

# Ultraschall-Tauchtankprüfung von Stangen für Luftfahrt-Anwendungen

Wolfram A. Karl DEUTSCH \*, Markus STAHLBERG \*\*, Rainer KATTWINKEL \*,  
Michael JOSWIG \*, Markus RÖDDING \*\*\*

\* KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Otto-Hausmann-Ring 101,  
42115 Wuppertal

\*\* VDM Metals GmbH, Formerstr. 17, 59425 Unna

\*\*\* VDM Metals GmbH, Kleffstr. 23, 58762 Altena

**Kurzfassung.** Am Standort Unna hat die VDM Metals GmbH in eine neue Fertigungslinie investiert, die eine hochwertige Produktion von Titan- und Nickelbasis-Werkstoffen für Endkunden aus dem Luftfahrt-Segment ermöglicht. Ebenfalls wurde auch in eine neue Ultraschall-Prüfanlage zur Prüfung von Stangen investiert.

Stangendurchmesser zwischen 90 und 405 mm, Längen zwischen 900 und 6000 mm, Stückgewichte bis 4 Tonnen und eine hochpräzise Prüfmechanik gehörten zum Pflichtenheft. Die Prüfung solcher Stangen erfolgt in Tauchttechnik und in der Regel in Senkrecht-Einschallung. Gemäß vieler wichtiger Luftfahrtspezifikationen beträgt die Prüfempfindlichkeit bis hinunter zu 0,4 mm KSR. Die Stangen werden dafür in diverse Tiefenzonen eingeteilt. Für vier Durchmesserbereiche werden vier bis sieben Tiefenzonen definiert. Für jede Tiefenzone kommt ein stark fokussierter Prüfkopf zum Einsatz, der eine solch hohe Prüfempfindlichkeit ermöglicht.

Da eine Fertigung von 0,4 mm KSR mechanisch schwierig ist, wird zur Justierung der Prüfanlage mit Flachboden-Bohrungen von 0,8 mm KSR gearbeitet. Entsprechende Empfindlichkeitszuschläge liefern dann die gewünschte Prüfempfindlichkeit. Für die vier Durchmesserbereiche kommt jeweils ein Testkörper zum Einsatz, der pro Tiefenzone drei Reflektoren (KSR) enthält. Die Prüfmaschine verfügt über entsprechende Fahrprogramme, sodass alle Prüfköpfe die jeweils für sie relevanten Reflektoren überfahren. Die maximalen Echohöhen werden pro Reflektor ermittelt und die Empfindlichkeitskurven (TCG = Time Corrected Gain) daraus in automatisierter Form ermittelt.

Die Prüfergebnisse werden in C-Bild-Form aufbereitet. Dabei wurden vielfältige Darstellungsmöglichkeiten realisiert. Summenergebnisse oder Prüfergebnisse getrennt pro Tiefenzone können zur Bewertung der Stangen heran gezogen werden. Gängige Spezifikationen der Luftfahrtindustrie (u.a. SAE AMS 2628, SAE AMS-STD-2154, SNECMA DMC, MTU MTV 1033) werden mit der Anlage umgesetzt.

## Prüfmechanik

Für Stückgewichte bis 4 Tonnen, Bauteildurchmesser zwischen 90 mm und 405 mm und Bauteillängen zwischen 0,9 m und 6 m wurde ein großer Prüftank mit den Abmessungen von 10,1 m x 2,3 m realisiert. Das Gewicht der Prüfmechanik beträgt ca. 20 t ohne Wasser. Die Befüllung erfolgt mit 30 m<sup>3</sup> Wasser, welches durch eine 45-kW-Heizung auf eine konstante Temperatur von 25 °C gebracht wird. Ein Kreislaufsystem sorgt für sauberes und blasenfreies Wasser.





**Abb. 1.** Gesamtansicht der Tauchtank-Prüfanlage für Luftfahrt-Anwendungen bei der VDM Metals GmbH in Unna.

Die Rundstangen werden auf Drehrollenstationen mit gummierten Auflagerollen positioniert. Linksbündig ist eine feste Drehrollenstation mit Anschlag montiert. Eine fahrbare Drehrollenstation nimmt das rechte Stangenende auf. Um eine Durchbiegung langer Stangen zu verhindern, kann eine dritte Station in die Stangenmitte gefahren werden.

