oder elektronisches Rauschen der Geräte. Letztendlich wird jedes ZfP-System von Menschen bedient und die Ergebnisse durch Menschen ausgewertet, so dass der Faktor Mensch stets eine wichtige Rolle spielt. All diese Module zusammen unterliegen dem Kontext der Organisation und mehr noch – auch der Interaktion verschiedener Organisationen im Kontext der Gesellschaft [1].

Als konkrete Leistungs-Kenngröße benutzt man die Fehler-Entdeckungswahrscheinlichkeits-Kurve (POD Probability of Detection) als Funktion der Fehlergröße. In Abbildung 2 ist solch eine POD-Kurve mit dem zugehörigen 95 %-Konfidenz-Band für die Wirbelstromprüfung an dünnen Platten [2] zu sehen. Hierfür wird angenommen, dass es eine Korrelation zwischen der POD des Fehlers und seiner Größe gibt. Kennt man die kleinste Größe eines Fehlers, der entdeckt werden muss um die Integrität des Bauteils zu garantieren, auch Akzeptanzkriterium genannt, kann mit Hilfe der POD die Eignung des ZfP-Systems für die Prüfaufgabe ermittelt werden. Als Entscheidungskenngröße wird der  $a_{90/95}$ -Punkt benutzt. Das ist der Punkt bei dem das untere 95 %-Konfidenz-Band das 90 %-POD-Niveau schneidet. Wenn die Fehlergröße, die entdeckt werden muss 0,3 mm oder größer beträgt, wie in Abbildung 2 dargestellt, dann würde das System für diese Aufgabe akzeptiert werden, da  $a_{90/95}$  mit ca. 0,26 mm kleiner ist. Falls der kleinste Fehler, der entdeckt werden muss, jedoch eine Länge von 0,2 mm hätte, dann würde das ZfP-System für die vorliegende Prüfaufgabe nicht geeignet sein.



**Abbildung 2:** Konventionelle POD-Kurve (durchgezogene Linie) mit dem unteren 95% Konfidenz-Band (gestrichelte Linie). Der  $a_{90/95}$  Punkt ist der Schnittpunkt des 95 %-Konfidenzbandes mit dem 90 %-POD-Niveau.

Das hier beschriebene POD-Zuverlässigkeitsmodell wurde üblicherweise für solche Fälle angewandt, wo der wichtigste Einflussfaktor auf die POD die Fehlergröße war [3]. Die Untersuchungen im Projekt “Non-Destructive Testing Reliability” [4] haben aufgezeigt, dass noch mehr Einflussfaktoren als nur die Fehlergröße in realen industriellen Anwendungen berücksichtigt werden müssen.

## Multi-Parameter POD

In dickwandigen Komponenten mit komplexer Geometrie beeinflussen solche Faktoren wie die Fehlerposition, sein Abstand von der Oberfläche, der Winkel relative zum Prüfkopf und die Schwächung im Material alle noch seine Auffindbarkeit. Um die Einflüsse dieser Faktoren bei der Analyse der Daten von Gruppenstrahler-Prüfungen an Kupferkomponenten zu berücksichtigen, wurde ein Multi-Parameter-Zuverlässigkeitsmodell erstellt [5]. Der Einfluss der Größe, der Tiefe und der Orientierung auf die POD wurde an einigen Flachbodenbohrungen (FBH) untersucht. Die resultierenden POD-Kurven sind in Abbildung 3 dargestellt. Trotzdem die Kurven innerhalb des Multi-Parameter-POD-Modells erstellt sind, werden sie hier in der konventionellen Art mit dem  $a_{90/95}$ -Punkt als Ausdruck der Leistungsfähigkeit des ZfP-Systems dargestellt. Die relativ schmalen Konfidenzbänder zeigen, dass die Untersuchung mit einer ausreichenden großen Zahl an Testkörpern ausgeführt wurde. Die Multiparameter-POD-Analyse wurde von einer ausgereiften Computersimulation nach Böhm [5] unterstützt. In Abbildung 3 (b) ist zu sehen, dass FBHs von 2 mm mit einem Winkel zum Prüfkopf von  $6^\circ$  im Tiefenbereich von 21 bis 47 mm (Fokusbereich) gut zu finden sind.

