

# U-Boot Stutzenmanipulator (Nozzle Pipe Manipulator)

F. SENNE, G. HÜNIES, F. MOHR  
intelligeNDT Systems & Services GmbH, Erlangen  
AREVA NDE-Solutions

**Kurzfassung.** Die intelligenteNDT Systems & Services GmbH, die deutsche Vertretung der AREVA NDE-Solutions, hat bereits zahlreiche RDB-Prüfungen in kerntechnischen Anlagen, sowohl in Siedewasser- als auch in Druckwasserreaktoren (SWR & DWR) durchgeführt. In den späten 1990ern forderten schwedische und finnische Betreiber, dass der Teilbereich Stutzenprüfung vom Stutzeninneren aus durchgeführt werden sollte. Dies gab den Anstoß zur Entwicklung des AREVA U-Boot Stutzenmanipulators „Fozzie“.

Der Fozzie wurde für die Prüfung aller Stutzenschweißnähte, einschließlich der Stutzeninnenkante, Rohranschlussnaht und Mischnaht am Stutzen sowie der plattierten Oberfläche des Stutzens, mittels Ultraschall oder Wirbelstrom qualifiziert. Das Design war so flexibel, dass es die kleineren Stutzendurchmesser von Siedewasserreaktoren ebenso abdecken konnte wie viele der größeren Stutzendurchmesser von Druckwasserreaktoren.

Heutzutage steigt der Bedarf an einem Gerät für die alleinige Durchführung von RDB-Stutzenprüfungen. Natürlich gibt es eine große Auswahl an Systemen für die komplette RDB-Prüfung, doch deren Nutzung ist bei kleineren Prüfumfängen, im Vergleich zu einfacheren Geräten, für die reine Stutzenprüfung nicht kosteneffizient. Der neue Nozzle Pipe Manipulator (NPM) ist eine Weiterentwicklung des bestehenden Fozzie-Manipulators, die eine noch größere Bandbreite an Stutzen und Behältern abdeckt.

Eine wichtige Überlegung bei der neuen Entwicklung war, die Nutzung des Portalkrans und anderer Beförderungsmittel einzuschränken. Zusätzlich sollte es möglich sein, alle existierenden Fozzie-Prüfbereiche auch mit dem neuen Gerät und darüber hinaus eine größere Bandbreite an Stutzendurchmessern abzudecken.

Vorteile des neuen NPM sind schnellere und kostengünstigere Stutzenprüfungen mit geringerem Personalaufwand.

Falls nötig, kann die Beckenbelegungsdauer einer kompletten RDB-Prüfung ebenfalls reduziert werden, indem parallel zum Einsatz eines anderen Systems an den Behälterwänden der NPM in den Stutzen eingesetzt wird.

Dieses neue Gerät in der AREVA U-Boot-Flotte wird mit neuester Technologie helfen, Prüfzeit und -kosten zu sparen. Es erweitert dadurch AREVA's Portfolio höchst zuverlässiger Prüfgeräte.

## Einführung.

Als eines der führenden Unternehmen im Bereich des Baus und der Instandhaltung von Kernkraftwerken legt AREVA großen Wert auf Qualität und Sicherheit in allen Bereichen des täglichen Geschäfts. Die primären, druckführenden Komponenten kerntechnischer Anlagen erfordern erstmalig nach der Installation, während der gesamten Betriebsdauer regelmäßig wiederkehrend und nach jeder Reparatur Prüfungen, um ein hohes Qualitätsniveau und die Integrität der Systeme sicherzustellen. Für diese Komponenten sind die Anforderungen genau definiert und werden von den zuständigen Behörden streng



kontrolliert. Zerstörungsfreie Prüfungen (zfP) spielen eine entscheidende Rolle für die Qualitäts- und Sicherheitsnachweise, welche in den Anlagen durchgeführt werden.

Jede zfP-Einheit innerhalb der AREVA verfügt über eine langjährige Erfahrung in diesem Bereich und über einen umfassenden Gerätepark zur Prüfung verschiedenster Komponenten von Eigen- und Fremdanlagen. Um dieses Know-How zu bündeln und dadurch Vorteile für unsere weltweiten Kunden zu generieren, wurden die zfP-Aktivitäten innerhalb der AREVA im Jahr 2010 unter dem Namen „AREVA NDE-Solutions“ zusammengefasst (Abb. 1).

