

# Vergleich zweier Methoden für die Simulation von Wirbelstromprüfungen auf Stahlröhren

B. BISIAUX und F. DENEUVILLE, E. DESDOIT, – VALLOUREC RESEARCH AULNOYE  
60 route de Leval – 59620 AULNOYE AYMERIES

M. MAYOS, Moderator der Cofrend-AG « Modellierung von Wirbelströmen »  
EDF, DPN/UNIE – 1 Place Pleyel – 93282 Saint Denis Cedex  
E-mail : [bernard.bisiaux@vallourec.fr](mailto:bernard.bisiaux@vallourec.fr)

**Zusammenfassung.** Im Rahmen der COFREND-Arbeitsgruppe “Modellierung von Wirbelströmen” hat das Forschungszentrum der Vallourec-Gruppe einen Testfall (oder “Benchmark”) vorgelegt. Dieser Testfall entspricht der Simulation der industriellen in-line-Prüfung von nahtlosen Stahlröhren mit dem Wirbelstromverfahren und umkreisenden Spulen. Das Vallourec Forschungszentrum (VRA) präsentiert nun im Rahmen dieser Arbeitsgruppe die beiden ersten Lösungsansätze, die auf zwei verschiedenen Methoden basieren: d.h. zum einen auf einer halbanalytischen Methode unter Verwendung der vom CEA entwickelten Software CIVA, und zum anderen auf einer Methode mit finiten Elementen und Verwendung der Software COMSOL Multiphysics. Beide Methoden erzielen Ergebnisse, die im Vergleich mit den Versuchsdaten kohärent sind und sich nicht stark unterscheiden. Sie liefern im Endeffekt den Beweis für die Gültigkeit beider Simulationsmethoden, die komplementär eingesetzt werden können.

## Einleitung

Für die zerstörungsfreien Prüfungen allgemein, und speziell die Wirbelstromprüfverfahren, haben sich in den letzten Jahren Modellierungs- und Simulationsprogramme immer mehr durchgesetzt und sie kommen in verschiedenen industriellen Anwendungen immer häufiger zum Einsatz. Die wichtigsten Vorteile der numerischen Modellierung der Prüfungen sind:

- Ein besseres Verständnis der angetroffenen physikalischen Phänomene und ihrer Einflüsse auf die Prüfergebnisse;
- Eine Hilfe für die Entwicklung neuer Sensoren und Prüfbänke;
- Eine Hilfe für die Qualifizierung der ZfP-Techniker, da eine weitestgehende Abdeckung der einflussnehmenden Faktoren möglich ist (Teile-Abmessungen und –Werkstoffe, Sensor-Führungsfehler...) bei gleichzeitiger Reduzierung der notwendigen Versuchsanzahl [1];
- Ein Ausgangspunkt für die Expertise der Signale, die in komplexen Konfigurationen aus den Prüfungen gewonnen werden. Die Simulation ist übrigens mehr und mehr in Fehler-Rekonstruktionsmodellen integriert [2], [3].

Trotzdem ist es für die Akteure im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung wichtig zu überprüfen, bevor der Einsatz einer Simulationssoftware entschieden wird, dass die Software in der Lage ist, Ergebnisse zu liefern, die mit den experimentellen Ergebnissen dieser Kontrollen und mit den Ergebnissen für die speziellen Anwendungskonfigurationen im Einklang stehen.

Als beste Überprüfungsverfahren stellt sich ein Vergleich (Benchmark) unter verschiedenen Simulationskandidatencodes heraus. Es wurde ein Testfall verwendet, der für die in Betracht gezogene zerstörungsfreie Prüfung repräsentativ ist. Die Ergebnisse aus der Testfall-Modellierung und den



verschiedenen Kandidatencodes werden mit den Referenzergebnissen verglichen, die generell aus Versuchsmessungen oder einem bereits einbehaltenen Simulationscode herrühren.

Unter diesem Gesichtspunkt befassen sich die Arbeiten der 2003 eingerichteten COFREND-Arbeitsgruppe « Modellierung von Wirbelströmen » seit einigen Jahren mit der Definition von Testfällen, die durch industrielle Problematiken angeregt werden. Die Bestrebung richtet sich dabei auf die Erstellung von Testfällen, die der Mehrheit zugänglich sind und den Austausch und den Vergleich von Lösungsansätzen mit Kandidatencodes favorisieren.

Die Vallourec-Gruppe ist vom Nutzen der Simulation für die zerstörungsfreien Prüfungen auf Röhren, die integral auf der gesamten Produktion angewandt werden, überzeugt und beteiligt sich über sein Forschungszentrum aktiv an der Arbeitsgruppe. Sie hat den Testfall Nr. 6 vorgelegt, der mit der Simulation einer industriellen in-line-Wirbelstromprüfung von Stahlröhren anhand umkreisender Spulen übereinstimmt.