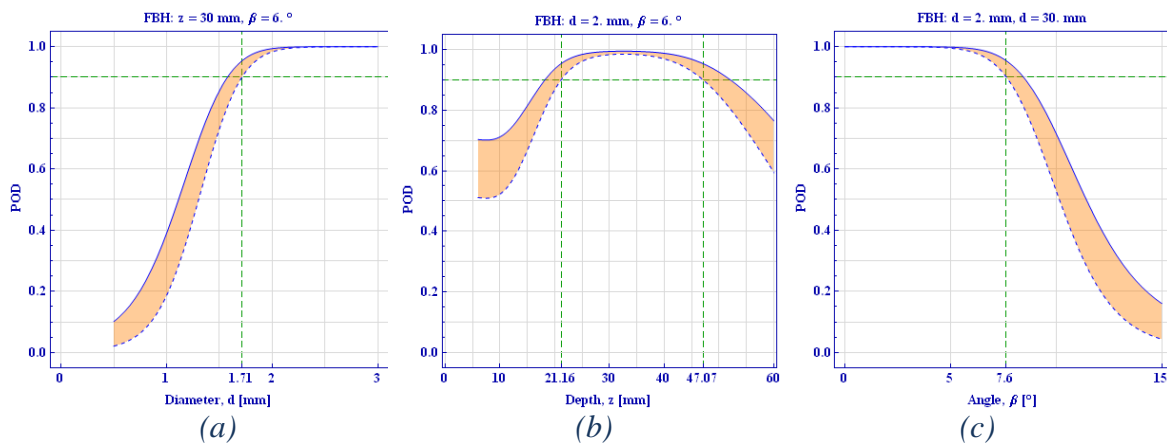
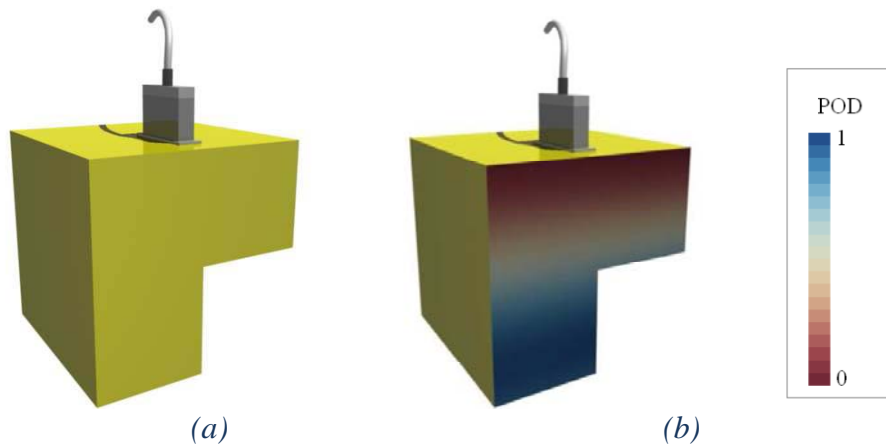


Abbildung 3: POD als Funktion von Durchmesser (a), Tiefe (b) und Winkel (c) der FBH

Kennt man den Verlauf der POD als Funktion der Tiefe (Abstand von der Oberfläche), so ist es möglich die räumliche Verteilung der POD im Bauteil, auch Volumen-POD genannt, zu bestimmen.

## Volumen POD

Wir nehmen an, dass das in Abbildung 4 (a) dargestellte Bauteil auf Fehler mit der UT-Gruppenstrahlertechnik von der oberen Oberfläche her geprüft wird. Es wurde Kontakttechnik mit fokussiertem Strahl und  $0^\circ$  Einfallswinkel angewandt. Die Prüfeempfindlichkeit ist deshalb im Fokusbereich des UT-Strahls am höchsten. Abbildung 4 (b) zeigt die räumliche Verteilung der POD der Prüfung. Wie man von Abbildung 4 (b) sehen kann, ist die POD im Bereich nahe der Oberfläche (Prüfkopf) Null und wächst dann auf den Maximalwert im Fokusgebiet an.