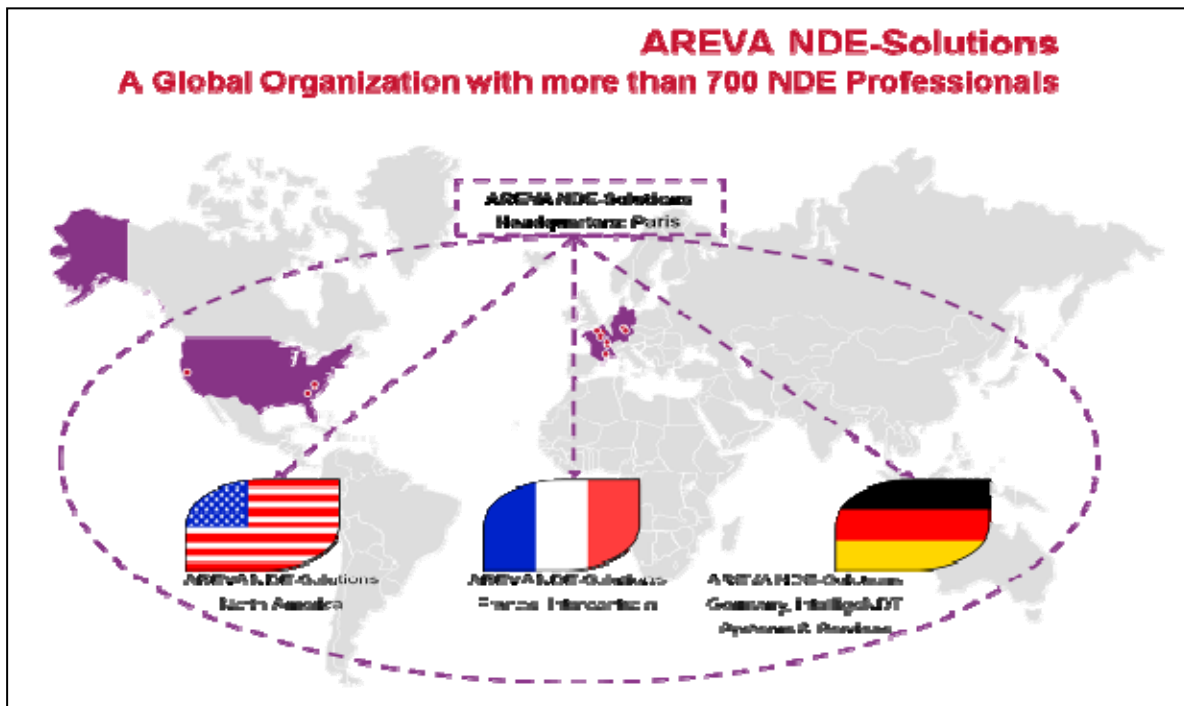


Abb. 1: AREVA NDE-Solutions – eine globale Organisation

Innerhalb dieser Organisation sind viele Ingenieure, Wissenschaftler und Experten tätig, die teilweise mehr als 30 Jahre Erfahrung im Bereich der zerstörungsfreien Prüfungen in Kernkraftwerken verschiedener Herstellern haben. Diese Kompetenzen werden genutzt, um die Revisionsabläufe weiter hinsichtlich Effizienz, Sicherheit und Dosis zu optimieren.

### Hintergrund:

In der Vergangenheit wurden die Stützen am Reaktordruckbehälter (RDB) meist im gleichen Zyklus wie der RDB selbst geprüft, da dies Teil des gesamten Prüfumfanges war und mit demselben Gerätesystem geprüft wurde. Der dafür eingesetzte Zentralmastmanipulator (ZMM) ist durch seine universelle Ausstattung sehr umfangreich, weshalb Aufbau und Installation im Reaktor einen hohen Zeit- und Personalaufwand erfordern (Abb. 2). Für eine Komplettprüfung des RDB's ist dies jedoch die wirtschaftlichste Alternative.

