

Wirbelstromprüfung - lehren und lernen

Gerhard MOOK, Jouri SIMONIN
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, PF 4120, 39016 Magdeburg
eMail: mook@ovgu.de

Kurzfassung. Moderne Ausbildungskonzepte berücksichtigen die sich verändernden Rahmenbedingungen für Lehrende und Lernende. Der Computer ist als Werkzeug nicht mehr wegzudenken, der Umgang damit selbstverständlich. Smartphones drängen auf den Markt, deren Leistungsfähigkeit kaum geringer ist. Außerdem verkürzen sich mit dem Übergang von der Diplom- zur Bachelor/Master-Ausbildung an Universitäten, Hochschulen und Fachhochschulen die Ausbildungszeiten für die Basisdisziplinen. Somit stehen auch für die Zerstörungsfreie Prüfung weniger Vorlesungen und Praktika als bisher zur Verfügung.

Der Beitrag stellt neue Geräte zur effizienten Vermittlung von Kenntnissen und Fähigkeiten auf dem Gebiet der Wirbelstromprüfung vor, die nicht nur auf die studentische Ausbildung beschränkt sind.

1. Einführung

Bei der Vermittlung von Kenntnissen der Wirbelstromprüfung kommt es darauf an, dem Lernenden diese für ihn neue Welt verständlich darzustellen und aus dem anfänglichen Erstaunen eine gewisse Begeisterung für das Verfahren zu entfachen. Gelingt es, an die Welt Computer- und Smartphonetechnik anzuknüpfen, ist der Erfolg vorprogrammiert. Zu diesem Zweck wurden das bekannte Wirbelstromsystem EddyCation (Kunstwort aus Eddy Current und Education) weiterentwickelt und zusätzlich ein bildgebendes Prüfgerät auf der Basis einer Sensorzeile geschaffen. Beide Geräte können einfach an den USB-Port eines Windows-Netbooks angeschlossen werden und bringen Sensoren und Testkörper mit.

Direkt an die Ausbildungsinhalte knüpft die erste Wirbelstrom-App für Androidgeräte an, die es ermöglicht, die elektrische Leitfähigkeit nichtferromagnetischer Metalle zu bestimmen.

2. Signalentstehung

Der Einfluss elektrischer, magnetischer und geometrischer Größen auf das Wirbelstromsignal wird in der normierten Impedanzebene sensorunabhängig beschrieben. Die teils unübersichtliche Ortskurvendarstellung erschließt sich dem Lernenden jedoch nur bei intensiver Beschäftigung und kann an einem realen Wirbelstromgerät nur lückenhaft nachvollzogen werden. Weder die Normierung noch der Frequenz- oder Leitfähigkeitseinfluss lässt sich am Prüfgerät direkt demonstrieren. Um diese Lücke zu schließen, haben die Studenten Verena von Hintzenstern, Tina Haase, Anne Goldammer und Sven Andres von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Studiengang Computervisualistik mit Anwendungsfach Werkstofftechnik) das halbquantitative 3D



Simulationstool fxEddy geschrieben, das die einzelnen Effekte am Computer nachvollziehbar macht, ohne eine aufwändige, teure und relativ langsame numerische Modellierung zu bemühen. Es verzichtet auf exakte feldtheoretische Lösungen zugunsten der Geschwindigkeit und Handlichkeit. Es will eher ein Lehrbuch zum „Spielen“ sein [1].

2. Statische und dynamische Prüfung mit EddyCation

2.1 Prüffrequenzen bis 5 MHz

Das bekannte und an vielen Ausbildungseinrichtungen mit Erfolg genutzte Prüfsystem EddyCation war bislang auf einen Prüffrequenzbereich bis 20 kHz beschränkt [1, 2, 3]. Für das Üben der wichtigsten Prüfaufgaben ist dieser Frequenzbereich ausreichend. Dazu gehören die Sortierung, die Rissprüfung an gut leitfähigen Werkstoffen und die Prüfung auf Korrosionsfolgen. Der Wunsch nach höheren Prüffrequenzen entsteht bei der Prüfung schlecht leitfähiger Werkstoffe wie Titan oder carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Auch für eine empfindliche Oberflächenrissprüfung an ferromagnetischen Objekten werden gern Frequenzen ab 100 kHz benutzt.