Die Prüfkopfhalter sind an robusten Linearführungen angebracht. Die Höhenverstellung erfolgt entsprechend der Stangendurchmesser und der nach aktueller Luftfahrt-Norm geforderten Wasservorlaufstrecke. Rotierende Stangen und eine Linearbewegung der Prüfköpfe entlang des Tanks ergeben schraubenförmige Prüfspuren mit vollständiger Volumenerfassung.

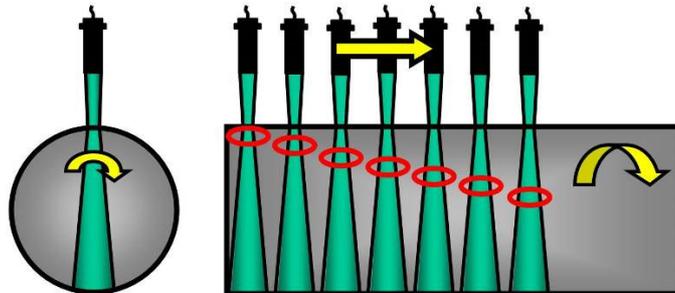
Gängige Luftfahrtnormen schreiben eine extreme Genauigkeit der Prüfmechanik vor. Die Achsenparallelität, die Rechtwinkligkeit und die Anfahrngenauigkeit der Prüfköpfe wurden aufwändig ermittelt und protokolliert, um einer NADCAP-Auditierung standzuhalten.



**Abb. 2.** Prüfkopfhalterungen oberhalb eines runden Testköpers mit einer Länge von ca 1,5 m. Bei solch kurzen Bauteillängen sind nur zwei der drei verfügbaren Drehrollenstationen im Einsatz. Durch gummierte Auflagerollen werden Beschädigungen der Bauteiloberflächen vermieden.

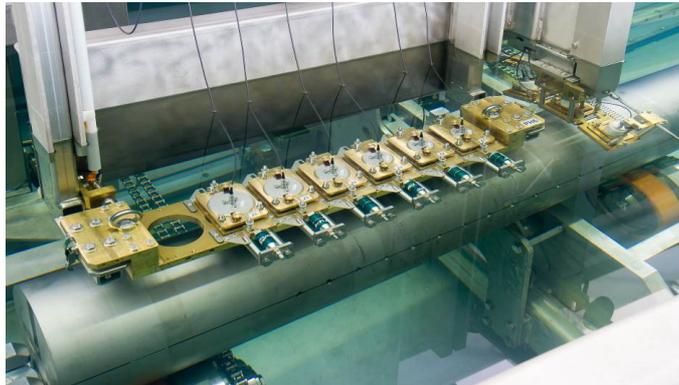
## Prüfprinzip

In der Luftfahrtindustrie sind hohe Anforderungen an die Prüfempfindlichkeit sehr gängig. Reflektoren bis 0,4 mm KSR sind in den schärfsten Prüfklassen zu detektieren. Dies ist nur mit der sogenannten Multizonen-Prüfung möglich. Je nach Stangendurchmesser werden vier bis sieben Tiefenzonen definiert, welche jeweils durch einen hochfokussierten Senkrecht-Prüfkopf erfasst werden.



**Abb. 3.** Die Stangen werden mit schraubenförmigen Prüfspuren geprüft. Pro Tiefenzone kommt ein Spezial-Prüfkopf mit extremem Fokus zum Einsatz. Bei den Stangen mit großen Durchmessern (bis 405 mm) wird mit sieben Tiefenzonen gearbeitet.

Eine schnelle Umrüstung zwischen verschiedenen Abmessungsbereichen wird durch Prüfkopfhalter mit Schnellwechsel-Vorrichtung möglich. Zwei von Hand zu lösende Klemmen entriegeln den Prüfkopfhalter und machen den Krantransport (siehe auch die Kranösen) möglich.



