

# Dynamische Wirbelstromprüfung mit EddyCation

Gerhard MOOK, Jouri SIMONIN

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Werkstoff- und Füge­technik, PF 4120, 39016 Magdeburg

e-mail: mook@ovgu.de

**Kurzfassung.** Bei der studentischen Ausbildung zur Wirbelstromprüfung zeigen sich häufig Probleme im Verständnis für die Filtereinstellung bei dynamischen Prüfaufgaben. Es fehlt das Wissen um die Wirkung von Hoch- und Tiefpassfiltern auf den Signalverlauf. Hier setzt das Rotorkonzept von EddyCation an. Mit Hilfe der vorhandenen niederfrequenten Absolut- und Differenzsensoren soll die dynamische Prüfung gelehrt und gelernt werden. Dazu wurde ein rotierender Testkörper mit wählbarer Drehzahl entwickelt, auf den übliche Tastsensoren aufgesetzt werden können. Die Signale können im XY- oder Yt-Modus dargestellt werden. Die Synchronisation mit der Drehzahl erfolgt automatisch, so dass sich der Lernende auf die Filtereinstellung konzentrieren und deren drehzahlabhängige Wirkung studieren kann.

Zur Demonstration der Störsignalunterdrückung wurde eine Störquelle eingebaut, deren Signale durch optimale Filtereinstellung zu eliminieren sind.

## 1. Einführung

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.

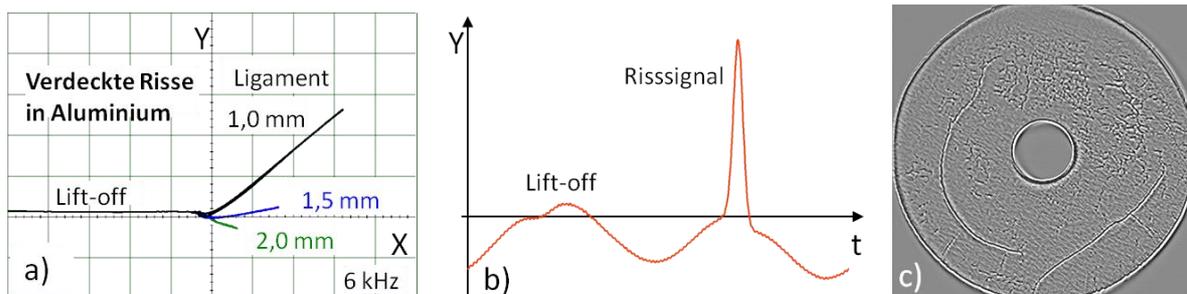


Bild 1: a) Statische, b) dynamische und c) topologische Verfahren der Signalinterpretation

Die dynamischen Verfahren setzen auf die Änderungsgeschwindigkeit des Messsignals. So ist zu erwarten, dass Risse eine schnelle Signaländerung und Gefügevariationen meist 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 Rissignal 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.

## 2. 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 Sensorkonstruktion 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.