Diesem Wunsch wurde mit der Entwicklung der Geräteversion EddyCationHF auf neuer Hardwarebasis Rechnung getragen. Der Prüffrequenzbereich erstreckt sich bis hinauf zu 5 MHz, die Bedienung hat sich nicht verändert. Zum Kit gehört auch ein entsprechender Hochfrequenzsensor in Stiftform. Bild 1 zeigt dieses Kit.



Bild 1: EddyCationHF-Kit und ein Ergebnisbild des Differenzensors

2.2 Prüfaufgaben mit dem niederfrequenten Absolutsensor

Zum Erlernen von Sortieraufgaben liegt ein Satz Ronden verschiedener Metalle und Legierungen bei. Diese unterscheiden sich in ihrer elektrischen Leitfähigkeit und magnetischen Permeabilität. Setzt man den niederfrequenten Absolutsensor nacheinander

auf diese Ronden auf, erhält man das in Bild 2 rechts unten dargestellte Signalbild. Auf diese Weise lässt sich auch die Münzprüfung demonstrieren.

Zur Rissprüfung liegt ein Aluminiumtestkörper in Form eines 3 mm dicken Bleches bei, das verschieden tiefe Schlitzte enthält, die sowohl von der Ober- als auch von der Unterseite aus nachgewiesen werden können. Bild 2 links oben zeigt die Situation der Oberflächenrissprüfung. Das Abhebesignal (Lift-off-Signal) wird nach links waagrecht gedreht, die Rissignale laufen nach links oben und sind gut vom Abhebesignal zu unterscheiden. Für diese Prüfaufgabe wird keine hohe Eindringtiefe verlangt, so dass man die Prüffrequenz nach bestmöglicher Unterscheidbarkeit des Rissignals vom Abhebesignal wählen kann.

Dreht man den Testkörper um, so entsteht die Situation der Prüfung auf verdeckte Risse. Da hierzu die Eindringtiefe groß sein muss, wird die Prüffrequenz verringert (hier 6 kHz). Bild 2 links unten zeigt die Ergebnisse. Das Abhebesignal läuft auf der x-Achse nach links und die Signale der verdeckten Risse sind nach rechts gerichtet. Unterschiedliche Ligamente (Verdeckungen) lassen sich durch die Phasenlage (Richtung) der Signale bestimmen.

