

Innovative Testkörper für die Wirbelstromausbildung

Gerhard MOOK¹, Holger NOWACK², Sven RÜHE³, Juri SIMONIN¹

¹ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg

² DGZfP Ausbildung und Training GmbH Ausbildungszentrum
Magdeburg/PLR, Magdeburg

³ PLR Prüftechnik Linke & Rühle GmbH, Magdeburg

Kurzfassung. Das Wirbelstromverfahren stellt Lernende vor große Herausforderungen, da es dem Verfahren an Anschaulichkeit mangelt. Die Wechselwirkung von elektromagnetischen Feldern mit dem leitfähigen Werkstoff ist schwer vorstellbar, Anknüpfungspunkte an die Erfahrungswelt sind so gut wie nicht vorhanden. Das Ziel des Beitrages ist es, beim Lernenden das Verständnis für die Signalentstehung zu wecken. Dazu dienen die hier vorgestellten Testkörper.

Zunächst geht es um die Frage der optimalen Filtereinstellung bei der dynamischen Wirbelstromprüfung. Hier muss der Sinn von Hoch- und Tiefpass und ihrer Kombination zum Bandpass erklärt werden. Das Verständnis wird sich erst bei praktischen Versuchen einstellen, bei denen bislang ein Rotiersensor am Handrotor in einer Bohrung zu führen ist. Für den Anfänger ist allein die korrekte Führung des Sensors eine schwer beherrschbare Aufgabe, da sich wegen der Verwinkelung und Verklemmung ständig die Drehzahl des Rotors ändert und so die Filterung die merkwürdigsten Effekte zeigt. Hier setzt die Idee des rotierenden Testkörpers an, auf den der Wirbelstromsensor einfach aufgesetzt werden kann. Die Drehzahl kann manuell gewählt und die Filtereinstellung sauber geübt werden.

Der zweite Testkörper simuliert die Rohrprüfung auf Oberflächen- und verdeckte Fehler. Um die aufwändige Fertigung von Innenfehlern zu vermeiden, werden Außen- und Innendurchlaufensoren so kombiniert, dass sie denselben Fehler als Oberflächen- bzw. verdeckten Fehler anzeigen. Somit können die Fehlerparameter feinstufig variiert werden. Der Lernende kann nun die Bewertung der Restwanddicke anhand der Phasenaufspreizung, den Einfluss von Fehlerlänge und -abstand und die Nähe zum Rohrende eingehend studieren.

1. Rotierender Testkörper für die dynamische Wirbelstromprüfung

Die Interpretation von Wirbelstromsignalen ist nicht immer einfach. Häufig wird das Messsignal nicht nur durch die Zielgröße sondern auch durch Störgrößen beeinflusst. Diese Störgrößen sollen weitestgehend unterdrückt werden, ohne die Zielgrößenbestimmung zu beeinflussen. Dazu bieten sich statische, dynamische und topologische Verfahren an.

Die statischen Verfahren arbeiten unabhängig von der Sensorbewegung. Sie beruhen auf einer geschickten Sensorauswahl, der Signalrichtung in der XY-Ebene, der Nutzung mehrerer Prüffrequenzen oder einer gezielten Gleichfeldüberlagerung. Bild 1a) zeigt die Aussagekraft der Phasenlage des Wirbelstromsignals bei der Prüfung auf verdeckte Fehlstellen.

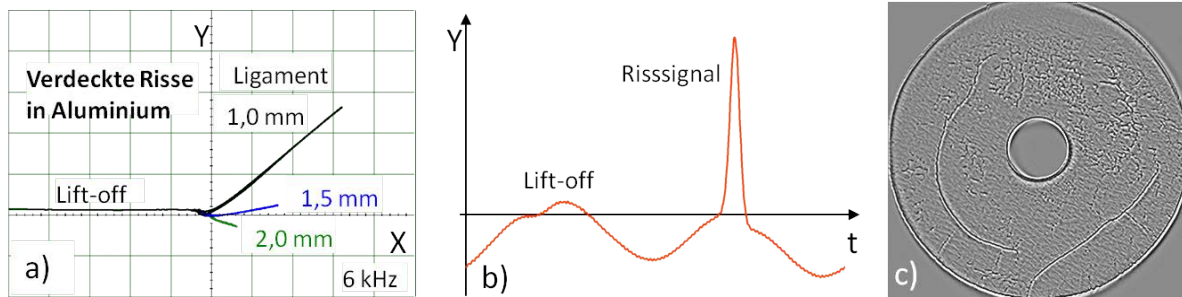


Bild 1: a) Statische, b) dynamische und c) topologische Verfahren der Signalinterpretation