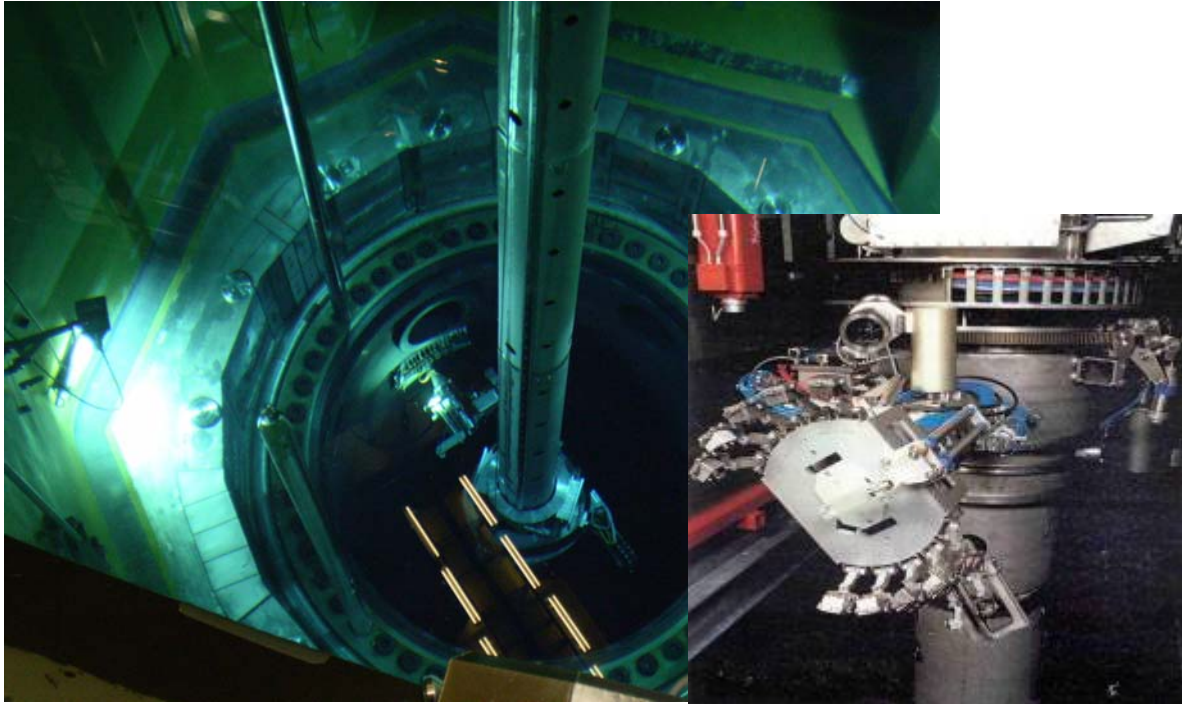


Abb. 2: ZMM für RDB-Gesamtprüfung (links) und das Stützenprüfsystem des ZMM (rechts)

Teilweise wurde jedoch das Regelwerk dahingehend geändert, dass die Prüfintervalle des Behälters und der Stützen nun divergieren und die Stützen in kürzeren Abständen zu prüfen sind. Darüber hinaus sind Stützen mit Befunden bekannt, welche in noch kürzeren Intervallen zu prüfen sind, um diese zu überwachen. Für diese Anwendung wird ein Manipulatorsystem benötigt, mit dem die Prüfstellen an den Stützen effizient und schnell geprüft werden können. Um das zu erreichen muss der Manipulator folgende Kriterien erfüllen:

- Minimale Nutzung des Portalkrans
- Selbstständige Verfahbarkeit im Becken
- Abdeckung einer Vielzahl von Stützendurchmessern
- Einfache Handhabung durch ein kleines Team
- Leichte Dekontamination des Gerätes

Darüber hinaus muss der Manipulator so konstruiert werden, dass er sowohl für verschiedene Prüfverfahren geeignet ist und gleichzeitig verschiedenen Regelwerken gerecht wird.

