

# Modellierung und Visualisierung der EMUS-Anregung als Hilfsmittel zur Wandleroptimierung

Gerhard KOPP, Herbert WILLEMS  
NDT Systems & Services GmbH & Co. KG  
Friedrich-List-Str.1, 76297 Stutensee

## Kurzfassung

Elektromagnetisch angeregter Ultraschall (EMUS) besitzt im Gegensatz zu herkömmlich über piezoelektrische Prüfköpfe angeregtem Ultraschall den Vorteil, daß die Schallerzeugung direkt an der Oberfläche des Prüfobjekts erfolgt und kein Koppelmedium benötigt wird. Dies ermöglicht z.B. die Ultraschallprüfung in Gaspipelines sowie das Arbeiten bei hohen oder tiefen Temperaturen. Weiterhin bietet die Ultraschallanregung mittels EMUS-Wandlern die Möglichkeit, vielfältige Wellentypen (freie und geführte Wellen) anzuregen.

Erkauft werden diese Vorteile durch einen geringen Wirkungsgrad und Dynamikbereich im Vergleich zur piezoelektrischen Anregung. Durch die Anregung verschiedener Wellentypen entstehen zum Teil komplexe Schallfelder mit einer unter Umständen geringen Modenreinheit, was die Interpretation der Meßergebnisse erschwert. Weiterhin ist die Anwendung auf leitfähige bzw. ferromagnetische Werkstoffe beschränkt.

Eine Möglichkeit zum besseren Verständnis der Wirkungsweise der EMUS-Wandlung bietet die Modellierung mit geeigneten numerischen Verfahren. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell beinhaltet die verschiedenen Mechanismen der EMUS-Anregung (Lorentzkraft, magnetische Kraft und magnetostriktive Anregung) in Verbindung mit einem Finite-Differenzen-Verfahren zur Berechnung der elastodynamischen Wellenausbreitung im Prüfobjekt. Das Modell erlaubt die Berechnung der Ultraschallanregung für vielfältige Wandlergeometrien und Magnetfeldanordnungen in 2D und 3D.

Die Visualisierung der Modellierungsergebnisse kann wahlweise als Gittermodell erfolgen, in welchem die Schallauslenkung der Gitterpunkte direkt dargestellt wird. Alternativ kann die Schallausbreitung auch als Konturplot dargestellt werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, den longitudinalen und transversalen Anteil des Wellenfeldes getrennt voneinander zu betrachten. Dies ist insbesondere nützlich bei der Darstellung von Schallfeldern, welche im Falle der EMUS-Anregung einen hohen Grad an Komplexität erreichen können. Die vorliegende Arbeit verdeutlicht dieses anhand verschiedener Beispiele für die EMUS-Anregung mit unterschiedlichen Wandlergeometrien. Außerdem werden Beispiele zum Vergleich der Modellierungsergebnisse mit experimentellen Ergebnissen vorgestellt.



NDT Systems & Services



## **Modellierung und Visualisierung der EMUS-Anregung als Hilfsmittel zur Wandleroptimierung**

Gerhard Kopp, Herbert Willems

**Seminar des FA Ultraschallprüfung  
11. – 12. November 2013  
Berlin**

## **Modellierung und Visualisierung der EMUS- Anregung als Hilfsmittel zur Wandleroptimierung**



NDT Systems & Services

### **Übersicht**

- Beschreibung des Finite-Differenzen-Modells
- Grundlagen der elektromagnetischen Ultraschallanregung
- Visualisierung der EMUS-Anregung am Beispiel verschiedener Prüfkopfgeometrien
- Zusammenfassung

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Ultraschallmodellierung

### Beschreibung des Modells



NDT Systems & Services

- Finite-Differenzen-Verfahren\*  $\mathcal{O}(\Delta x^2)$
- 2D- oder 3D-Berechnungen
- Randbedingungen:
  - normal- und schubspannungsfrei (z.B. Grenzfläche Stahl / Luft)
  - offen (reflexionsfrei auslaufende Wellen)
  - periodisch, spiegelsymmetrisch (Nutzung von Symmetrieeigenschaften)
- Anregung / Empfang:
  - piezoelektrisch
  - **EMUS**