Die dynamischen Verfahren setzen auf die Änderungsgeschwindigkeit des Messsignals. So ist zu erwarten, dass Risse eine schnelle Signaländerung und Gefügevariationen langsamere Signaländerungen hervorrufen (Bild 1b). Natürlich kommt dabei die Bewegungsgeschwindigkeit des Sensors ins Spiel, die konstant oder zumindest bekannt sein muss. Mit Hilfe diverser Filter wird versucht, denjenigen Signalfrequenzbereich hervorzuheben, in dem sich das Risssignal am deutlichsten von den Störsignalen unterscheidet. Die dynamischen Verfahren sind fast beliebig mit den statischen Verfahren kombinierbar.

Unter den topologischen Verfahren werden bildgebende Verfahren zusammengefasst, die das Messsignal mit dem Ort am Bauteil verknüpfen und so aus der Signalverteilung auf die Gestalt der Fehlers schließen lassen (Bild 1c). Sowohl Einzelsensoren als auch Sensorarray sind dazu geeignet. Die zwingend notwendige Ortserfassung eröffnet neue Möglichkeiten zur Kombination mit den dynamischen Verfahren. Die Ortsfilterung ist hierbei ein interessanter Ansatz.

1.1 Signalselektion durch Filterung

Es ist nicht einfach, dem Lernenden die Wirkung von Filtern auf das Messsignal zu vermitteln. Die Darstellung von Hoch-, Tief- und Bandpässen im Bodediagramm aus Bild 2 oben ist kein Problem, der Frequenzgang ist selbsterklärend. Doch wie wirkt sich ein Filter auf den Zeitverlauf des Messsignals aus?

Fachlich korrekt wäre die Einführung einer spektralen Darstellung des Messsignals z. B. mit Hilfe der Fouriertransformation. Anhand des Signalspektrums können die Quellen der Signale bei bekannter Sensor konstruktion und bekannter Vorschubgeschwindigkeit eingegrenzt werden. Anschließend könnte der Frequenzbereich mit dem höchsten Zielsignal/Störsignal-Verhältnis mit Hilfe eines Bandpasses herausgefiltert werden. Das daraus resultierende Zeitsignal wäre bestmöglich stöbereinigt.

Dieser Weg wird nicht besprochen, da die Aufzeichnung von Signalspektren relativ aufwändig und daher bislang unüblich ist. Rotieranwendungen mit periodischen Signalen wären jedoch eine nähere Betrachtung wert.

Alternativ dazu bietet sich eine Erklärung der Filterwirkung anhand ihrer integrierenden bzw. differenzierenden Wirkungskomponente an. Studierende sind in der Lage, zumindest den gleitenden Mittelwert bzw. die Ableitung des Zeitsignals als prinzipiellen Kurvenverlauf zu zeichnen.

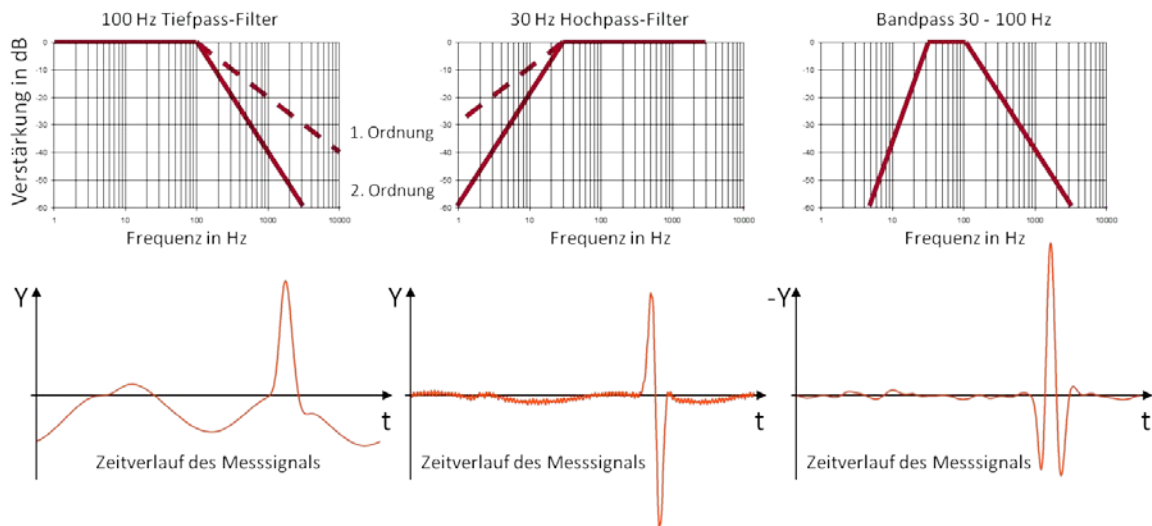


Bild 2: Frequenzgang und Wirkung diverser Filter auf das Zeitsignal eines Absolutensors