Nach einer kurzen Vorstellung der COFREND-Arbeitsgruppe « Modellierung von Wirbelströmen » beschreibt dieses Dokument den von Vallourec vorgelegten Testfall Nr. 6. Wir präsentieren für den Testfall den ersten Lösungsansatz, d.h. die CIVA-Software, die sich einer halbanalytischen Methode bedient, sowie deren spezifisches Modul für die Modellierung von Wirbelstromprüfungen auf Stahlröhren. Diese Lösung wurde zum großen Teil im Rahmen einer Doktorarbeit in Partnerschaft mit Vallourec, dem CEA, dem Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) und Supélec entwickelt [4]. Anschließend gehen wir auf den zweiten Lösungsansatz ein und stellen die ersten Simulationsergebnisse vor, die im Forschungszentrum Vallourec mit der neuen Kandidatensoftware COMSOL Multiphysics und der Methode der finiten Elemente erzielt wurden.

## **Vorstellung der Arbeitsgruppe „Modellierung von Wirbelströmen“**

Die COFREND-Arbeitsgruppe « Modellierung von Wirbelströmen » fördert den Einsatz von Simulationscodes als Unterstützung für die Bedürfnisse der industriellen zerstörungsfreien Prüfung mit Wirbelstromverfahren [5].

Diesbezüglich verfolgt sie zwei Aktivitäten:

- die Abhaltung von technischen Veranstaltungen und die Verfassung von Positionspapieren zum Thema der Modellierung von zerstörungsfreien Prüfungen mit Wirbelströmen (abrufbar auf der Internetseite der AG: [www.cofrend.com/modelisationcf](http://www.cofrend.com/modelisationcf), in der Rubrik « Communications »)
- die Festlegung von Referenz-Testfällen, die für die industrielle Problematik der zerstörungsfreien Prüfung repräsentativ sind (siehe Rubrik « Cas-tests COFREND »). Die Testfälle haben die Ambition, eine relative Einfachheit und Zugänglichkeit zu wahren (alle Daten sind öffentlich) und sich von akademischeren « Benchmarks » abzuheben, in dem sie sich an realen Prüfsituationen orientieren.

Die Arbeitsgruppe setzt sich aus Vertretern der wichtigsten Industriebereichen Frankreichs, die zerstörungsfreie Prüfmethode anwenden, zusammen: Kernkraft (AREVA, EDF), Luftfahrt (Dassault, EADS, SNECMA), Metallurgie (Vallourec), Automobil (Renault), Regierungsinstitutionen (IRSN), Dienstleistungserbringer und Hersteller von ZfP-Ausrüstungen (Alphatest, Zetec), sowie Vertreter von industriellen und akademischen Forschungszentren (CEA, Supélec/CNRS, Ecole Centrale Lyon), und den Spezialisten für die Entwicklung von Kalkulationscodes (CEDRAT, EXTENDE).

Die Arbeitsgruppe interessiert sich auf internationaler Ebene ebenfalls für den Austausch bzgl. ähnlich gelagerter Thematiken.

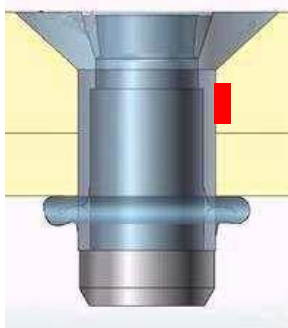
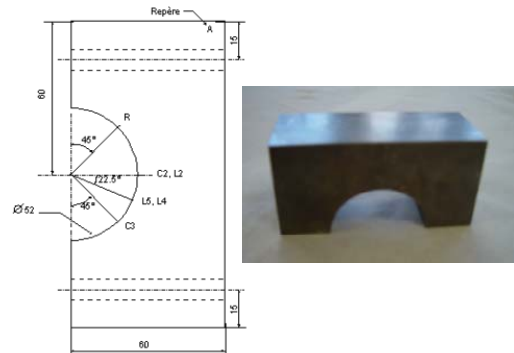
Die von der Arbeitsgruppe vorgeschlagene Resolution der Testfälle ist für jeden Kalkulationskandidaten offen. Derzeit sind 6 Testfälle definiert (oder in der Ausarbeitung):

- Testfall Nr.2: *Externe, interne und durchgehende Kerben auf unmagnetischem Dünnsfilm* (vorgelegt von EDF - CEA).

Der industrielle Ausgangspunkt dieses Testfalls ist die Inspektion von Dampferzeugerröhren mit einer drehenden Sonde. Er ist dazu gedacht, eine Situation zu reproduzieren (durchgehender Defekt), die in den Kalkulationscodes numerische Probleme generieren kann. Beispiele für die Resolution dieses Testfalls finden sich in [5].

- Testfall Nr.3: *Variable Formfehler in einer Bohrung* (vorgelegt von Dassault Aviation).