\* siehe z.B. Th.-R. Heinrich, Die Lösung der elastischen Bewegungsgleichung als Modellfall der Schallemission, TU Berlin, 2009

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS

### Elektromagnetische Ultraschall (EMUS) -Technik



NDT Systems & Services

#### Vorteile der EMUS Anregung

- + kein Koppelmittel nötig (Prüfung in Gasatmosphären / Vakuum)
- + Prüfung bei erhöhten oder tiefen Temperaturen
- + Anregung vielfältiger Wellentypen (freie und geführte Wellen)

#### Nachteile der EMUS Anregung

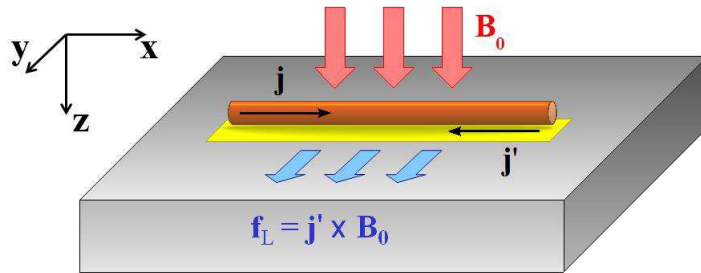
- hohe Sendeleistung und rauscharme Vorverstärker nötig
- beschränkt auf leitfähige bzw. ferromagnetische Werkstoffe
- teilweise komplexe Schallfelder

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Lorentz-Anregung



NDT Systems & Services



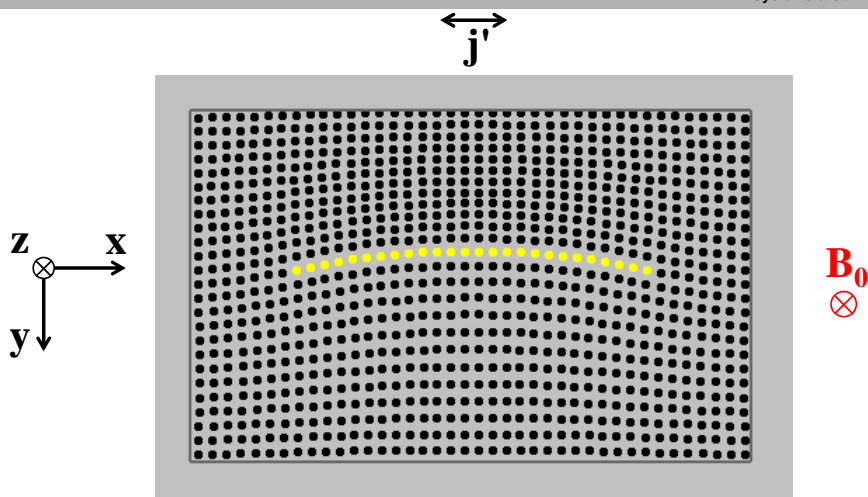
siehe z.B. M. Hirao and H. Ogi. EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Lorentz-Anregung