Ein Tiefpass (Bild 2 links) beseitigt den leichten Riffle auf dem Zeitsignal aus Bild 1b), während ein Hochpass diesen hervorhebt. Der Hochpass unterdrückt außerdem die langsamen Signaländerungen und verformt das Rissignal beträchtlich. Durch geschickte Kombination beider Filter entsteht ein Rissignal mit hohem Wiedererkennungswert.

1.2 Filter richtig einstellen

Die so aufgebaute Erwartung soll nun im Experiment überprüft werden. Wie kann eine konstante Vorschubgeschwindigkeit des Sensors gewährleistet werden? Bewährt hat sich dazu der Handrotor mit Innenrotiersensor, wie er in Bild 3 rechts dargestellt ist. Damit wird eine Bohrung im Testkörper (Bild 3 Mitte) geprüft, in die eine axiale Nut als Testfehler eingebracht wurde (Bild 3 links). Mit jedem Umlauf des Rotors entsteht ein wiederkehrendes Signalbild, das bei hinreichender manueller Geschicklichkeit ruhig auf dem Bildschirm steht. Der Lernende kann nun die Filtereinstellung optimieren. Da kein Anfänger die Handhabung auf Antrieb beherrscht, wird die Aufgabe geteilt, einer führt den Handrotor, einer stellt die Filter ein.

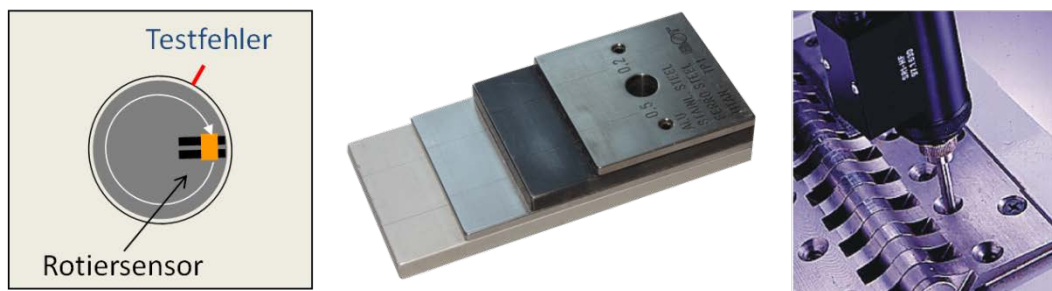


Bild 3: Prüfung mit einem Innenrotiersensor und Testkörper der Fa. Rohmann, Frankenthal

Handrotoren sind mechanische Präzisionsgeräte, in denen die Signale vom Stator auf den Rotor zum Sensor und danach wieder zurück auf den Stator übertragen werden müssen. Der Aufwand für eine störungsfreie Funktion ist erheblich, so dass Handrotoren kostspielig sind. Im Hochschulbereich können aus Kostengründen nicht genügend bereitgestellt werden.

Um dem Lernenden dennoch eine realitätsnahe Ausbildung angeeignet zu lassen, wurde ein Dynamik-Set als Ergänzung für das bewährte EddyCation-System [1-2] geschaffen. Ziel waren die Nutzung der vorhandenen Sensoren und keinerlei Eingriff in die vorhandene Gerätetechnik.

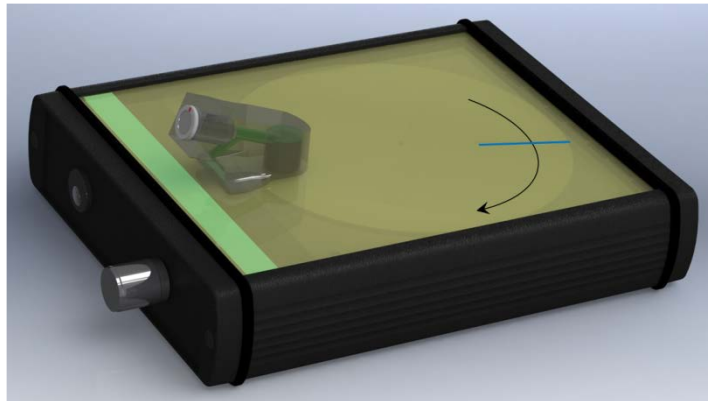


Bild 4: Wirbelstromsensor auf dem rotierenden Testkörper

Bild 4 zeigt die Lösung. In einer Box rotiert eine geschlitzte Aluminiumscheibe mit einstellbarer Drehzahl dicht unter einer halbtransparenten Glasfaserplatte. Der Wirbelstromsensor wird auf die Platte aufgesetzt. Dank seiner Konstruktion erreicht das Magnetfeld die Aluminiumplatte ohne Probleme.