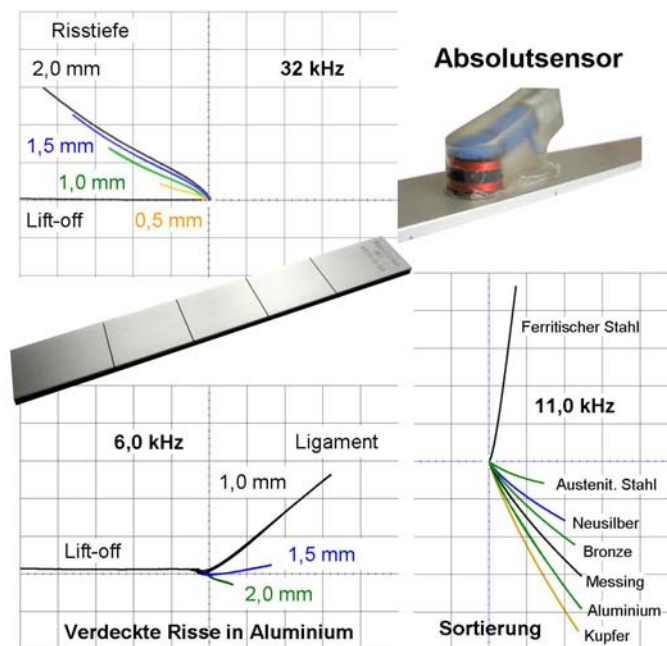


Bild 2: Sortierung und Rissprüfung mit dem niederfrequenten Absolutsensor

Ein weiterer Testkörper - ebenfalls ein 3 mm dickes Al-Blech - simuliert Wanddickenverluste, wie sie beispielsweise durch Korrosion entstehen können. Dieser Testkörper wird von der ungeschädigten Seite aus untersucht. Bild 3 zeigt die Ergebnisse bei 3 Prüffrequenzen. Wie gewohnt liegt das Abhebesignal waagrecht, die lokalen Wanddickenschwächungen äußern sich in Signalen nach oben bzw. nach rechts. Bei der geringeren Prüffrequenz (5,0 kHz) ist die Aufspreizung der Signale verschieden großer Wandschwächungen geringer als bei der höheren Prüffrequenz (13,0 kHz). Hieran wird die mit steigender Prüffrequenz stärker werdende tiefenabhängige Phasendrehung deutlich. Für die Bestimmung der Restwanddicke ist somit eine höhere Prüffrequenz besser geeignet als eine geringere. Voraussetzung ist allerdings, dass mit dieser Frequenz alle geforderten Wanddickenschwächungen nachgewiesen werden können. Wie man am Signal der Restwanddicke von 2,0 mm erkennt, hat hier die geringere Prüffrequenz Vorteile.

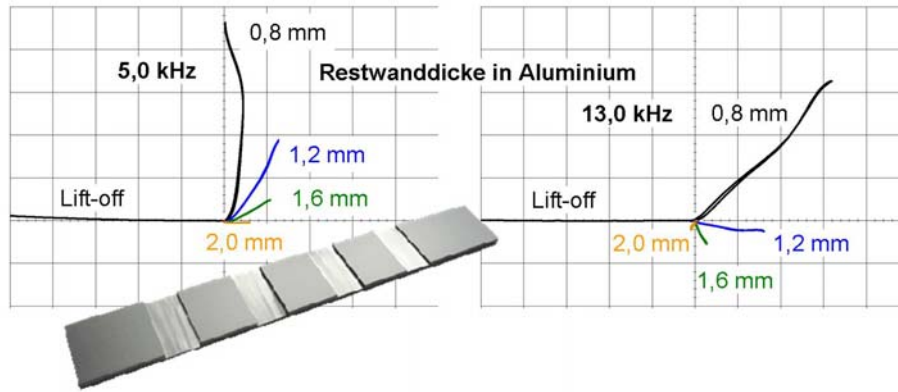


Bild 3: Bestimmung von Wanddickenverlusten mit dem niederfrequenten Absolutsensor

2.3 Prüfaufgaben mit dem Differenzsensor

Der Differenzsensor ist für die Rissprüfung prädestiniert. Da er auf relativ großen Ferritkernspulen basiert, kann er auch für niederfrequente Anwendungen benutzt werden. Seine Besonderheit besteht in der hohen Empfindlichkeit und im 8-förmigen Signal in der XY-Ebene, das einen hohen Wiedererkennungswert besitzt. Bild 4 zeigt Prüfergebnisse an Oberflächenrissen und verdeckten Rissen.

Während die Signale von Oberflächenrissen mit zunehmender Risttiefe zwar stärker werden, drehen sie jedoch nur wenig in Uhrzeigersinn. Bei verdeckten Rissen ist die Signaldrehung viel stärker ausgeprägt und eignet sich zur Bestimmung der Restwanddicke (Ligament).