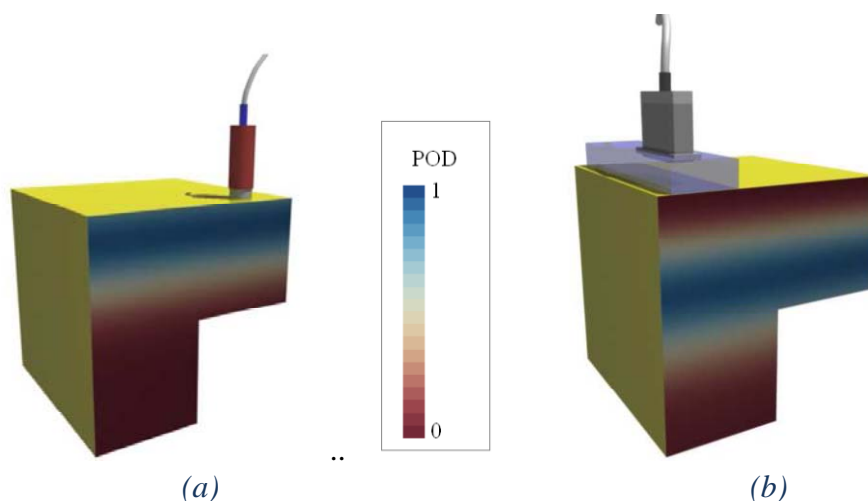


**Abbildung 4:** Ultraschallgruppenstrahler-Kontakttechnik-Prüfung des Testkörpers (a). Räumliche Verteilung der POD (b)

Diese Art der räumlichen Darstellung der POD eines ZfP-Systems hat den Vorteil dem Anwender klar die Bereiche ungenügender Abdeckung im Bauteil aufzuzeigen. Mit zunehmender Komplexität der Geometrie von Konstruktionskomponenten wächst die Bedeutung solch einer POD für die Zuverlässigkeitsbewertung.

### Prüfungen mit mehreren ZfP-Methoden

In verschiedenen Fällen werden Bauteile mit mehr als nur einer ZfP-Methode geprüft. Die Gründe für eine Mehrfachprüfung liegen oft darin, dass das gesamte Volumen des Bauteils nicht mit einer einzigen Methode oder von einer Seite abgedeckt werden kann. Bei dem Beispiel aus Abbildung 4 müsste man entweder verschiedene Prüfverfahren von unterschiedlichen Seiten ansetzen oder (und) man müsste die Konfiguration der UT-Strahlen so wählen, dass der obere Bereich und die Mitte des Bauteils genügend mit einer hohen POD abgedeckt wird. Für diesen Zweck eignet sich auch eine Prüfung mit Wirbelstrom (ET) gut, die zusätzlich sehr oberflächennahe Fehler erfasst sowie Gruppenstrahler-UT-Technik mit einem Vorlaufkeil um Fehler in der Mitte des Bauteils aufzufinden. Die Volumen-POD zur Wirbelstromprüfung ist in Abbildung 5 (a) demonstriert und die für die Gruppenstrahler-UT-Technik mit Vorlaufkeil in Abbildung 5 (b).



**Abbildung 5:** Volumen-POD für eine Wirbelstromprüfung (a) und UT-Gruppenstrahlerprüfung mit Vorlaufkeil (b)

Die drei POD-Diagramme in Abbildung 4 (b), Abbildung 5 (a) und Abbildung 5 (b) zeigen Bereiche in denen die einzelnen ZfP-Methoden jeweils eine hohe POD bezüglich des zu entdeckenden Fehlers aufweisen. Wenn wir diese drei Diagramme ansehen, können wir jedoch noch nicht sagen, ob das ganze Volumen ausreichend durch diese drei ZfP-Methoden abgedeckt ist. Ein einzelnes POD-Diagramm kann immer nur begrenzte Information über die Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden ZfP-Methode geben. Zuverlässige Information über die Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers irgendwo im Bauteil kann man nur dann geben, wenn die angewandte ZfP-Methode einen Satz von POD-Schwellwerten durchläuft. Oft wird dies nur durch eine Kombination verschiedener ZfP-Ansätze erreichbar sein, so dass der notwendige POD-Schwellwert nicht in irgendeinem Bereich des Bauteils unterschritten wird. Dies könnte man mit einer Kombination verschiedener POD-Diagramme prüfen.

### Gesamt-POD

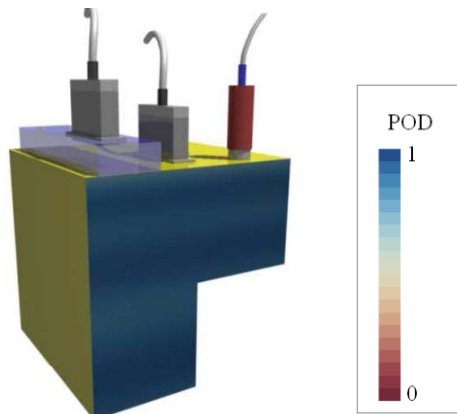
Um innerhalb eines geprüften Bauteils die Gesamt-POD eines Fehlers zu erhalten müssen die verschiedenen Einzel-PODs miteinander kombiniert werden. Wenn man die Unabhängigkeit der Einzelprüfungen voraussetzen kann, dann kann die Gesamtwahrscheinlichkeit den Fehler zu übersehen als Produkt der einzelnen Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt werden. Dies kann geschrieben werden als:

$$(1 - POD)_{Gesamt} = \prod_{i=1}^n (1 - POD_i) \quad (1)$$

wobei  $(1 - POD)_{OVERALL}$  die Gesamtwahrscheinlichkeit den Fehler zu übersehen darstellt, und  $(1 - POD_i)$  für die Einzelwahrscheinlichkeiten den Fehler zu übersehen steht, mit  $i$  als Nummer der Einzelprüfung. Gleichung (1) kann umgeschrieben werden als:

$$POD_{Gesamt} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - POD_i) \quad (2)$$