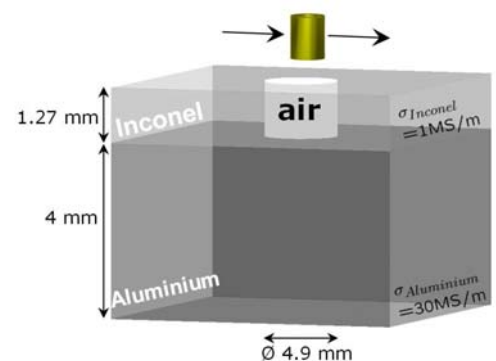
Dieser Fall inspiriert sich an der Inspektion der Hauptbefestigungsöse für die Tragfläche der M2000. Die Simulationsproblematik ist in erster Linie geometrischer Art (Ausbildung und Orientierung der Fehler und die Lage in der Bohrung).



- Testfall Nr.4: *Rissbildungen am Rand von Nieten* (vorgelegt von EADS – Dassault Aviation).
- Im Mittelpunkt steht die Suche nach versteckten Fehlern im Nietrandbereich.

- Testfall Nr.5: *Zweilagengstruktur mit Loch und Abstand zwischen den Lagen* (vorgelegt von CEA - L2S).

Dieser Testfall leitet sich ebenfalls aus der vorgenannten industriellen Problemstellung ab, interessiert sich aber dafür, wie sich die fehlende Haftung zwischen den 2 Lagen der Nietverbindung auf die Reaktion der Wirbelströme auswirkt.



- Testfall Nr.6: *Überprüfung durch umkreisende Spulen auf Röhren aus rostfreiem Stahl* (vorgelegt von Vallourec - CEA).

Dieser Fall wird im nächsten Absatz eingehend beschrieben.

- Testfall Nr.7: *Erkennung von kleindimensionierten Fehlern auf einer Platte, mit einer Stiftsonde* (vorgelegt von SNECMA)

Dieser Fall geht auf die Planung und Entwicklung von kleinen Wirbelstromsonden für die Prüfung mechanischer Bauteile von Flugzeugmotoren zurück (ähnlich gelagerte Problematiken gibt es ebenfalls bei Prüfungen in der Automobilindustrie).

Der vorgelegte Fall entspricht der Prüfung einer Platte aus rostfreiem Stahl, die quaderförmige Kerben geringer Größe aufweist ( $0,8 \times 0,1 \times 0,4 \text{ mm}^3$  bis  $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ ). Die Prüfung erfolgt mit zwei verschiedenen Sensoren: eine kommerzielle Sonde (Außendurchmesser  $< 3 \text{ mm}$ ) und eine Stiftsonde.



Für den vorgelegten Fall wird für die Inspektion der Röhre ein externer umkreisender Sensor verwendet. Die Überprüfung erfolgt allein auf dem linearen Vorlauf der Röhre im Innern des Sensors. In der industriellen Produktion kann der Röhrenvorlauf eine Geschwindigkeit bis 2m/s erreichen. Der umkreisende Sensor ist ein Differentialsensor mit getrennten Funktionen. Er besteht aus einer umkreisenden Sendespule und zwei umkreisenden Empfängerspulen. Die Abmessungen werden in Tabelle 2 genannt. Ein Kern wird nicht verwendet.

<b>Sendespule</b>	Innendurchmesser: 47 mm Stärke: 2.4 mm Breite: 30 mm Anz. Wicklungen: 200
<b>Empfänger- spulen</b>	Innendurchmesser: 41 mm Stärke: 1 mm Breite: 2 mm Anz. Wicklungen: 200 <i>Spulenabstand: 2mm</i>

Tabelle 2: Abmessungen der aktiven Objekte

Über die Sendespule wird in der Röhre ein Magnetfeld aufgebaut, welches an der Oberfläche Wirbelströme induziert. Um dies zu tun, wird die Sendespule mit sinusförmigem Strom gespeist, dessen Stärke nicht auf der Versuchsanlage, die für den Vergleich der Simulationsergebnisse als Referenz dient, überprüft werden konnte. Es ist gehandhabt, den Erregungsstrom in den Modellierungen auf 1 Ampere festzusetzen. Die Unterschiede dieses Parameterwerts zwischen den Simulationen und dem Versuch werden durch eine Kalibrierung kompensiert.

Durch den Gebrauch zweier Empfängerspulen ist eine Prüfung im Differentialmodus möglich, wodurch das Messrauschen reduziert werden kann, wenn die Röhrenprüfung bei hoher Geschwindigkeit erfolgt. Auf der Röhre werden nämlich die Luftspaltvariationen und die Variationen des metallurgischen Gefüges kompensiert. In den für den Testfall gewählten Konfigurationen stehen die Empfängerspulen 2 mm voneinander entfernt (Konfiguration 2-2-2). Gemessen wird die komplexe Impedanz an den Empfängerspulenklammern. Das Signal, das sich aus der Prüfung im Differentialmodus ergibt, entspricht der Impedanzdifferenz an den Spulenklammern. Auf den Prüfanlagen wird diese Differenz elektronisch mit Hilfe einer Wheatstone-Brücke erzielt.