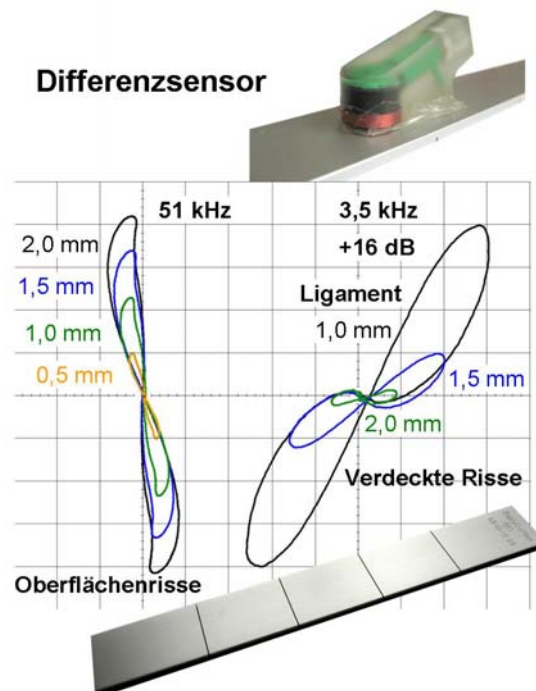


Bild 4: Rissprüfung mit dem Differenzsensor

2.4 Prüfaufgaben mit dem hochfrequenten Absolutsensor

Der hochfrequente Absolutsensor kann bis zu 5 MHz betrieben werden. Mit ihm sind Aufgaben der Oberflächenrissprüfung in ferritischen und austenitischen Stählen lösbar. Darüber hinaus eignet er sich zur Prüfung schlecht leitfähiger Werkstoffe wie Titan. Bild 5 zeigt Ergebnisse der Oberflächerrissprüfung an einem 4-lagigen Testkörper der Fa. Rohmann (Frankenthal). Die 4 Lagen bestehen aus Aluminium, austenitischem Stahl, ferritischem Stahl und Titan. Jede Lage enthält 2 Rissimulationen in Form von Schlitten der Tiefen 0,2 mm und 0,5 mm. Im Bild sind die unterschiedlichen Richtungen der Rissignale gut zu erkennen. Während auf den nicht ferromagnetischen Werkstoffen die Rissrichtung nach links oben deutet, liefert der ferromagnetische Stahl ein Signal nach rechts oben.

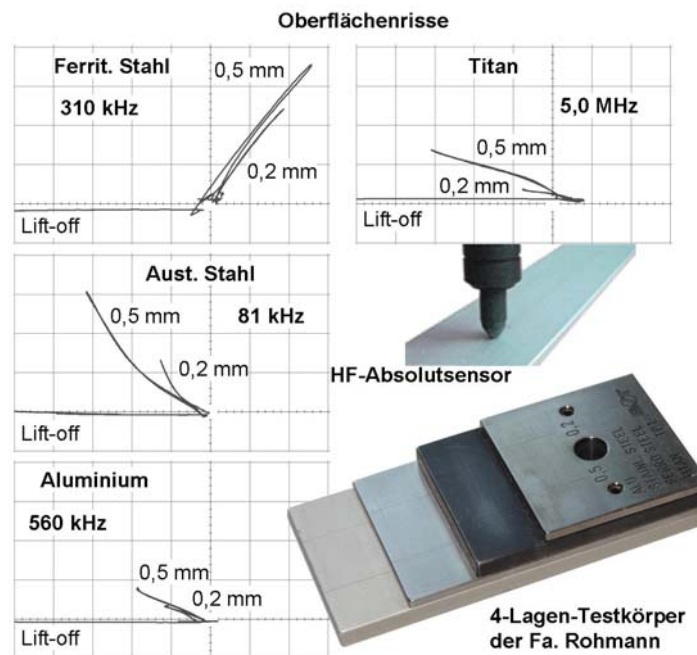


Bild 5: Rissprüfung mit dem Hochfrequenz-Absolutsensor (ohne Achsspreizung)

2.5 Rotier- und Brückensensoren

Die neuesten Weiterentwicklungen betreffen die Anschlussmöglichkeit von kommerziellen Rotier- und Brückensensoren. Rotiersensoren werden für die Prüfung von Bohrungen oder Rohren verwendet, wobei ein kleiner Tastsensor die Mantelfläche wendelförmig abtastet und auf verschiedene Arten darstellen kann. Bild 6 zeigt Laborergebnisse an der Bohrung des 4-Lagen-Testkörpers. In die Mantelfläche der Bohrung sind Schlitz als Rissmodell eingebracht, die von einem Miniatur-Differenzsensor überstrichen werden (Schema in Bildmitte).