Wobei  $POD_{Gesamt}$  die Gesamtwahrscheinlichkeit den Fehler zu entdecken ist. Wenn man als ein Beispiel hierzu die einzelnen PODs aus Abbildung 4 (b) und Abbildung 5 (a) und (b), unter Benutzung von Gleichung (2) kombiniert, so entsteht die in Abbildung 6 dargestellte Gesamt-POD. Das Diagramm zeigt die Volumenverteilung der Gesamt-POD, wenn das Bauteil mit allen drei ZfP-Methoden geprüft wird. Die Gesamt-POD ist gegenüber den PODs der Einzelverfahren deutlich verbessert worden.



**Abbildung 6:** Gesamt-Volumen-POD des mit allen 3 ZfP-Verfahren geprüften Bauteils



Nun kann man das Diagramm dazu benutzen zu überprüfen, ob die ZfP-Prüfungen ausreichend die geforderten POD-Kriterien erfüllen. Ist das nicht der Fall, so kann man zusätzliche Prüfungen ansetzen bis die Kriterien erfüllt werden.

Wenn andererseits einige Prüfungen redundant sind, erkennt man es gut im Diagramm der Volumen-POD und die Zahl der Prüfungen kann reduziert werden, was Zeit und Kosten der Prüfung verringert. Die Visualisierung der POD mittels Simulation erweist sich deshalb als hochwirksames Hilfsmittel zur Optimierung eines zuverlässigen POD-Prozesses.

## **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Wenn komplexe Bauteil-Geometrien mit ZfP-Systemen geprüft werden, so beeinflussen viele Faktoren die Fehlerdetektion. Wenn mehrere Prüfmethode angesetzt werden um das Bauteil zu prüfen, ist es nicht immer leicht zu übersehen ob auch das gesamte Volumen des Bauteils ausreichend geprüft ist. Die Darstellung der Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse in Form einer Volumen-POD des Bauteils eröffnet die Möglichkeit die Bereiche im Bauteil zu identifizieren, die eine ausreichend hohe POD aufweisen. Darüber hinaus können Bereiche gefunden werden, die zu viel geprüft werden. Auf diese Weise kann die Volumen-POD als Werkzeug zur Optimierung des ZfP-Systems genutzt werden. Die hier vorgeschlagene Methode wurde bereits erfolgreich auf die Planung und Optimierung der Prüfung von Kupferkanistern für die Endlagerung radioaktiven Abfalls in Skandinavien benutzt. Die Anwendung könnte jedoch leicht auf Komponenten für beispielsweise die Luftfahrt ausgedehnt werden. Obwohl die potentielle Variation der POD heute durch die Auslegung der Sicherheitsfaktoren abgedeckt ist, könnten diese Faktoren erniedrigt werden, wenn die eingesetzten ZfP-Prozesse mit der hier beschriebenen Methode optimiert würden. Dies könnte dann eine weitere Gewichtsreduzierung künftiger Konstruktionen ermöglichen.

## **Danksagung**

Die Autoren möchten sich bei Rainer Böhm (BAM Berlin) für die Bereitstellung von Ultraschallsimulationen bedanken und bei Ulf Ronneteg (SKB Schweden) für das zur Verfügung stellen von Prüfdaten an Kupferkanistern. Herrn Professor Vladimir Spokoyny (Humboldt Universität und WIAS Berlin) und Herrn Professor Christian Boller (IZfP Saarbrücken) sei für die hilfreichen Hinweise gedankt. Frau Martina Rosenthal danken wir für die Unterstützung bei der graphischen Gestaltung des Artikels.

## **Referenzen**

- 
- [1] Wilpert, B. & Fahlbruch, B. (1998). Safety related interventions in inter-organisational fields. In A. Hale & M. Baram (Eds.), Safety Management: The challenge of change (pp. 235-248). Amsterdam: Elsevier.
  - [2] Berens A P, "NDE Reliability Data Analysis", ASM Metals Handbook, Volume 17, 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control, Materials Park, Ohio, ASM International, 1988
  - [3] MIL-HDBK-1823, Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, United States, 1999
  - [4] Pavlovic M, Takahashi K, Müller C, Boehm R and Ronneteg U, "NDT reliability – Final report, Reliability in non-destructive testing (NDT) of the canister components," SKB Technical report R-08-129, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Oskarshamn, 2008
  - [5] Pavlovic M, Takahashi K, Ronneteg U, Pitkänen J, Müller C, "Multi-Parameter Influence on the Response of the Flaw to the Phased Array Ultrasonic NDT System. The Volume POD.", 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, Berlin, 2009