Der Schlitz produziert ein starkes, aber auch kurzes Signal. Um dieses hinreichend detailliert zu erfassen, wurde die NF-Bandbreite des Systems erweitert. Während für den Handbetrieb eine Demodulationsrate von 200 pro Sekunde ausreicht, wurde sie für den Rotorbetrieb auf 6000 pro Sekunde erhöht. Da die Demodulation per Software erfolgt, ist lediglich ein entsprechendes Upgrade der EddyCation-Software erforderlich.

In die Box wurden mehrere Störquellen eingebaut, deren Signale der Lernende unterdrücken soll. Zum einen ist die Aluminiumscheibe nicht eben, so dass ein permanentes Lift-off-Signal entsteht, dessen Grundfrequenz der Drehzahl entspricht. Die zweite Störquelle ist die Motorsteuerung, deren Schaltsignale im Messsignal sichtbar werden. Diese Schaltsignale besitzen eine Form, die dem Rissignal ähnelt. Als hochfrequente Störquelle wurde ein Schaltwandler verbaut, der einen Lichtstreifen versorgt.

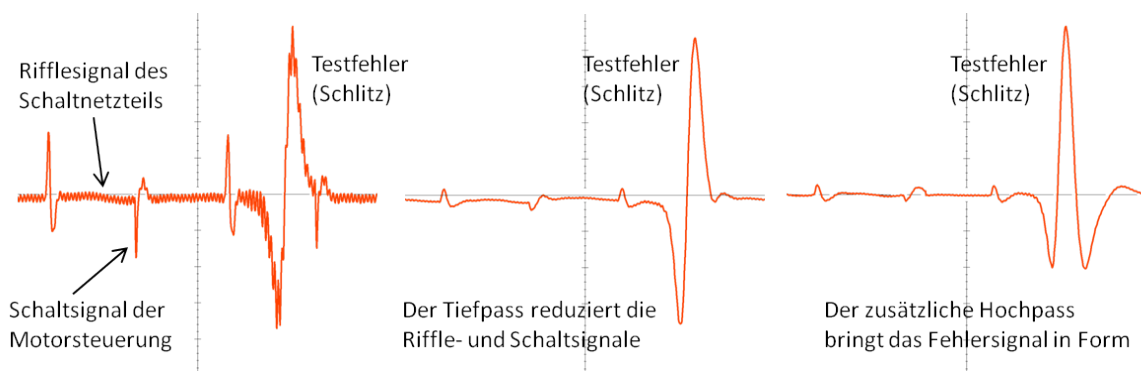


Bild 5: Signale des EddyCation-Differenzsensors bei 12 kHz in Yt-Darstellung.
Links Rohsignal, Mitte: nach dem Tiefpass, rechts: nach Bandpass aus Tief- und Hochpass

Der Lift-off ist nur im Signal des Absolutensors (Bild 2 links) zu erkennen, während der Differenzsensor bereits ein Lift-off-befreites Rohsignal liefert (Bild 5 links). Gut zu erkennen ist das Schaltsignal der Motorsteuerung, das viermal pro Umdrehung auftritt. Dem überlagert sich der Riffle des Schaltnetzteils. Beide Störsignale sind von der Sensorposition abhängig. Der Riffle verschwindet, wenn man den Sensor gegenüber dem

Schaltwandler aufsetzt, das Schaltsignal verringert sich mit größerem Abstand von der Scheibenmitte.

Die Filtereinstellung gilt als optimal, wenn der Tiefpass soweit geschlossen ist, dass hochfrequente Störer zurückgehen, das Rissignal jedoch kaum beeinträchtigt wird. Der Hochpass sorgt für die Unterdrückung niederfrequenter Störer (häufig der Lift-off oder Drifterscheinungen) und modifiziert die Signalform des Risses so, dass die beiden Minima möglichst gleiche Werte besitzen.