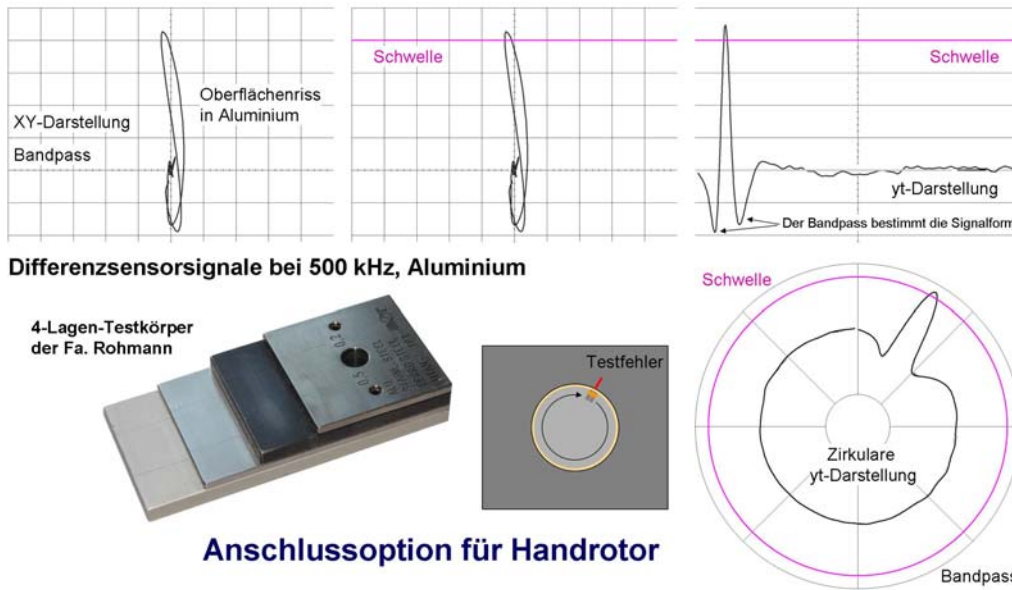
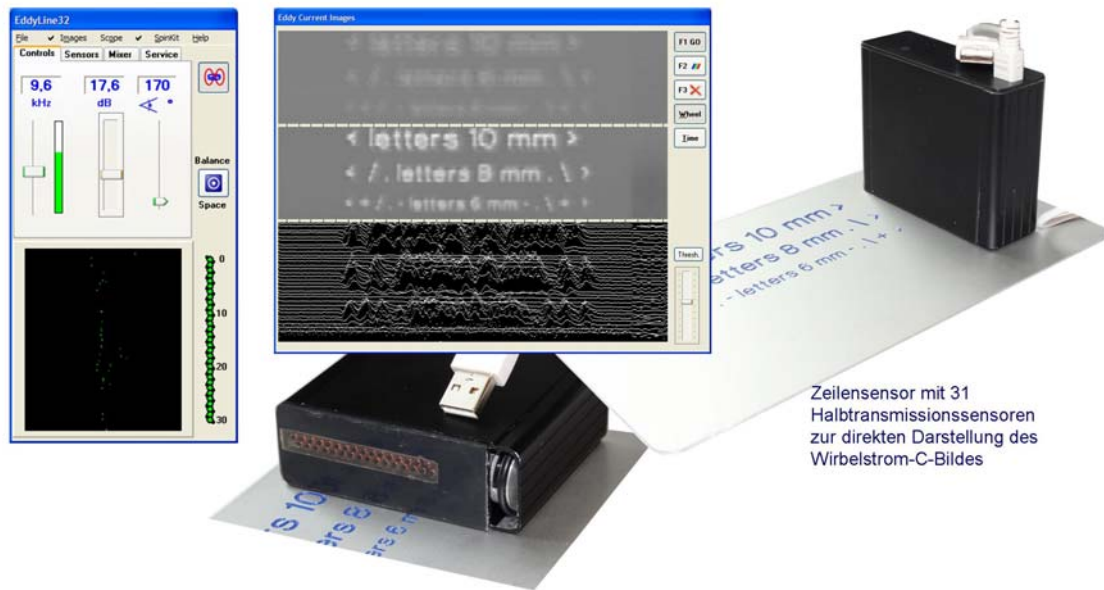