### **Umsetzung.**

In den späten 1990er Jahren entstand durch die Betreiber von schwedischen und finnischen Siedewasserreaktoren die Nachfrage, RDB-Stützen vom Inneren aus zu prüfen. Die Prüfung sollte unter Wasser mit einem einfacheren Gerät erfolgen. Der Portalkran sollte ebenfalls während der Prüfung nicht durchgehend benötigt werden, um die parallele Durchführung weiterer Revisionstätigkeiten zu ermöglichen. Gemeinsam mit unseren Kunden hat der deutsche Teil der AREVA NDE-Solutions, intelligenteNDT Systems & Services GmbH, einen reinen Stützenprüfmanipulator mit dem Namen „Fozzie A“ entwickelt (Abb. 3). Der Manipulator wurde im Erlanger Labor hergestellt und getestet. Der Fozzie A wurde nach schwedischem und finnischem Regelwerk für eine Stützenprüfung von innen mit Ultraschall und Wirbelstrom qualifiziert. Der Prüfbereich ist durchgehend

von der Rohranschlussnaht über die Mischnaht, die Stutzeninnenkante bis zur Stutzeinschweißnaht (Abb. 4). Das Design ist so flexibel, dass es die kleineren Durchmesser von Siedewasserreaktoren (SWR) ebenso wie viele der größeren Durchmesser von Druckwasserreaktoren (DWR) abdecken kann.