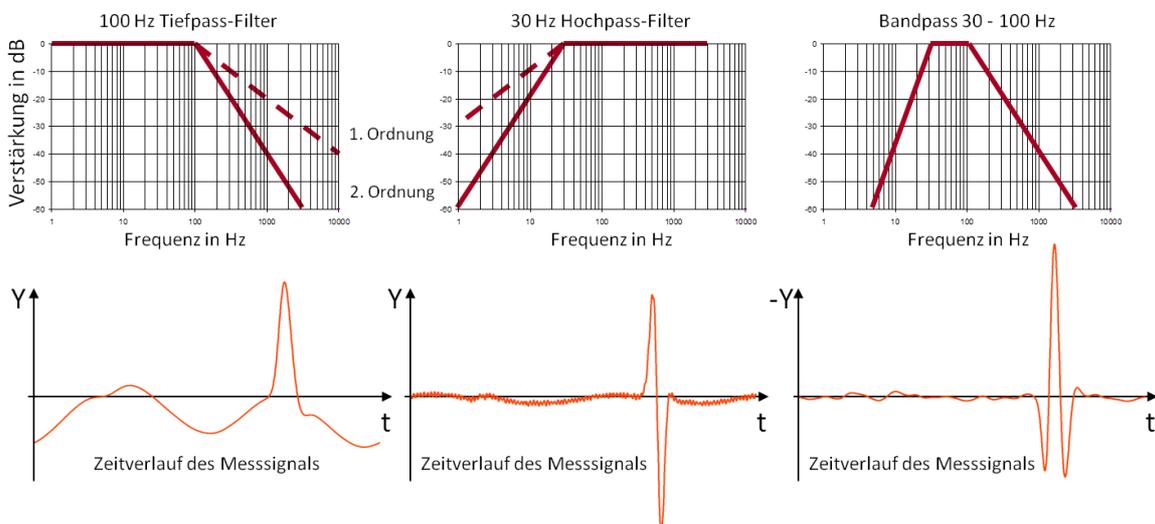


Bild 2: Frequenzgang und Wirkung diverser Filter auf das Zeitsignal eines Absolutensors

Ein Tiefpass (Bild 2 links) beseitigt den leichten Riffle auf dem Zeitsignal aus Bild 1b) beseitigen, 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.

### 3. Filter richtig einstellen

Die so aufgebaute Erwartung soll nun im Experiment überprüft werden. Doch 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 (Mitte) geprüft, in die eine axiale Nut als Testfehler eingebracht wurde (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 manipuliert die Filter.

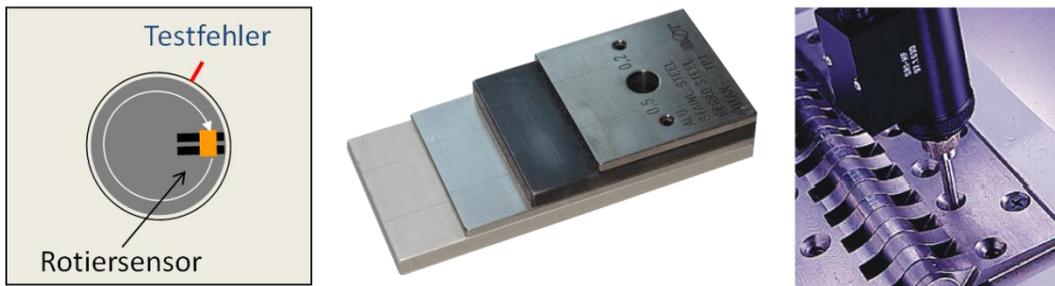


Bild 3: Prüfung mit einem Innenrotiersensor und Testkörper der Fa. Rohmann, Frankenthal

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 den Lernenden dennoch eine realitätsnahe Ausbildung angedeihen 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 Gerätetechnik.

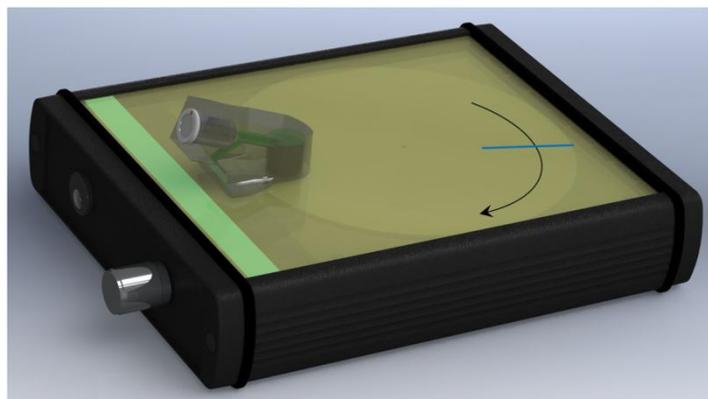


Bild 4: Wirbelstromsensor auf dem rotierenden Testkörper

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 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 eine Schaltwandler verbaut, der einen Leuchtstreifen versorgt.