Für den Testfall werden zwei Röhrenpositionen im Spuleninneren betrachtet. Zum ersten die klassische Konfiguration, genannt « zentrierter Fall », bei der die Röhre korrekt im Spuleninneren zentriert ist. Sie entspricht optimalen Prüfbedingungen. Als zweites der sog. « dezentrierter Fall ». Bei dieser Konfiguration liegt die Röhre um 2 mm außerhalb der Spulenmitte ( $\delta=2\text{mm}$  auf Abbildung 2). Diese Bedingungen entsprechen dem maximalen Versatz der Röhrenführung während der Prüfung. Die Möglichkeit, Simulationen mit einer solchen Dezentrierung vornehmen zu können und ihre Auswirkung auf die Variation der Fehlerantworten zu messen, stellt in bezug auf die Bewertung der Wiederholbarkeit von Prüfungen durch Modelle eine bedeutende industrielle Problematik dar.

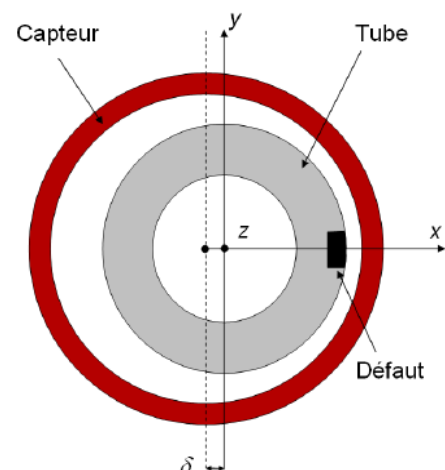


Abbildung 2: Schema – dezentrierter Fall

Für die Testfälle werden verschiedene Testfrequenzen betrachtet: 50, 100 und 300 kHz.

Die Modellierungsergebnisse dieses Falles werden den Referenzergebnissen aus der Vergleichsprüfung, die auf einer Versuchsanlage mit der vorgeschlagenen Konfiguration erzielt wurden, gegenüber gestellt.

Für jeden Fehler werden die Ergebnisse im komplexen Impedanzbild (Lissajous-Figur) dargestellt und verglichen. Die Amplitudeneinstellungen der zu betrachtenden Phase entsprechen einer Kalibrierung auf den Fehler Nr. 3.

Die Vergleiche der für jeden Fehler erzielten Amplituden und Phasen werden ebenfalls zwischen den Kandidatencodes und den Versuchsergebnissen angestellt. Zur Gewährleistung eines genormten Vergleichs werden die Phasenhübe ( $\Delta\Phi$ ) in Grad und die Amplitudenhübe ( $\Delta A$ ) in dB gemessen.

## Resolutionen des Testfalls Nr. 6

### Simulationen unter CIVA und Vergleich mit den experimentellen Daten

Der erste Simulationskandidatencode, der für diesen Fall getestet wurde, war natürlich die vom CEA entwickelte Simulationssoftware CIVA. Diese Software ist nämlich speziell der Modellierung von zerstörungsfreien Prüfungen gewidmet. Mehrere Prüfverfahren sind modellierbar: Ultraschall, Wirbelstrom und Radiographie. Die von der Software verwendeten Simulationscodes basieren auf halbanalytischen Methoden, wodurch schnellere Berechnungen gewährleistet werden können. Im Falle der Wirbelstrommodellierung basiert der Code auf der Ausnutzung der vollständig umfassenden Formulierung der Maxwell'schen Gleichungen.

Die Modellierung der Wirbelstromprüfungen auf Röhren im CIVA-Programm wurde größtenteils im Rahmen der Doktorarbeit von Christophe Reboud in Zusammenarbeit mit Vallourec, dem CEA und dem Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) von Supélec entwickelt. Mit dieser Arbeit war unter anderem die Integrierung von neuen Modellierungscodes in CIVA möglich, wodurch komplexe asymmetrische Konfigurationen berücksichtigt werden können, wie zum Beispiel die Prüfsimulation im Falle einer zu den umkreisenden Sensoren dezentrierten Röhre [4], [6].

Im Rahmen der Doktorarbeit wurden die Simulationsergebnisse im Vallourec-Forschungszentrum ebenfalls auf einer Wirbelstromprüfanlagen experimentell validiert (Abbildung 3). Bei diesen Vergleichsmessungen wurden die für den Testfall Nr. 6 ausgewiesenen Konfigurationen getestet.