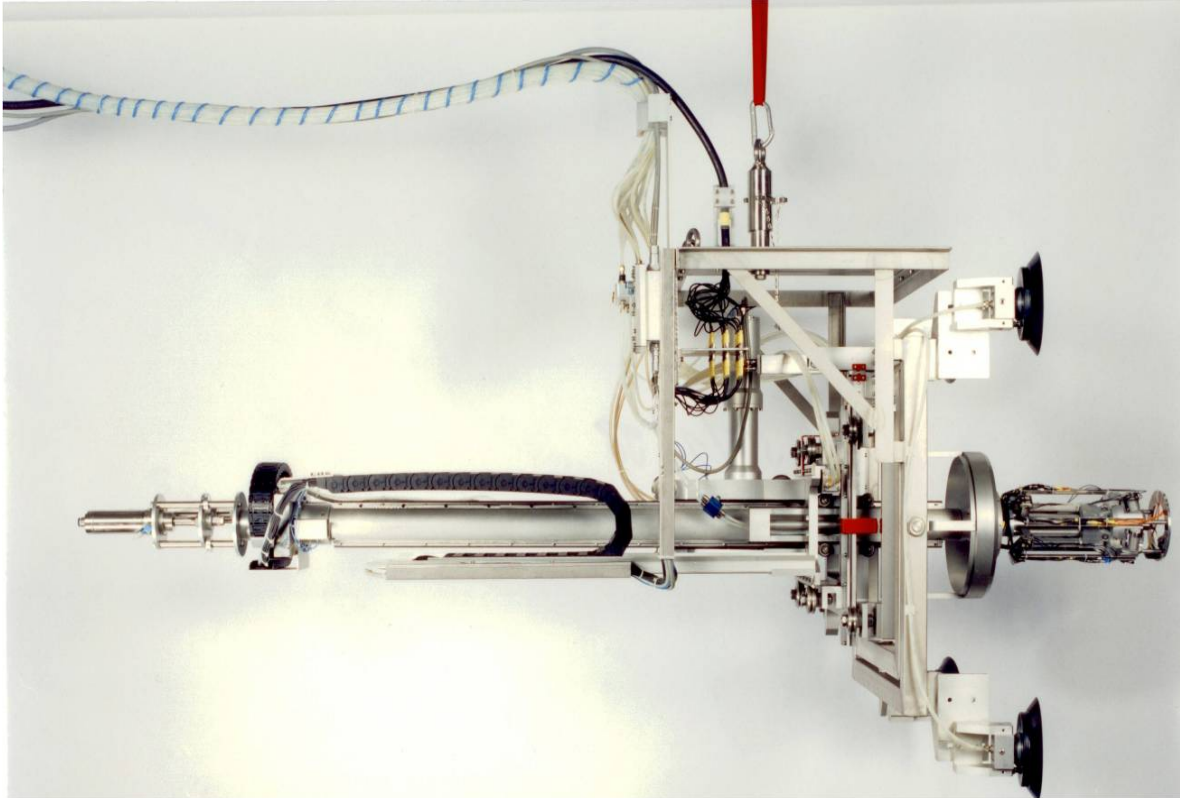


Abb. 3: FOZZIE A

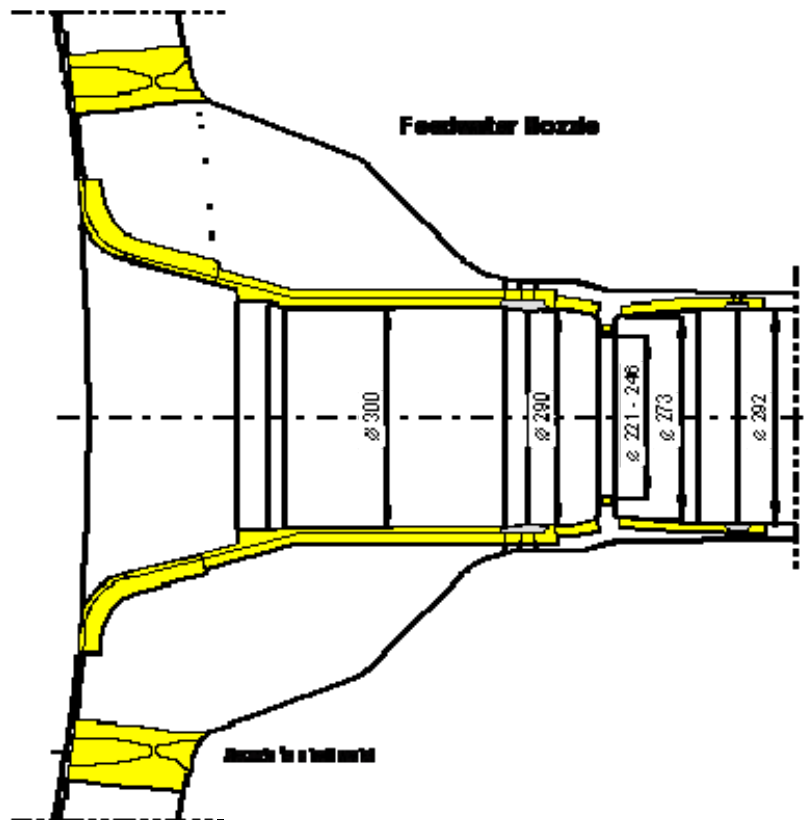


Abb. 4: Mögliche Prüfbereiche eines Speisewasserstutzens

Nach erfolgreicher Prüfdurchführung in Schweden und Finnland wurden die gewonnenen Erfahrungen in einem zweiten Prüfgerät mit nochmals verbesserten Eigenschaften umgesetzt. Dieses Gerät wurde „Fozzie 2“ getauft.

### Entwicklung des NPM.

In den letzten Jahren wurden im Zuge weltweiter Laufzeitverlängerungsprogramme Berechnungen der mechanischen Belastung der Primärkreis Komponenten angestellt. Diese Modellergebnisse haben gezeigt, dass die Stutzen im Bereich der Stutzeninnenkante und der Misch- und Rohranschlussnaht einer hohen Belastung ausgesetzt sind. In dieses Ergebnis fließen nicht nur die kleineren Stutzen von typischen deutschen SWR ein, sondern auch die größeren DWR Stutzen. Daher sind mehr Stutzenprüfungen nötig. Im Widerspruch hierzu steht das wirtschaftliche Interesse der Betreiber, die Revisionszeiten nicht zu verlängern und die bereits geplanten Aktivitäten im Becken nicht zu behindern. Eine erhebliche Einschränkung für parallel stattfindende Arbeiten ist die Abhängigkeit von Auslegern und Kränen. Gleichzeitig haben wir festgestellt, dass mit dem U-Boot SUSI sehr erfolgreich Ultraschallprüfungen an verschiedenen Kerneinbauten und -behältern komplett unabhängig von diesen Anlagenressourcen durchgeführt werden können. Diese Entwicklung hat das Vorhaben beschleunigt, die FOZZIE Manipulatorfamilie um einen neuen schwimmenden Stutzenmanipulator, entwickelt auf Basis der mit dem FOZZIE (Abb. 5) und dem U-Boot SUSI (Abb. 6) gemachten Erfahrungen, zu erweitern.