NDT Systems & Services

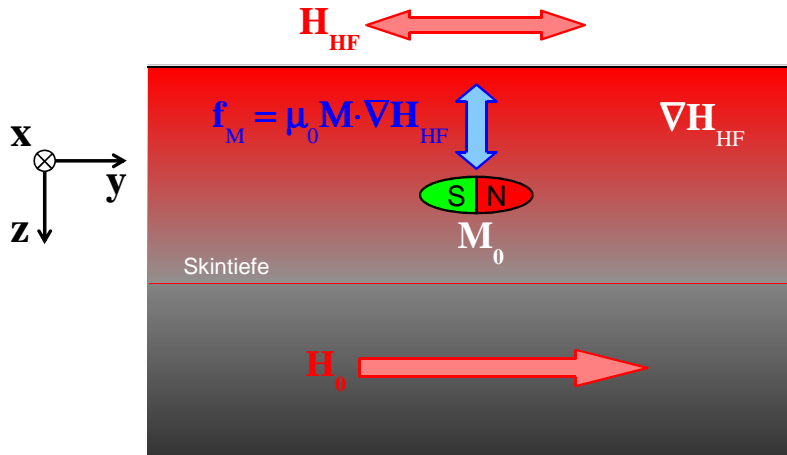


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Magnetische Anregung



NDT Systems & Services



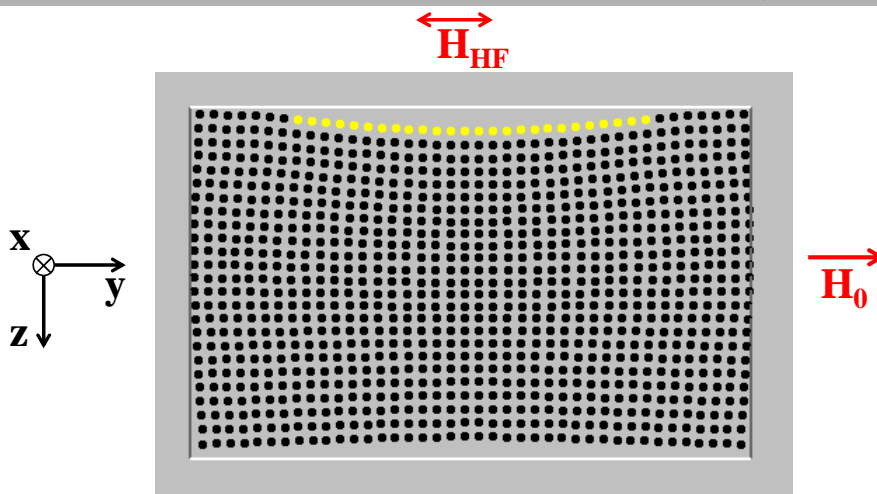
siehe z.B. M. Hirao and H. Ogi. EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Magnetische Anregung



NDT Systems & Services

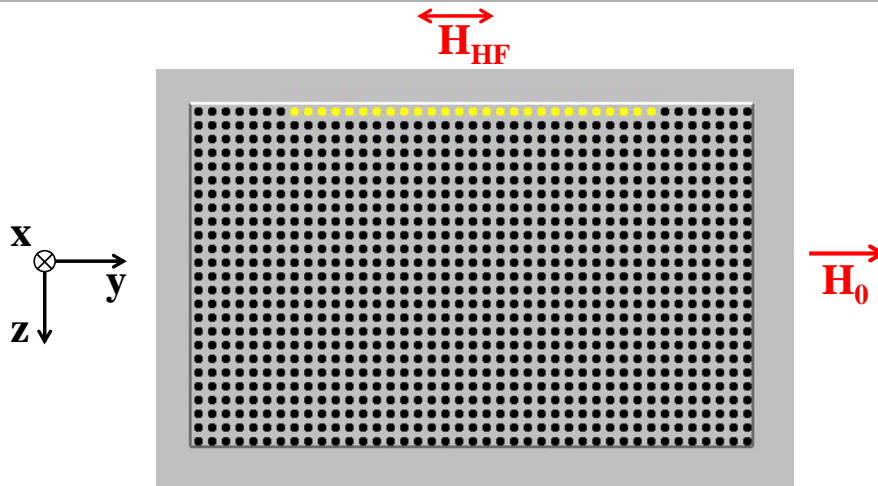


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Lorentz- und Magnetische Anregung