Abbildung 3: Wirbelstromprüfanlage im Vallourec-Forschungszentrum

Die Validierungstests der CIVA-Software und die Versuchsergebnisse beschäftigen sich nur mit den Fehlern vom Loch-Typus, die aus industrieller Sicht am wichtigsten sind.

Die Ergebnisse im komplexen Impedanzbild der experimentellen Messerwerbungen und der Simulationen mit der Frequenz 3 kHz werden für den zentrierten Fall in der Abbildung 4 dargestellt und für den dezentrierten Fall in der Abbildung 5. Die Tabelle 3 fasst die Vergleichsergebnisse in Amplitude und Phase der verschiedenen Fehler in beiden Fällen und mit den 3 geprüften Frequenzen zusammen.

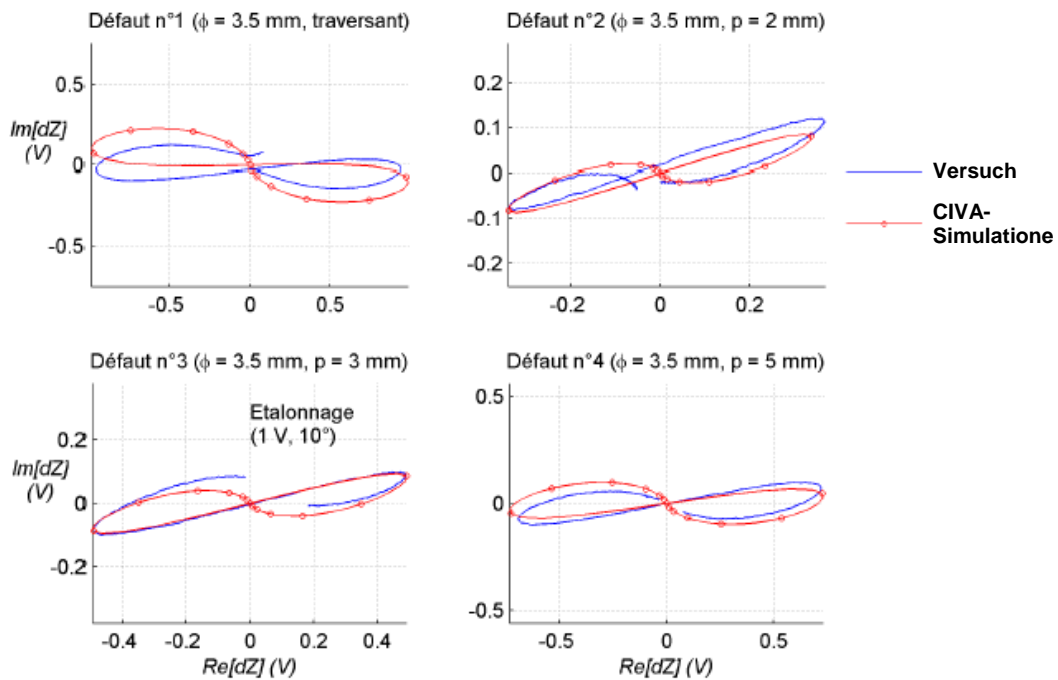


Abbildung 4: Ergebnisse der CIVA-Simulationen und der experimentellen Messungen mit der Frequenz 3 kHz, für den zentrierten Fall.