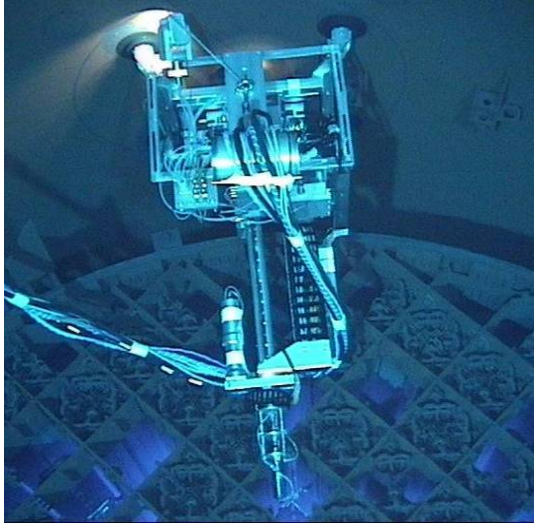


Abb. 5: FOZZIE A im Einsatz



Abb. 6: SUSI im Einsatz

Der neue Nozzle Pipe Manipulator (NPM) vereint die Vorzüge beider Systeme und wurde bereits erfolgreich qualifiziert und eingesetzt. Er ist für die Prüfung von EPR-, DWR- und SWR-Anlagen vorgesehen. Folgende Prüfbereiche werden abgedeckt:

- Stutzeneinschweißnaht
- Stutzeninnenkante
- Plattierte Oberfläche
- Mischnaht am Stutzen
- Rohranschlussnaht

Die Konstruktion ist schwerpunktmäßig auf eine Optimierung der Revisionstätigkeiten ausgelegt. Während der Prüfung werden weder die Hilfsbrücke, die Lademaschine noch der Portalkran benötigt, sofern der Wasserstand oberhalb des Stutzens ist. Der NPM kann ferngesteuert von einem U-Boot Piloten von Stutzen zu Stutzen navigiert werden. Auch die Prüfung von J-Groove Schweißnähten im RDB-Zylinder (nicht jedoch die Kerninstrumentierungsstutzen) sowie die Innenfläche des Zylinders mittels eines XY-Adapters ist möglich. Besondere Konstruktionsmerkmale des NPM sind u. a.:

- Kameras zur Überwachung der Prüfköpfe, zur Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen und zur Kontrolle der Manipulatorposition sind integriert. Die Kameras können oben, unten oder auf beiden Seiten des Geräts angebracht werden, um Parallaxenfehler zu verhindern.
- Kameras (auch rotierende) zur Umgebungsüberwachung können zusätzlich, entweder seitlich oder ober- und unterhalb des Ultraschallprüfkopfs montiert werden.
- Flexible Kabelführung: Bei Wartungsarbeiten wird das abgehende Kabel vorzugsweise nach unten gerichtet, für den Betrieb innerhalb des RDB bequemer nach oben. Die Ausrichtung des Kabels wird vom Kabelschacht gesteuert.
- Eine Reduzierung der Anzahl und Abmessungen von Kabeln und Luftschläuchen zwischen Kontrolleinheit und Manipulator waren wesentlich für den Konstruktionserfolg. Dies wurde durch on-board Elektroregler und Power-Cube Elektronik umgesetzt.