NDT Systems & Services

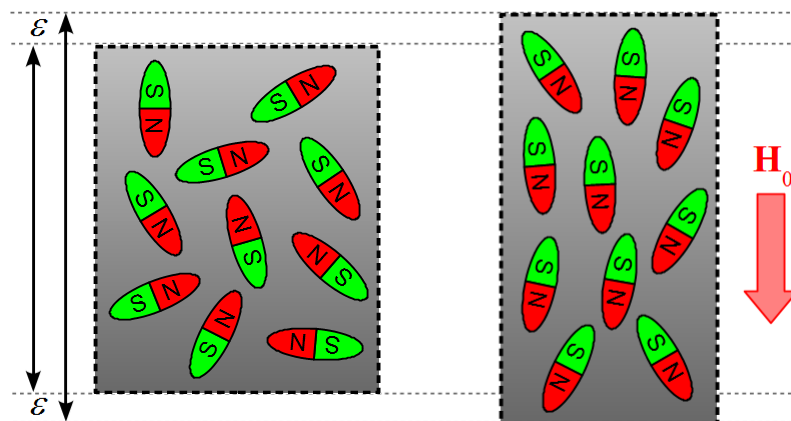


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Magnetostriktive Anregung



NDT Systems & Services

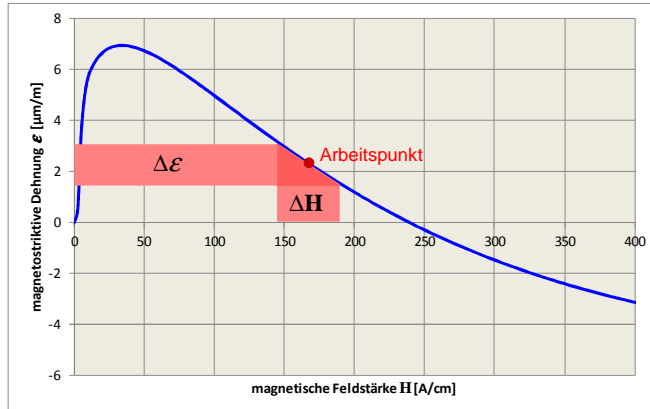


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Magnetostruktive Anregung



NDT Systems & Services



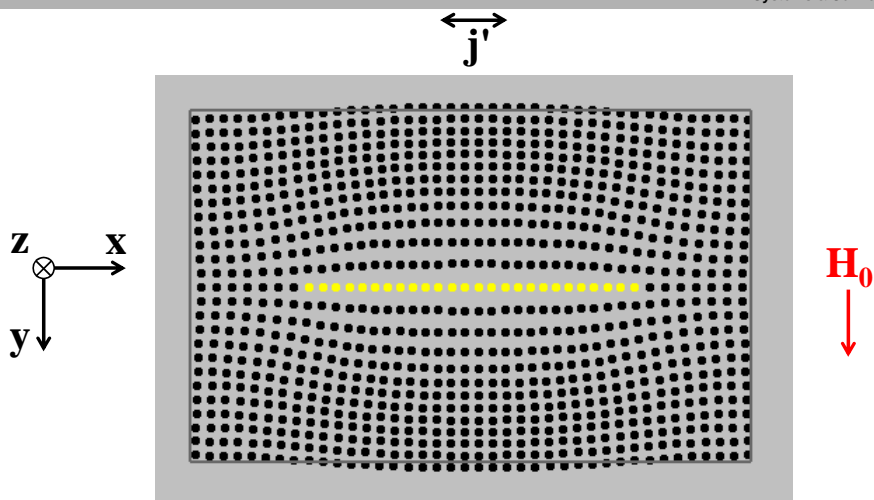
Siehe z.B. R. Koch, Entwicklung und Erprobung eines Moduls zur Ausnutzung der dynamischen Magnetostraktion als eine Messgröße zur Charakterisierung von Struktur- und Spannungszuständen im Rahmen des 3MA-Ansatzes, Saarbrücken, 1989

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Magnetostruktive Anregung, $H_0 \perp j$