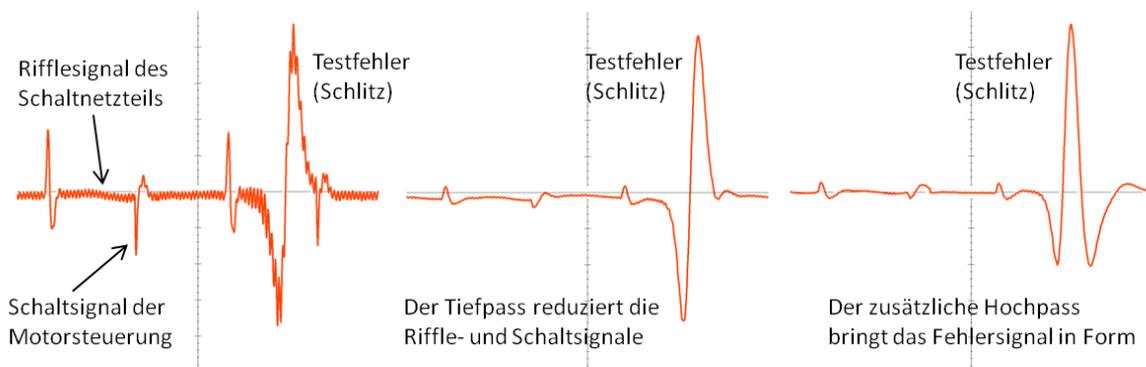


Bild 5: Signale des EddyCation-Differenzsensors bei 12 kHz in Yt-Darstellung.  
Links Rohsignal, Mitte: nach dem Tiefpass, rechts: nach Bandpass aus Tief- und Hochpass

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 sind 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, dass 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 Rohbild sehr deutlich, an eine sinnvolle Auswertung ist kaum zu denken. Der Tiefpass liefert das erwartete bereinigte 8-förmige Fehlerbild des Differenzsensors, während ein Bandpass schließlich für die normgerechte und auswertbare Darstellung sorgt. Auch hier ist die Verwendung von Schwellen möglich.

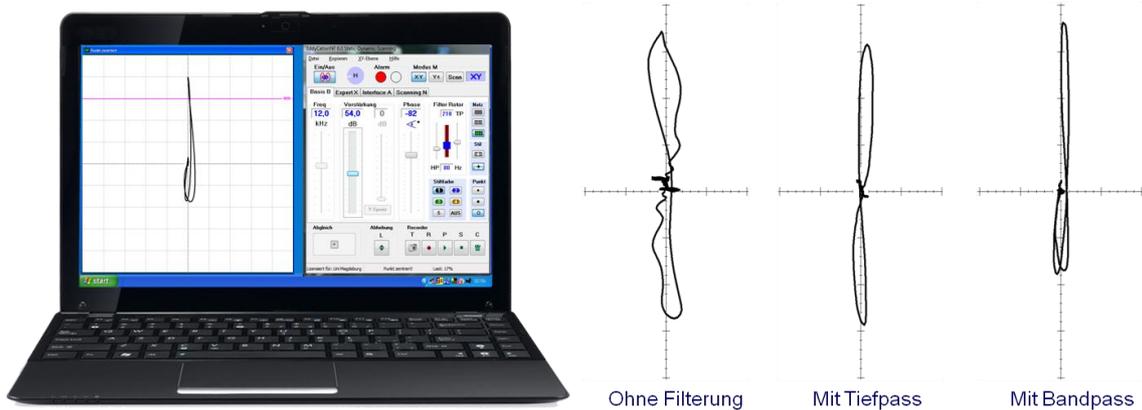


Bild 6: Signale des EddyCation-Differenzsensors bei 12 kHz in XY-Darstellung:  
 linkes Teilbild: Darstellung auf dem Laptop Rohsignal, rechtes Teilbild: links Rohsignal, Mitte: nach dem Tiefpass, rechts: nach Bandpass aus Tief- und Hochpass

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 der Ort des eingeblendeten XY-Bildes. Der Schieberegler unten dient der Positionierung der Signale in der Yt-Darstellung.