Bild 6 zeigt, dass die Signale auch in der XY-Ebene dargestellt werden können. Die Wirkung der Störer zeigt sich im Rohsignal sehr deutlich, an eine sinnvolle Auswertung ist kaum zu denken. Der Tiefpass liefert das erwartete bereinigte 8förmige Fehlerbild des Differenzsensors, während ein Bandpass schließlich für die normgerechte und auswertbare Darstellung sorgt. Auch hier ist die Verwendung von Schwellen möglich.

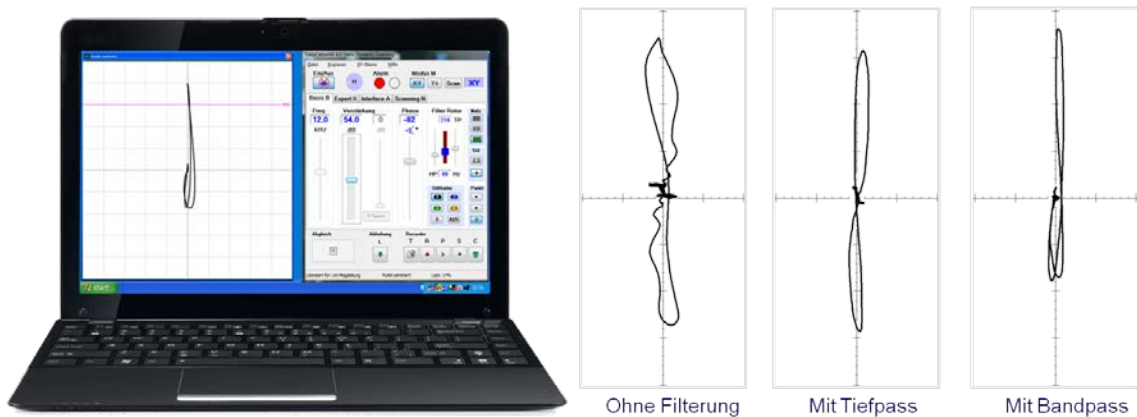


Bild 6: Signale des EddyCation-Differenzsensors bei 12 kHz in XY-Darstellung: linkes Teilbild: Darstellung auf dem Laptop-Rohsignal, rechtes Teilbild: links Rohsignal, Mitte: nach dem Tiefpass, rechts: nach Bandpass aus Tief- und Hochpass

In Bild 7 wird die Möglichkeit der kombinierten XY- und Yt-Darstellung demonstriert. Hier wird die Wichtigkeit der korrekten Phaseneinstellung deutlich. Im linken Teilbild stimmt die Phaseneinstellung, im rechten ist sie falsch. Das Steuerfenster in der Mitte dient der Auswahl von Hand- oder Rotierbetrieb, zeigt die Rotordrehzahl an und wählt den Ort des eingeblendeten XY-Bildes. Der Schieberegler unten dient der Positionierung der Signale in der Yt-Darstellung.

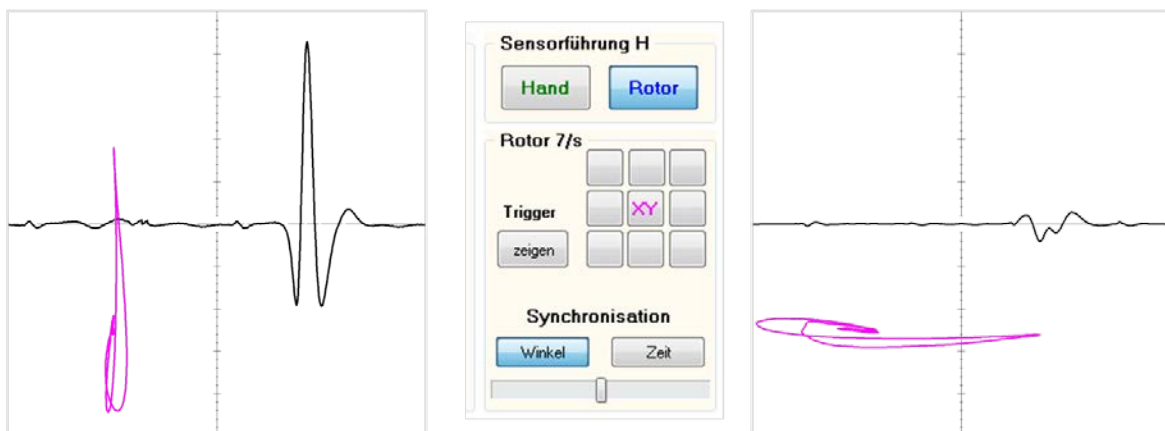


Bild 7: Signale des EddyCation-Differenzsensors bei 12 kHz in kombinierter Darstellung. links: korrekte Phaseneinstellung, Mitte: Steuerfenster, rechts: falsche Phaseneinstellung

Besonders wertvoll ist die Möglichkeit der Drehzahleinstellung der Aluminiumscheibe. Hier zeigt sich, dass eine einmal gefundene optimale Filtereinstellung nur für eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit des Sensors gilt. Ändert sich diese, müssen die Filter nachjustiert werden.