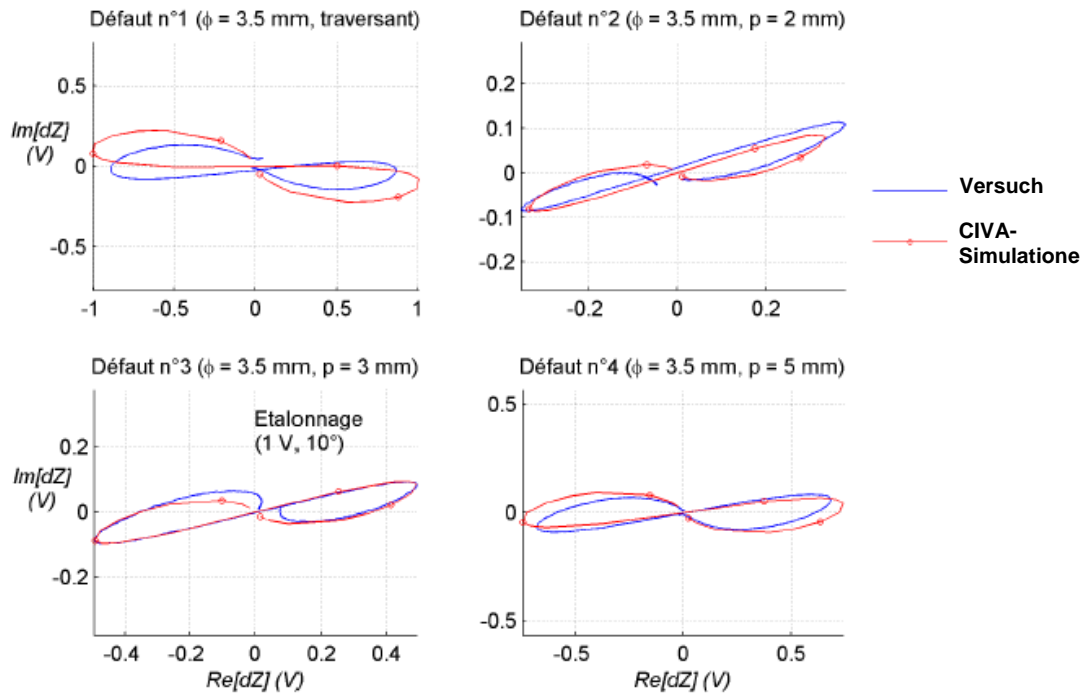


Abbildung 5: Ergebnisse der CIVA-Simulationen und der experimentellen Messungen mit der Frequenz 3 kHz, für den dezentrierten Fall.

Konfiguration	Nr. Fehler	f = 3 kHz		f = 50 kHz		f = 100 kHz	
		$\Delta A$ (dB)	$\Delta F$ (°)	$\Delta A$ (dB)	$\Delta F$ (°)	$\Delta A$ (dB)	$\Delta F$ (°)
Zentrierter Fall	1	0.39	-6	-0.67	-5	-0.69	2
	2	-0.44	-1	-0.76	0	0.56	-3
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0.23	-4	0	-2	-0.32	4
Dezentrierter Fall	1	1.18	-4	-0.34	1	-0.29	0
	2	-0.8	-1	-0.26	0	-0.43	-2
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0.72	-2	-0.12	0	-0.01	2

Tabelle 3: Vergleich CIVA-Simulationen und Versuchsmessungen im Testfall Nr. 6

Diese Ergebnisse bilden einen ersten Lösungsansatz des Testfalls Nr. 6 mit der CIVA-Software. Die gute Adäquation zwischen den experimentellen Vergleichsergebnissen und den mit der CIVA-Software erzielten Simulationsergebnissen (Fehler unter 1,5 dB in der Amplitude und unter 6° in der Phase, was der Wiederholbarkeits-Größenordnung der experimentellen Messungen entspricht) hat die Qualifizierung der CIVA-Software als zuverlässigen Simulationscode für die Wirbelstrommodellierung auf Röhren ermöglicht.



## Erste Simulationen unter COMSOL Multiphysics, Vergleich mit CIVA

Neben der CIVA-Simulationssoftware beschäftigt sich das Vallourec-Forschungszentrum derzeit mit Studien zur Entwicklung neuer Modellierungen von Wirbelstromprüfverfahren, die auf der Methode der finiten Elemente basieren. Wir sind nämlich der Ansicht, dass beide Ansätze, die Finite-Elemente-Methode und die halbanalytische Methode, komplementär sein können. Ist es zum Beispiel unmöglich, die Simulationen durch experimentelle Messungen zu validieren (Planung eines neuen Sensortyps, Machbarkeitsstudie für künftige Produkte), kann die Konfrontation der Ergebnisse aus beiden Simulationsmethoden das Risiko für eine Falschinterpretation der Simulationsergebnisse verringern. Obwohl die Finite-Elemente-Methode eine längere Parametrier- und Berechnungszeit benötigt als die auf der halbanalytischen Methode gestützte CIVA-Software, bieten Simulationsprogramme auf der Basis finiter Elemente eine höhere Flexibilität in bezug auf die Parametrierung der zu modellierenden Konfigurationen und der zu berücksichtigenden Annäherungen.

Unter der Leitung von Emmanuel Desdoit arbeitet die Abteilung für numerische Simulationen des Vallourec-Forschungszentrums an der Modellierung der Wirbelstromprüfung mit finiten Elementen. Die für diese Entwicklung gewählte Software ist das Programm COMSOL Multiphysics, das im Forschungszentrum bereits für die mechanischen, thermischen und elektromagnetischen Simulationen der Erzeugnisse und Fertigungsverfahren von Vallourec eingesetzt wird. Die Software besitzt außerdem elektromagnetische Module, die sich für die Modellierung der zerstörungsfreien Prüfungen mit Wirbelstromverfahren eignen [7].

Die ersten mit COMSOL Multiphysics im Vallourec-Forschungszentrum entwickelten Modellierungen wurden zweidimensional (2D) erstellt und ermöglichen daher lediglich eine Simulation von achssymmetrischen Konfigurationen. Für ihre Validierung entschied man sich zur Modellierung des Teils des Testfalls Nr. 6, der diesen Bedingungen entspricht, d.h. die Prüfung des Fehlers Nr. 5 (außen rundumlaufende Rille, auf 360°, Tiefe: 0,5 mm, Breite: 1 mm) bei zentrierter Röhre. Die Abbildung 6 zeigt das mit COMSOL Multiphysics erstellte 2D-Modell und die Ergebnisse für die Dichtefeldberechnung der Wirbelströme in der Röhre im Fehlerbereich.