**Abb. 4.** Prüfkopfhalter mit sechs Senkrecht-Prüfköpfen oberhalb einer Teststange mit künstlichen Fehlstellen.

Insgesamt sind vier Prüfkopfhalter zur Multizonen-Prüfung verfügbar (mit 4, 5, 6 bzw. 7 Fokus-Senkrechtprüfköpfen).

Ein weiterer (nicht wechselbarer) Prüfkopfhalter ermöglicht die Winkeleinschallung in beide Umfangsrichtungen und eine Überwachung der Rückwandecho-Amplitude. Hierzu sind drei zusätzliche Prüfköpfe im Einsatz. Die Winkel-Prüfköpfe müssen bzgl. ihres Einschallwinkels einstellbar sein, um für alle Stangendurchmesser einen Prüfwinkel von jeweils  $\pm 45^\circ$  zu erhalten.



**Abb. 5.** Die Prüfanlage verfügt über vier Prüfkopfhalter mit Senkrecht-Prüfköpfen, die über eine Schnellwechsel-Vorrichtung getauscht werden können. Im Bild sind vorne rechts die drei Prüfkopfhalter zu sehen, die gerade nicht in Verwendung sind.



**Abb. 6.** Ein weiterer Prüfkopfhalter (rechts im Bild) enthält die beiden Winkel-Prüfköpfe zur Detektion oberflächen-naher Fehlstellen und einen Senkrecht-Prüfkopf zur ständigen Überwachung des Rückwandechos.

## Prüfempfindlichkeit

Die geforderte Prüfempfindlichkeit von bis 0,4 mm KSR wird über erodierte Reflektoren mit einer Größe von 0,8 mm KSR mit entsprechenden Empfindlichkeitszuschlägen eingestellt und regelmäßig überprüft. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten. An runden Testkörpern wurden Reflektoren (0,8 mm KSR) in verschiedenen Tiefenlagen eingebracht. Die jeweils für die Tiefenzone zuständigen Prüfköpfe überfahren die Reflektoren und ermöglichen eine automatisierte Aufnahme der DAC-Kurve (bzw. TCG-Kurve). Die Anlagensteuerung wurde mit entsprechenden Fahrprogrammen ausgestattet, um diesen Vorgang komplett zu automatisieren. Ist die Anlage dann prüfbereit, werden die runden Testkörper entnommen und der Prüfbetrieb startet. Alle zwei Stunden fährt der Prüfkopfhalter über eine Testkörper-Halterung (nach ASTM E428). Hier sind zertifizierte Testkörper verbaut, die ebenfalls 0,8 mm KSR in verschiedenen Tiefenlagen aufweisen. Je nach Material (Titan oder Nickelbasis-Werkstoff) sind zwei solche Testkörper-Halterungen verfügbar und ebenfalls schnell zu wechseln.



**Abb. 7.** In der Null-Position des Prüftanks werden diese Testkörper-Halterungen alle zwei Stunden überfahren, um die Stabilität der Prüfempfindlichkeit zu verifizieren.

Um eine solch hohe Prüfempfindlichkeit zu realisieren, muss eine leistungsfähige Prüfelektronik zum Einsatz kommen. Die folgende Abbildung zeigt das rauscharme A-Bild einer ECHOGRAPH 1155-Prüfelektronik.



**Abb. 8.** Prüfergebnis als A-Bild einer Flachboden-Bohrung mit 0,8 mm mit sehr gutem Signal-Rausch-Abstand (Stangen-Durchmesser 203 mm, Fehlertiefe 97 mm). Am linken Rand des A-Bilds sieht man das Eintrittsecho, welches mit einer (blauen) Blende ständig überwacht wird. Zur Einbringung der 0,8-mm-Reflektoren wird mit größerem Durchmesser vorgebohrt. Diese große Bohrung erscheint am rechten Rand des A-Bilds mit einer Amplitude deutlich über 100% Bildschirmhöhe (dritte blaue Blende).