2. Testkörper für die Rohrprüfung

Die Rohrprüfung ist eines der Hauptanwendungsfelder der Wirbelstromprüfung. Durch immer bessere Sensoren, Geräte und Auswertungsverfahren können Innen- und Außenfehler sicher getrennt und die Restwandstärke hinreichend genau bestimmt werden. Das Erlernen des korrekten Vorgehens setzt Rohre mit Testfehlern sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite voraus. Innenfehler einzubringen ist jedoch aufwändig und teuer, so dass fein abgestufte Fehlerreihen für Ausbildungszwecke kaum zu realisieren sind. Die Idee des Rohrdemonstrators setzt genau an dieser Stelle an. In das Rohr werden nur Außenfehler eingebracht (gebohrt, gefräst, erodiert). Für eine Außenspule erscheinen diese Fehler als Oberflächenfehler. Für eine Innenspule liegen dieselben Fehler jedoch als verdeckte Fehler an der prüfabweandten Seite und liefern andere Signale. Bild 8 zeigt den Demonstrator in der Gesamtansicht.

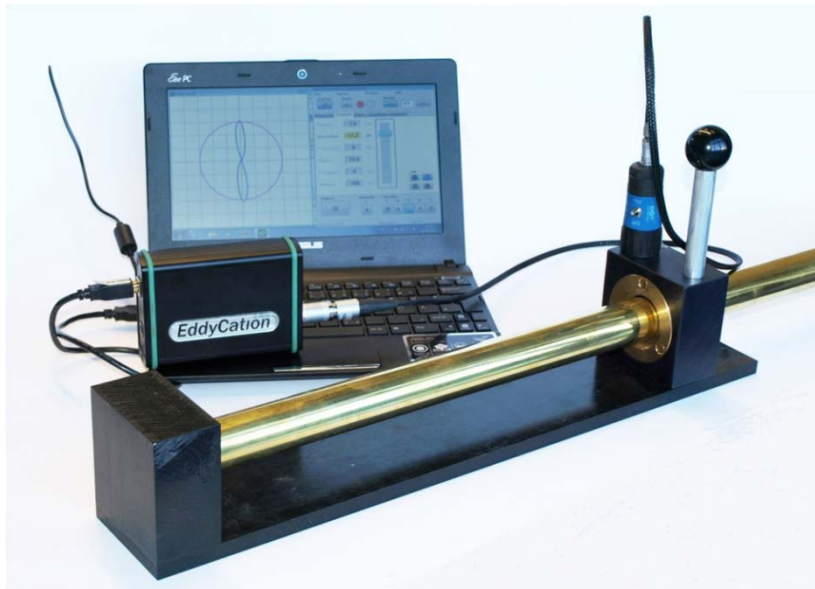


Bild 8: Aufbau des Rohrdemonstrators im Zusammenspiel mit EddyCation [9]

Der Innenaufbau wird in Bild 9 erkennbar. Das Testrohr wird auf einen Kunststoffstab (Führungshilfe geschoben), der am linken Ende mit dem Träger fest verbunden ist. Dabei bewegt sich das Rohr über zwei Spulensysteme (hier Differenzanordnungen), eine Innenspule und eine Außenspule. Die Innenspule ist in die Führungshilfe montiert, die Außenspule besitzt einen eigenen Spulenträger, der einen hinreichenden Abstand für das Rohr zur Führungshilfe belässt. Beide Spulensysteme befinden sich an leicht unterschiedlichen Positionen in Axialrichtung, so dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. Die Auswahl der Prüfspule geschieht durch Umstecken an der EddyCation-Box.