- Die Verbindung aller Prüfköpfe und Motoren im Inneren des Manipulators mittels Busansteuerung verbessert insgesamt die Zuverlässigkeit und vereinfacht das Kabelmanagement.
- Pneumatische Ventile werden auch über Busansteuerung gesteuert. Die Verwendung von on-board Stopfbuchsenventilen minimiert den Bedarf an Druckluftleitungen zum NPM.
- Pneumatischer Antrieb für Zentriereinheit: Automatische Zentrierung des Manipulators vor dem Stutzen durch 4 analoge Abstandsmesser, die in 90° Winkeln um das Gerät herum angeordnet sind. Das System misst die Zentrierung entlang der Stutzenachse. Anhand der gemessenen Werte wird die optimale Korrektur von vertikalem und horizontalem Verdreh- und Kippwinkel zum Erreichen der besten Koaxialität berechnet. Die Korrektur wird von den vier Pneumatikmotoren des Gerätes durchgeführt (Abb. 7).
- Innerhalb des Beckens kann der Manipulator schwimmend mit dem Joystick sehr präzise gelenkt werden. Solange die Stutzen unter Wasser sind, kann der Manipulator im U-Boot-Schwimmmodus wie die SUSI verwendet werden, um unabhängig vom Portalkran zu sein. Für den Fall, dass eine Stutzenprüfung mit abgesenktem Wasserstand nötig sein sollte, sind die Prüfsysteme mit Spritzdüsen ausgestattet, um die Prüfköpfe mit Koppelwasser zu versorgen. Der NPM wurde konstruiert, um auch diese Prüfvariante zu ermöglichen.
- Der NPM kann wie ein U-Boot schwimmen und tauchen. In diesem Fall wird der Kran oder eine andere Hebevorrichtung nur benötigt, um den Manipulator ins Becken zu setzen oder herauszuholen. Diese Möglichkeit wurde durch eine Modifikation des existierenden SUSI Steuersystems verwirklicht, so dass der NPM zu den zu prüfenden Stutzen schwimmen kann (Abb. 8). Das Gesamtgewicht des Manipulators mitsamt U-Boot-Vorrichtung beläuft sich auf ca. 300 kg.

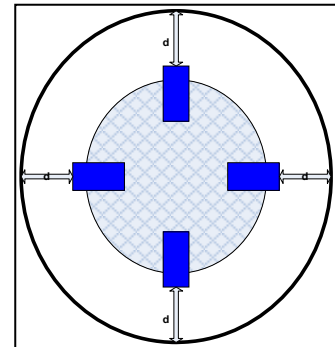


Abb. 7: Zentrierung mittels eines Pneumatikmotors auf Basis von vier 90° Abstandssensoren.

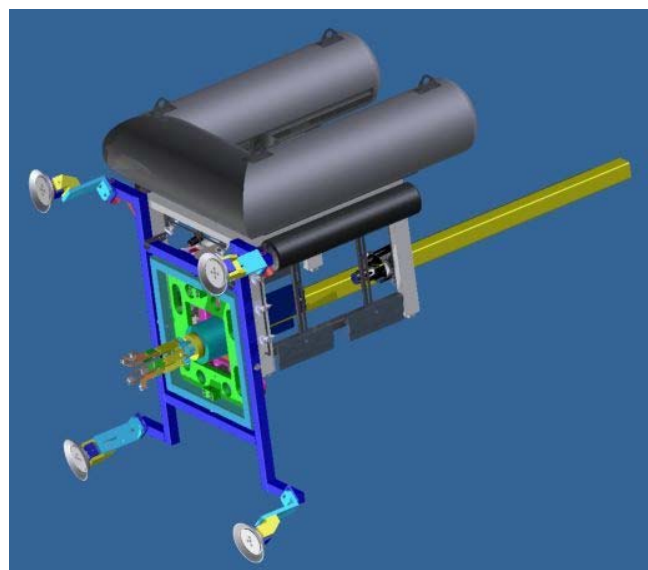


Abb. 8: NPM aufgebaut als schwimmfähige / tauchfähige Einheit (U-Boot)

## Ersteinsatz.

Der erste Vorort-Einsatz war für das Frühjahr 2012 in Südafrika geplant. Ein Befund in einer RDB Stutzeneinschweißnaht eines Austrittsstutzens aus einer früheren Prüfung musste nachgemessen werden. Eine normale RDB-Prüfung war nicht geplant, so dass kein Gerät für eine Komplettprüfung benötigt wurde. Gefordert wurde eine kurze Inspektion mit minimalen Überschneidungen mit anderen Aktivitäten im Becken. Für diese Aufgabenstellung ist der NPM bestens geeignet. Der Prüfbereich ist in Abb. 9 Gelb markiert.