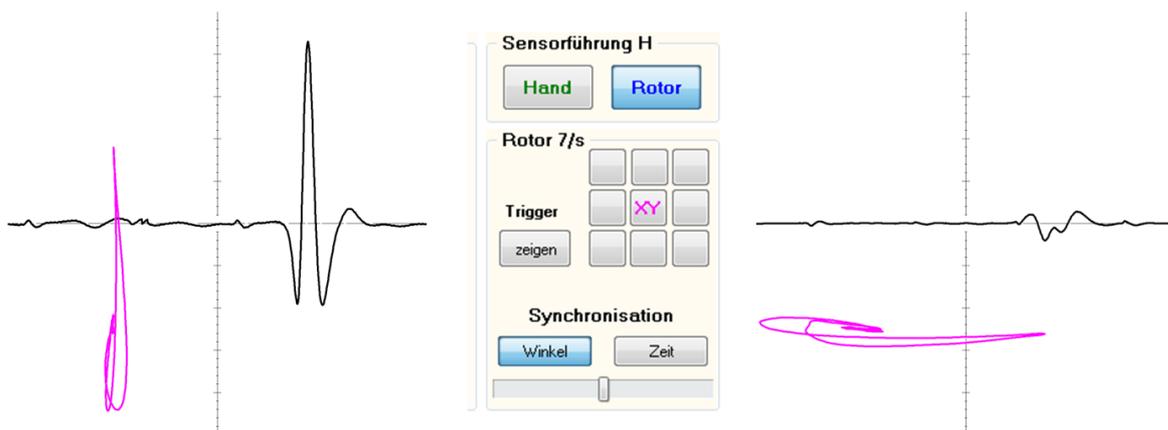


Bild 7: Signale des EddyCation-Differenzsensors bei 12 kHz in kombinierter Darstellung.  
 links: korrekte Phaseneinstellung, Mitte: Steuerfenster, rechts: falsche Phaseneinstellung

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

#### 4. Ortsfilterung

Das Prinzip des Sensorarrays wurde bereits in [3-8] vorgestellt. Anstelle eines einzelnen Sensors werden viele Sensoren zu einer Sensorzeile zusammengeschaltet. Mit dieser Anordnung können sehr einfach Wirbelstrombilder gewonnen werden. Dazu wird die Zeile manuell über das Prüfobjekt geführt. Ein eingebauter Wegaufnehmer erfasst diese Bewegung und sorgt für die ortsrichtige Darstellung der Signale der einzelnen Sensoren der Zeile. Die erforderliche Elektronik findet im Sensorgehäuse Platz, so dass auch hier ein

direkter Anschluss an den USB-Port eines Windows-Netbooks möglich ist, der auch die Energieversorgung übernimmt. Es sind keinerlei weitere Zusatzgeräte erforderlich. Bild 8 rechts zeigt das Sensorarray auf einem gravierten Aluminiumblech als Testkörper. Links im Bild ist das Bedienfenster mit der Signaldarstellung aller Sensoren in der XY-Ebene zu erkennen.

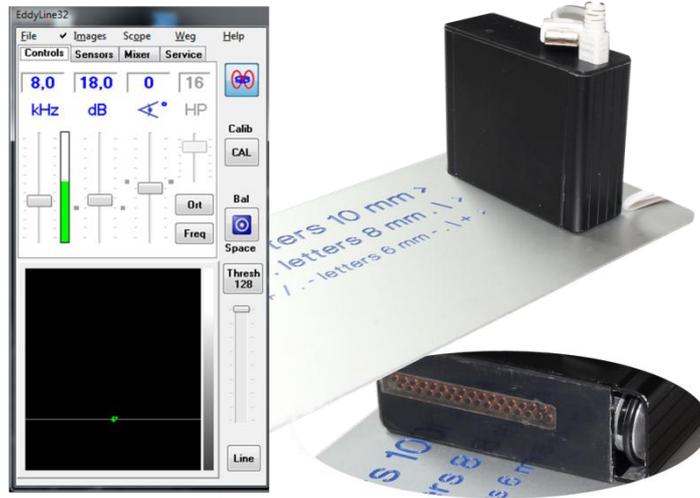


Bild 8: Sensorarray, unten: Aufbau, links: Bedienfenster, rechts: Prüfposition, oben: Ergebnisbilder