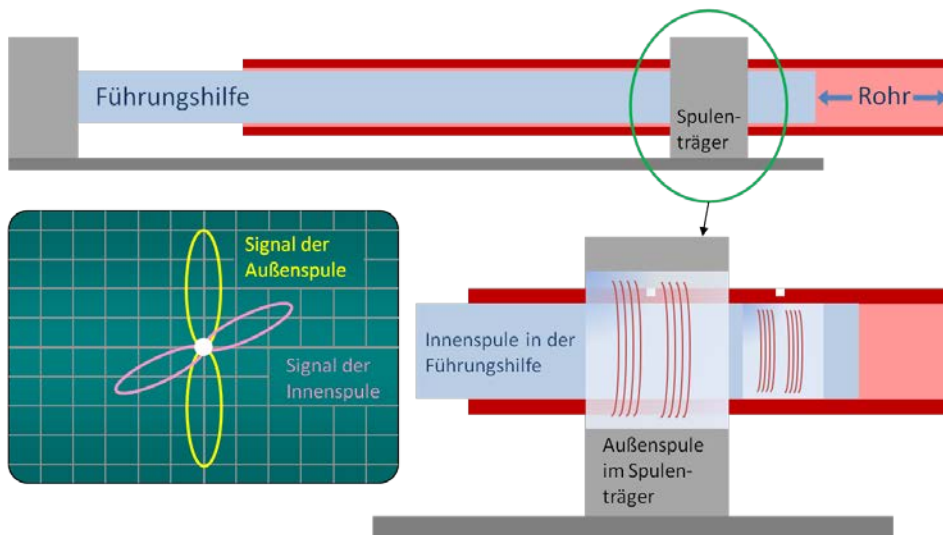


Bild 9: Der Demonstrator enthält eine Innen- und eine Außenspule, so dass in das Rohr lediglich Außenfehler eingebracht werden müssen, um das Signalverhalten von Außen- und Innenfehlern studieren zu können, nach [9]

Im Rohr befinden sich diverse Testfehler, deren Signalverhalten bei verschiedenen Frequenzen, Empfindlichkeiten und Phasenlagen untersucht wird. Bild 10 stellt ein Ergebnis des Vergleichs von Innen- und Außenspulen dar. Symbolisch ist die Prüfsituation rechts unten im Protokoll dargestellt. Die Oberflächenfehler werden nach oben, die verdeckten Fehler nach unten abgebildet. Passend dazu trägt der Lernende die Ergebnisse der Prüfung ein. Der 40%-Oberflächenfehler wird auf 100% Bildschirmhöhe justiert, die restlichen Fehler erscheinen kleiner und phasenversetzt. Während die Phasenaufspreizung verschieden tiefer Oberflächenfehler recht gering bleibt, ist diese bei verdeckten Fehlern deutlich größer.

Bestimmung der Verhältnisse von Außen- und Innenfehleranzeigen				
Prüfempfindlichkeit: 65,8 dB				Phaseneinstellung: 148,5°
Kontrollfehler:	Außen:	Innen:	Außen:	Innen:
	40 %	40 %	20 %	20 %
Anzeighöhe:	100 %	45 %	60 %	20 %
Anzeigenfarbe:	schwarz	blau	grün	orange
Verhältnis:	2,2 : 1		3 : 1	

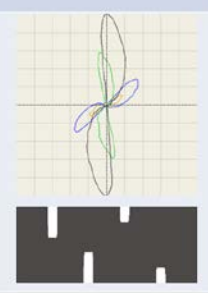


Bild 10: Vergleich der Anzeigen von Innen- und Außenfehlern [9]

Eine weitere Gruppe von Testfehlern besteht aus Bohrungen in unterschiedlichem Abstand und dient der Demonstration der erreichbaren Ortsauflösung (Bild 11). Diese hängt vom Abstand der Spulen der Differenzanordnung ab. Wird der Fehlerabstand zu klein, können die Fehler nicht mehr sauber aufgelöst werden. Die linke Dreiergruppe mit einem Fehlerabstand von 5 mm liefert saubere Signale jedes einzelnen Testfehlers, die rechte Gruppe mit nur 2 mm Fehlerabstand erbringt teils deutlich reduzierte Signalamplituden. Hier gerät der Fehlerabstand in die Größenordnung des Abstands der Empfangsspulen, so dass keine saubere Differenzbildung zwischen Fehler und fehlerfreiem Werkstoff mehr erfolgen kann.

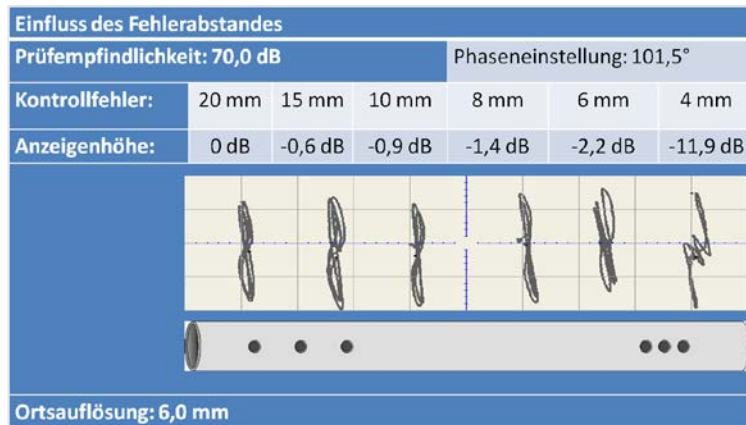


Bild 11: Veränderung der Anzeigen mit dem Fehlerabstand [9]