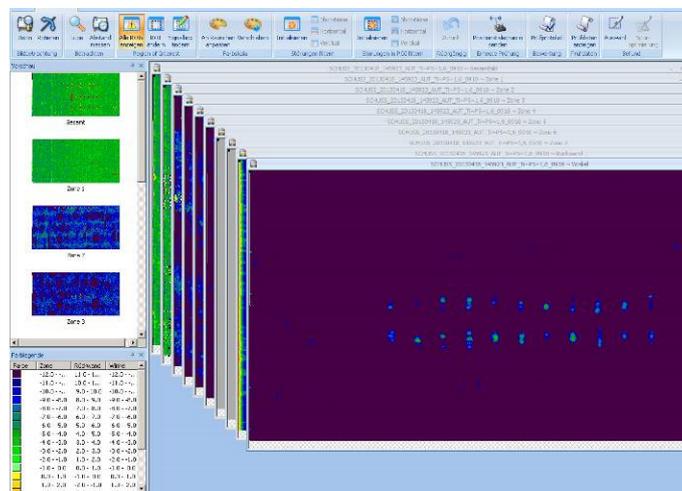
## Darstellung der Prüfergebnisse

Viele Prüfaufgaben an Langprodukten verzichten auf eine ausführliche Ergebnisdarstellung. In diesen Fällen werden die Amplituden über der Bauteillänge aufgetragen. Auf Kundenwunsch und z.B. bei Einsatz verschiedener Prüfwinkel können die Prüfaufgaben getrennt dokumentiert werden.



**Abb. 9.** Die Prüfergebnisse werden als Amplitudenschrieb getrennt nach Prüfaufgabe aufgetragen. Die X-Achse entspricht der Stangenlänge in Metern. Pro Schrieb sind die Bereiche oberhalb der Fehlerschwellen rot hinterlegt. In diesem Beispiel sind sieben Tiefenzonen zu sehen (davon vier aktiv). Die Anzeigen vieler Bohrungen in der Teststange sind gut sichtbar. Die Überwachung des Rückwandechos mit einem konventionellen Senkrecht-Prüfkopf ist in grüner Farbe zu sehen. Die Ergebnisse beider Winkel-Prüfköpfe ( $\pm 45^\circ$ ) werden gemeinsam in blau aufgetragen.

Bei großen Durchmessern und bei erhöhten Bauteilanforderungen macht die Auswertung der Prüfergebnisse in C-Bild-Form Sinn. Die Oberfläche des Bauteils kann als Abwicklung (Y-Achse für Umfangsrichtung, X-Achse für Stangenlänge) betrachtet werden. Das gesamte Bauteilvolumen und die Fehlerpositionen werden auf diese Weise übersichtlich dargestellt. Die Farbzuoordnung ist einstellbar und erlaubt die schnelle Bewertung des Signal-Rausch-Verhältnisses.



**Abb. 10.** Pro Prüfaufgabe sind die Prüfergebnisse als C-Bilder (Draufsicht auf Stangenoberfläche, getrennt nach Tiefenzone) verfügbar. Die Farbzuoordnung (links unten) ist einstellbar, um den Dynamikbereich optimal anzupassen. Ein Gesamt-C-Bild aller Prüfaufgaben erlaubt einen schnellen Überblick.

Die Schussdichte ist exakt mit der Bauteildrehung und dem linearen Prüfkopfvorschub synchronisiert. Jedes Pixel im C-Bild repräsentiert somit ein definiertes Prüfvolumen. Die Überwachung einer 12-Uhr-Markierung ermöglicht eine Korrektur, falls Schlupf in Umfangsrichtung auftritt. Detektierte Fehlstellen werden in einer Fehlertabelle zusammengetragen. Die exakte Fehlerposition, die Größe, die Tiefenlage und die Amplitude bezogen auf die eingestellte Fehlerschwelle werden tabelliert. Im Zweifelsfall wurde eine „Return-to-Defect“-Funktion realisiert, d.h. die Prüfköpfe fahren automatisch an die Position mit einer grenzwertigen Fehleranzeige.