Die Gravur des Testkörpers ist im Wirbelstrombild 9 lesbar, was natürlich auch von der Rückseite aus funktioniert. Die linken drei Teilbilder zeigen das Y- und das X-Bild als Rohbild vor und nach einer Schwellenbildung und als Falschfarbenbild. Soll ein herkömmlicher Bandpass zur Signalsoptimierung genutzt werden, müssten dessen Eckfrequenzen der aktuellen Prüfgeschwindigkeit angepasst werden. Hier hilft die Idee der Ortsfilterung weiter. Nicht der Zeitbezug der Signaländerung ist die Basis für die Filterung, sondern der Ortsbezug. Analog zur Frequenz im Zeitbereich spricht man hier auch von Ortsfrequenzen und meint damit Wiederholungen pro Längeneinheit [9].

Im Unterschied zu den drei linken Teilbildern wurde im rechten Teilbild 9 ein solcher Ortsfilter hinzu geschaltet. Es handelt sich dabei um einen Hochpass, der die Kanten möglicher Fehler hervorhebt. Gleichzeitig erspart er den Abgleich des Arrays auf dem Prüfkörper. Eine Signalbildung erfolgt nur, wenn sich die Zeile bewegt.

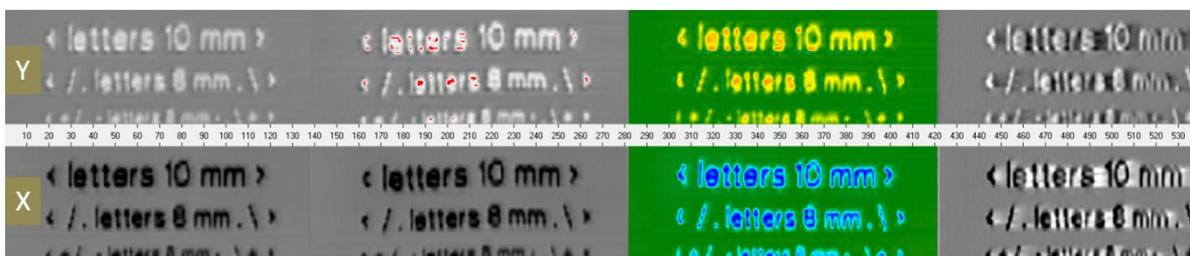


Bild 9: Ergebnisbilder des Sensorarrays v.l.n.r.: Rohbild, Rohbild mit y-Schwelle, Falschfarbenbild, Hochpass gefiltertes Bild für die Kantenanhebung

## Zusammenfassung

Das Dynamik-Set zum EddyCation-System gestattet die eingehende Beschäftigung mit der Signalfilterung. Die Wirkung von Tief-, Hoch- und Bandpass kann an einem speziell konzipierten Testkörper eingehend studiert werden. Speziell eingebaute Störquellen

erlauben praktische Übungen unter realitätsnahen Bedingungen. Wegen des einfachen Aufbaus und der Nutzung vorhandener Sensoren halten sich die Kosten in engen Grenzen. Das Sensorarray mit seiner integrierten Wegaufzeichnung erlaubt die Nutzung von Ortsfiltern, die unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit arbeiten.

## 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, 17<sup>th</sup> World Conference on Non-destructive Testing, paper 379, Shanghai, Oct. 25-28, 2008
- [3] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: 1D-, 2D- und 3D-Bewegtfeldsensoren 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] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ortsfrequenz>, 06. Feb. 2013