Im Bild 12 wird der Einfluss der Fehlerlänge auf die Signaldarstellung untersucht. Bei langen Fehlern liefern der Fehlerein- und -auslauf deutlich separierte Signalschleifen. Während sich das Differenzsystem genau über dem Fehler befindet, entsteht kein Fehlersignal. Ist der Fehler dagegen kurz, überlagern sich die Signale von Fehlerein- und -auslauf, so dass kleinere Signalamplituden entstehen und der Fehler falsch bewertet werden kann.

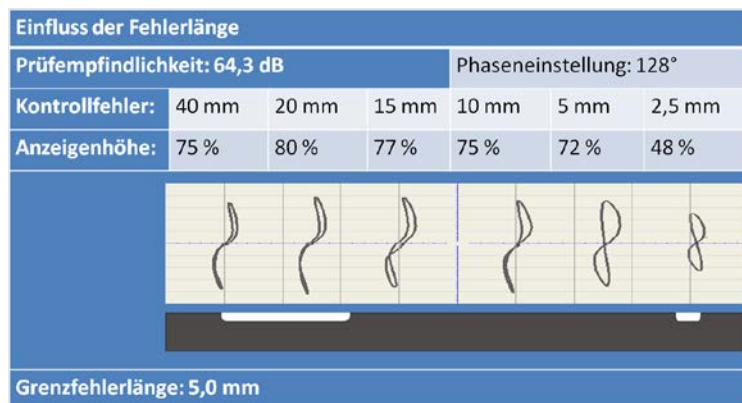


Bild 12: Einfluss der Fehlerlänge auf die Anzeigen [9]

3. Zusammenfassung

Beide Testkörper helfen, das Verständnis der Lernenden für die Signalbildung zu verbessern, indem sie das Wesentliche der Prüfsituation herausarbeiten und befreit von anspruchsvollem Handling üben lassen. Die Testkörper sind kostengünstig, da sie keine Präzisionsmechanik erfordern und ohne weiteres an das Ausbildungsgerät EddyCation angeschlossen werden können.

Das Dynamik-Set gestattet die eingehende Beschäftigung mit der Signalfilterung. Die Wirkung von Tief-, Hoch- und Bandpass kann an einem speziell konzipierten Testkörper eingehend studiert werden. Eingebaute Störquellen erlauben praktische Übungen unter realitätsnahen Bedingungen.

Der Rohrdemonstrator erfordert keine teuren Testfehler und keine aufwändige Rohrzentrierung. In einer Ausbaustufe ist auch eine mechanische Rohrbewegung denkbar, die die Filtereinstellung bei der Rohrprüfung erlernbar machen kann.

Referenzen

- [1] Mook, G.: Die Wirbelstromprüfung “spielend” erlernen! ZfP-Zeitung 103 (2007) 2, S. 35-38
- [2] Mook, G.; Simonin, J.: Eddy current tools for education and innovation, 17th World Conference on Non-destructive Testing, paper 379, Shanghai, Oct. 25-28, 2008
- [3] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: 1D-, 2D- und 3D-Bewegfeldsensoren zur elektromagnetischen Bildgewinnung, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DACH-Jahrestagung, St. Gallen, 28.-30.4.2008, P14
- [4] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Wirbelstromarrays für hohe Bildschärfe, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, P24
- [5] Mook, G.; Rost, P.; Michel, F.; Simonin, J.: Low Frequency Eddy Current Arrays with Video Clock, 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, June, 7-11, 2010, paper 1.2.7
- [6] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Electromagnetic imaging using probe arrays. Journal of Mechanical Engineering 57 (2011) 3, 227 -236
- [7] Mook, G.; Simonin, J.: Neue Geräteentwicklungen zur ET-Ausbildung. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Bremen, 30.5.-1.6.2011, Berichtsband 127-CD, P35
- [8] Mook, G.; Simonin, J.: Wirbelstromprüfung – lehren und lernen, DACH-Tagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 17.-19.9.2012 Graz, P2
- [9] Nowack, H.: Entwurf, Aufbau und Erprobung von Demonstratoren zur statischen und dynamischen Wirbelstromprüfung, Diplomarbeit an der Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt, 2013