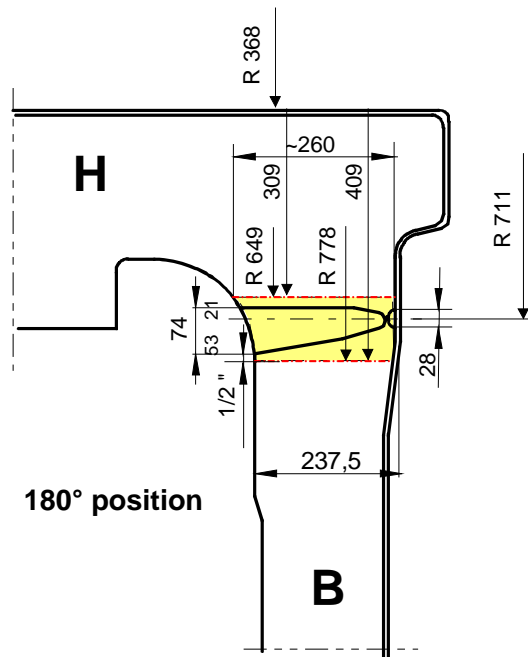


Abb. 9: Ausschnitt Stutzen Typ "H". Prüfbereich Gelb markiert

Vor dem Einsatz wurde der Manipulator in Erlangen gründlichen Tests unterzogen. Diese Tests umfassten die Basisfunktionen, den Aufbauvorgang, alle Gerätebewegungen, die Positionserfassung und -genauigkeit, die Schwimffähigkeiten sowie die Interaktion mit dem Ultraschallsystem. Bilder dieser Tests zeigen die Abbildungen 10 – 12. Während der Testphase wurden die Bediener ebenfalls in der Handhabung des neuen Gerätes geschult und die Manipulatorqualifikation vorbereitet. Die Qualifikation des Systems erfolgte ebenfalls am Standort Erlangen.





Abb. 10: NPM Unterwassertest



Abb. 11: Der NPM im  
Trockentest



Abb. 12: NPM Positionier-  
genauigkeit

Durch den Einsatz des NPM konnte die Prüfung erheblich effizienter durchgeführt werden. Dies resultiert vor allem aus den folgenden Punkten:

- **Reduzierte Beckenbelegungszeit**  
Der Zusammenbau wie auch die komplette Vorbereitung des Manipulators werden ausserhalb des Beckens durchgeführt. Nur für die Anfahrt der Prüfstelle und zur Prüfung selbst wird das Becken belegt.
- **Belegungszeit des Portalkrans**  
Der NPM schwimmt selbstständig zu den Prüfstellen im Reaktordruckbehälter. Dadurch wird die Belegung des Portalkrans auf ein Minimum reduziert.
- **Schlanke Teamstruktur**  
Durch die geringe Baugröße und die gute Handhabbarkeit des NPM konnte die Prüfung mit weniger Einsatzpersonal bei gleicher Qualität durchgeführt werden.
- **Geringe Baugröße**  
Wegen der sehr kompakten Bauweise ist es möglich, den Manipulator schnell und kostengünstig per Luftfracht weltweit zu versenden.

Das gesamte Projekt konnte, trotz der Komplexität, in weniger als 6 Monaten verwirklicht werden. Auch der erste Einsatz des neuen NPMs konnte in der veranschlagten Zeit, mit der geforderten Genauigkeit sowie Qualität erfolgreich und störungsfrei durchgeführt werden. Die Prüfung war ein voller Erfolg. Dies spiegelt sich vor allem in der Kundenbewertung wieder, in der wir durchgehend hervorragend bewertet wurden.

### **Zusammenfassung.**

Der NPM vereint die Vorteile von Fozzie und SUSI in einem unabhängigen Manipulatorsystem, das für Stutzenprüfungen in SWR-, DWR- und EPR-Anlagen konstruiert ist. Die gesamten Prüfbereiche an den Stutzen werden dabei ebenso abgedeckt, wie verschiedene Prüfverfahren (UT, ET und VT) und Regelwerke (ENIQ, KTA, ASME, RSA, etc.). Durch die kompakte Bauform und die eigenständige Verfahrbarkeit im Becken wird die Beckenbelegungszeit sowie die Nutzung anlageninterner Ressourcen deutlich reduziert. Dadurch können Revisionseinsätze wesentlich effizienter und wirtschaftlicher durchgeführt werden.