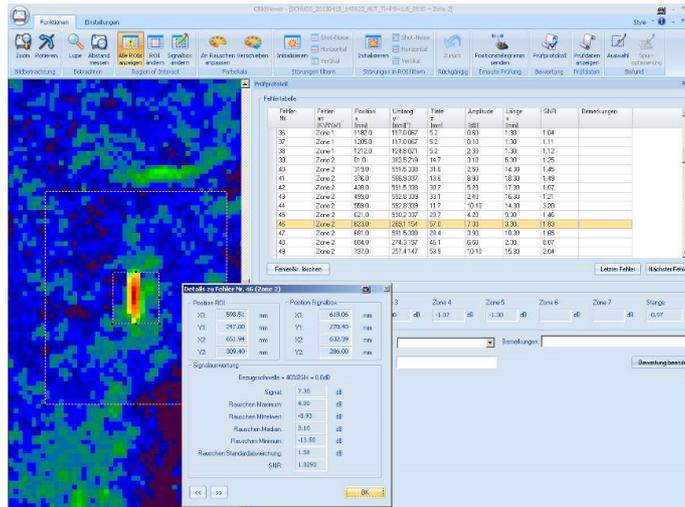


Abb. 11. Tabelle für die detektierten Reflektoren. Pro Reflektor sind weitere Detailinformationen hinterlegt.

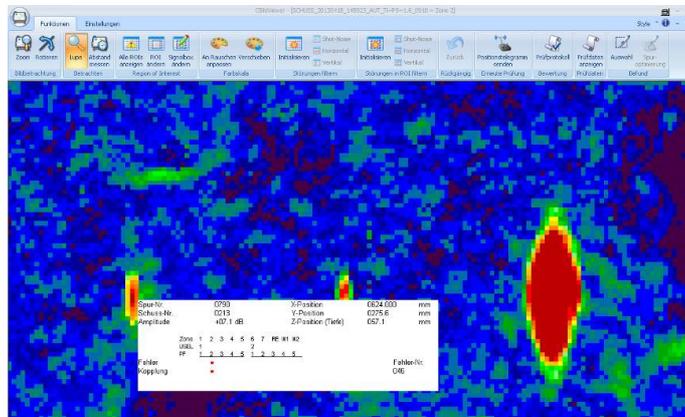


Abb. 12. Auswertung eines Reflektors (eine der drei im C-Bild-Ausschnitt sichtbaren Flachbodenbohrungen). Jeder Schuss ist genau zuzuordnen (Beispiel Schuss-Nummer 0213). Die Angabe der Amplitude erfolgt in dB relativ zur eingestellten Schwelle (Beispiel + 7,1 dB). Die Fehlerposition in Achsrichtung, Umfangsrichtung und Tiefenlage wird in mm angegeben. Der Prüfkopf (bis zu 10 Prüfköpfe sind parallel im Einsatz), welcher die Fehlstelle zur Anzeige brachte, wird über einen roten Punkt markiert (Beispiel: Prüfkopf 2 für Tiefenzone 2).

Um eine unverwechselbare Zuordnung von Befunden und Bauteilen zu erhalten, kommt ein Barcode-Scanner zum Einsatz. Die Bauteilkennung wird dann mit den Befunden in ein gemeinsames Protokoll überführt. Eine papierlose und lückenlose Einzelverfolgung pro Stange ist hiermit gewährleistet.



Abb. 13. Barcode-Scanner

Die Nachprüfung der Stangen kann außerhalb des Prüftanks mit mobilen Ultraschallgeräten vom Typ ECHOGRAPH 1090 vorgenommen werden.

## Logistik

Die hohe Präzision und die großen Abmessungen der Prüfmechanik stellen an die Konstruktion hohe Anforderungen. Bereits in der Konstruktionsphase wurde auch der Transport der Prüfmaschine bedacht. Der Prüftank muss dabei in einem Stück auf einen Lastwagen passen.



Abb. 14. Abtransport ab KARL DEUTSCH Werk 2 in Wuppertal.



Abb. 15. Aufstellung der Prüfmechanik bei der VDM Metals GmbH in Unna.

## Referenzen

Luftfahrtnormen SAE AMS 2628, SAE AMS-STD-2154, SNECMA DMC, MTU MTV 1033