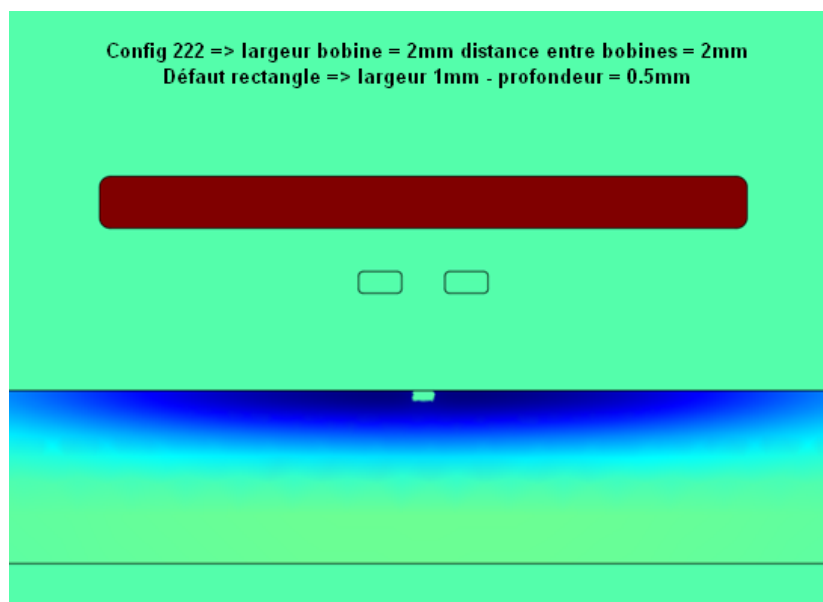


Abbildung 6: Wirbelstrom-Dichtefeld in der Röhre erzielt mit COMSOL Multiphysics.

Für diese achssymmetrische Konfiguration wurden die unter COMSOL Multiphysics gewonnenen Ergebnisse mit den unter CIVA für die gleiche Konfiguration ermittelten Werte verglichen. Da für diesen Fall keine experimentellen Vergleichsergebnisse vorliegen, haben wir hier die unter CIVA erzielten Ergebnisse als die Referenzergebnisse angenommen. Die Effizienz des CIVA-Codes für die Simulationen der Wirbelstromprüfungen wurde ja zuvor bewiesen.

Abbildung 7 zeigt die mit den beiden Simulationsmethoden erzielten Ergebnisse im komplexen Impedanzbild. Diese Ergebnisse lassen die Folgerung zu, dass beide Methoden eine sehr starke Korrelation besitzen.

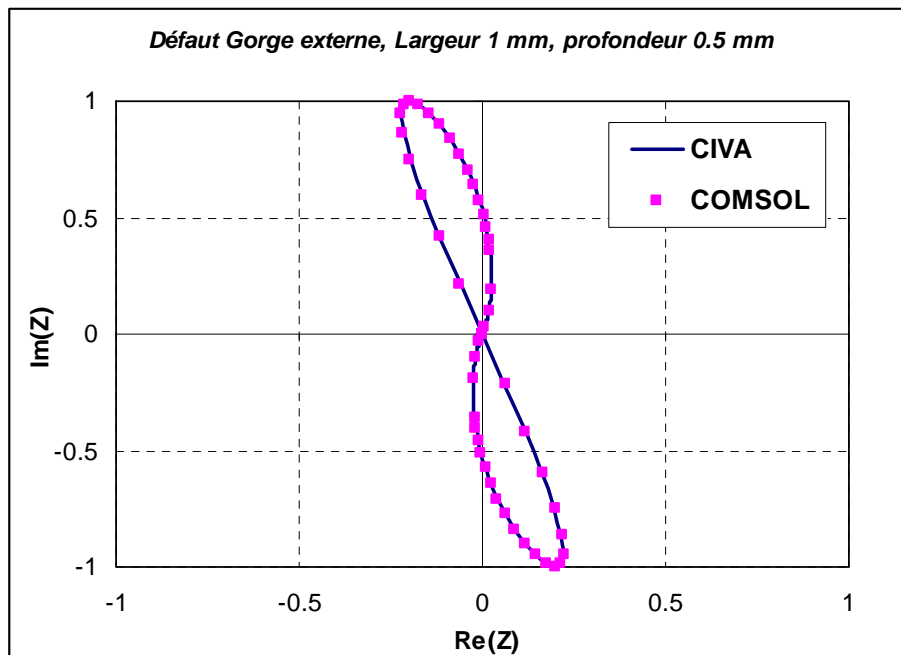


Abbildung 7: Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen unter CIVA und unter COMSOL Multiphysics für den Fehler außen rundumlaufende Rille, für einen zentrierten Fall

Aufgrund dieser ermutigenden Ergebnisse setzt das Vallourec-Forschungszentrum derzeit die unternommenen Entwicklungen fort, um eine 3D-Modellierung der Wirbelstromprüfung unter COMSOL Multiphysics zu erzielen, mit der alle denkbaren industriellen Prüfkonfigurationen simuliert werden können. Im Anschluss daran wird diese Modellierung nach allen Aspekten des Testfalls Nr. 6 getestet (Fehler des Loch-Typus, dezentrierter Fall).