Bild 6: Signale eines Innenrotiersensors (Differenzsensor)

Links oben ist die XY-Ebene mit dem Signal des Risses dargestellt. Das Rissignal wird durch fein einstellbare Hoch- und Tiefpassfilter auf eine in speziellen Vorschriften festgelegte Form gebracht. Mit Hilfe einer Schwelle kann das Vorhandensein von Rissen in einer ja/nein-Anzeige dargestellt werden. Wenn die Position des Risses am Umfang der Bohrung bestimmt werden soll, eignet sich die Yt-Darstellung besser. Sie ist im Bild 6 recht oben zu erkennen. Die x-Richtung entspricht dem Sensorweg, also dem Umfang der Bohrung. In y-Richtung wird das Wirbelstromsignal dargestellt. Aus der x-Koordinate der Anzeige kann die Winkelposition ermittelt werden. Noch einfacher gelingt dies in einer zirkularen Yt-Darstellung (rechts unten). Das Rissignal weist hier direkt in die Winkelposition des Risses in der Bohrung.

3. Bildgebende Wirbelstromprüfung

Das Prinzip des Sensorarrays wurde bereits in [3-7] 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 7 rechts zeigt das Sensorarray auf einem gravierten Aluminiumblech als Testkörper. Die Gravur ist im Wirbelstrombild (Mitte) lesbar. Rechts im Bild sind das Bedienfenster und die XY-Ebene mit allen Sensorsignalen zu erkennen



Zeilensensor mit 31 Halbtransmissionssensoren zur direkten Darstellung des Wirbelstrom-C-Bildes

Bild 7: Sensorarray, unten: Aufbau, links: Bedienfenster, rechts: Prüfposition, oben: Ergebnisbilder

4. Leitfähigkeitsermittlung mit Android-Gerät

EddyCation eignet sich insbesondere zum Erlernen der Wirbelstromprüfung. In Bild 2 wurde bereits der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf das Wirbelstromsignal dargestellt. Auf dem Gedanken der leitfähigkeitsabhängigen Phasenverschiebung basiert eine Android-App für Smartphones, die die Bestimmung der Leitfähigkeit σ in den gängigen Einheiten MS/m (Megasiemens pro Meter) und %IACS (International Annealed Copper Standard) sowie den spezifischen elektrischen Widerstand ρ als Kehrwert der Leitfähigkeit zulässt. Ein spezieller Sensor, der per Klinkenbuchse an das Audibuchse angeschlossen wird, liefert die Messsignale. Bild 8 zeigt den Sensor und einen Screenshot.



Bild 8: Wirbelstromsensor mit 3,5-mm-Klinkenstecker für ein Android-Gerät und Screenshot bei der Leitfähigkeitsbestimmung von Kupfer

Zusammenfassung

Das speziell für die Ausbildung auf dem Gebiet der Wirbelstromprüfung entwickelte EddyCationHF und das EddyCation-Sensorarray sollen die Lehrenden und Lernenden unterstützen, in der gebotenen Kürze möglichst gründliche und langlebige Lerneindrücke zu erzielen. EddyCationHF bietet mit dem stark erweiterten Frequenzbereich und dem zusätzlichen Hochfrequenzsensor Übungsmöglichkeiten für umfassende praxisnahe Aufgabenstellungen. Das leicht zu bedienende Sensorarray führt die Lernenden in die Technik der bildgebenden Wirbelstromprüfung ein.

Als Umsetzung des Gelernten zeigt eine Android-App die wirbelstromtechnische Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit nichtferromagnetischer Werkstoffe.

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