## Schlussfolgerung

In verschiedenen Projektetappen, von der Planung bis zur Qualifizierung einer Prüftechnik, greift die Industrie immer mehr auf die Modellierung der zerstörungsfreien Prüfungen zurück. Für die industriellen Anwender einer derartigen Modellierung stellen die Wahl und die Validierung der Simulationscodes ein großes Problem dar. Aus diesem Grund legt die COFREND-Arbeitsgruppe « Modellierung der Wirbelströme » verschiedene und für industrielle Problemstellungen repräsentative Referenztestfälle vor.

Vallourec hat in Zusammenarbeit mit dem CEA den in diesem Dokument beschriebenen Testfall Nr. 6 vorgelegt. Dieser Testfall behandelt die Simulation der industriellen in line-Wirbelstromprüfung von Stahlröhren mit Hilfe umkreisender Spulen.

Einen ersten Lösungsansatz des vorgelegten Testfalls wurde mit der vom CEA entwickelten Simulationssoftware CIVA erstellt, die sich halbanalytischer Methoden bedient. Er wurde mit den experimentellen Referenzergebnissen verglichen. Dadurch konnte erwiesen werden, dass die CIVA-Software eine zuverlässige Modellierung der Wirbelstromprüfung für Röhren bietet.

Zusätzlich zu dieser ersten Simulationsmethode wird im Forschungszentrum von Vallourec, unter der Software COMSOL Multiphysics, an der Entwicklung einer Wirbelstrom-Modellierung mit finiten Elementen weitergearbeitet. Es wurde ein erstes 2D-Modell geschaffen, das die Modellierung achssymmetrischer Konfigurationen gestattet.

Somit war es möglich, die einfachste Konfiguration des Testfalls Nr. 6 unter COMSOL Multiphysics zu modellieren und die erzielten Ergebnisse mit den unter CIVA gewonnenen Ergebnissen zu vergleichen. Dabei beobachtete man eine starke Adäquation zwischen den Ergebnissen beider Methoden.

Aufgrund dieser ermutigenden Ergebnisse setzt das Vallourec-Forschungszentrum seine unternommenen Entwicklungen für die Schaffung eines 3D-Modells unter COMSOL Multiphysics fort, um zur Modellierung mit finiten Elementen der verschiedenen Röhren-Wirbelstromprüfkonfigurationen in der Lage zu sein.

## **Bibliographie**

[1] M. Mayos, A. Le Brun, J.M. Carpreau, O. Bremnes, C. Poidevin, T. Sollier: *The use of modelling in support of the qualification of NDE application*, 4<sup>th</sup> International Conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components, London, 2004.

[2] A. Fidahoussen, P. Calmon, M. Lambert, S. Paillard, S. Chatillon, *Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data*, Review in Progress in QNDE, 2009.

[3] A. Segura, *Traitement et interpretation de l'imagerie 3D de systèmes automatiques de contrôles non-destructifs de tubes*, Poster, Journées COFREND, 2011.

[4] C. Reboud, *Développement d'un modèle électromagnétique 3D pour la simulation d'un procédé de contrôle non destructif*, 2006, thèse de l'Université Paris-Sud XI, Faculté des Sciences d'Orsay.

[5] M. Mayos, T. Sollier, M. Lambert, C. Gilles-Pascaud, O. Moreau, M. Dessendre, F. Deneuve, C. Reboud, F. Foucher, Q. Mistral, M. Debroise, R. Levy, *Multi-domain industrial benchmarks for eddy current modeling : the COFREND working group*, ECNDT2010 Proceedings, Moscou, 2010.

[6] C. Reboud, D. Prémel, G. Pichenot, D. Lesselier and B. Bisiaux, *Development and validation of a 3D model dedicated to eddy current non destructive testing of tubes by encircling probes*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007 25 313-317.

[7] M. Cacciola, S. Calcagno, D. De Carlo, F. Laganà, G. Megali, F.C. Morabito, D. Pellicanò, M. Versaci, *Implementation of EC-NDT for in Depth Detection of Defects in Metallic Plates*, Proceedings of the COMSOL Conference 2007 Grenoble, France, 2007.