NDT Systems & Services



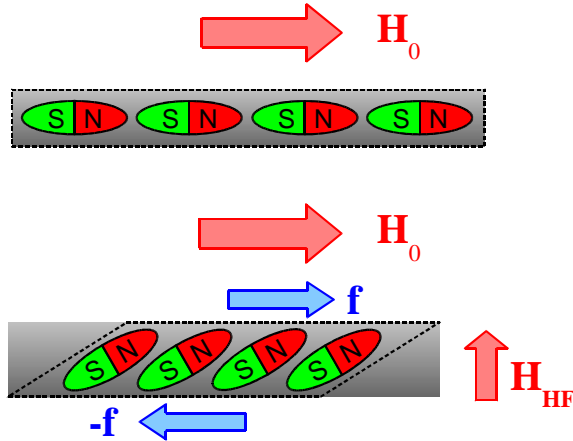
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung

### Magnetostruktive Anregung, $H_0 \parallel j$



NDT Systems & Services



M. Hirao and H. Ogi. EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.

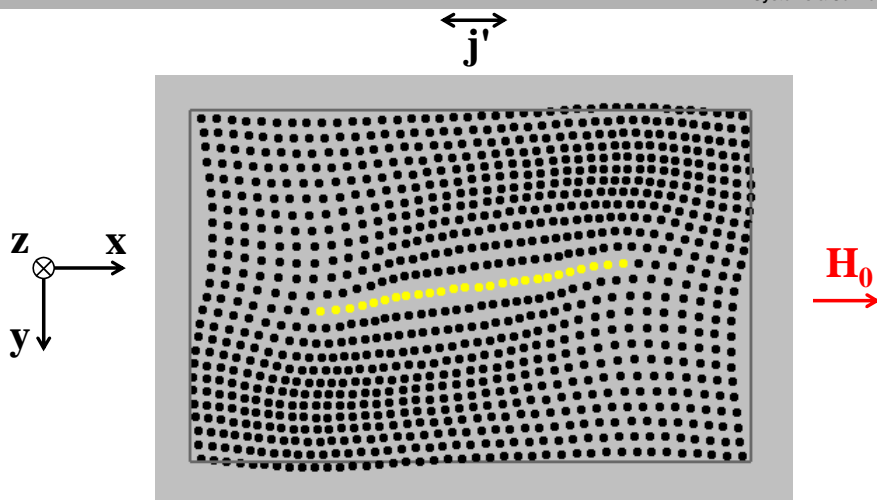
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung

### Magnetostruktive Anregung, $H_0 \parallel j$



NDT Systems & Services



Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

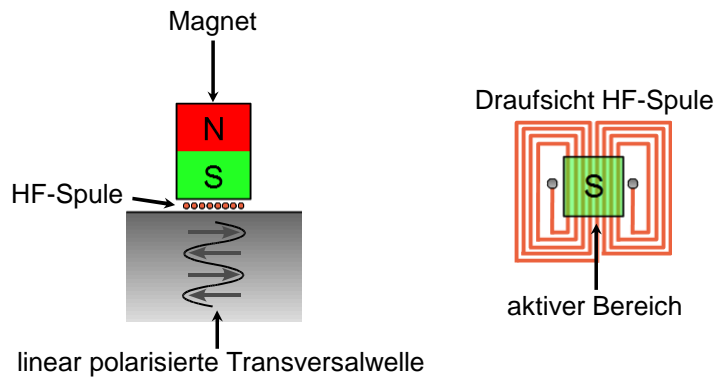


# EMUS-Normalprüfkopf, Lorentz-Anregung

## Aufbau



NDT Systems & Services



Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

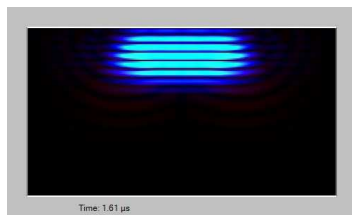
# EMUS-Normalprüfkopf, Lorentz-Anregung

## Ultraschallanregung, 12 mm Wanddicke

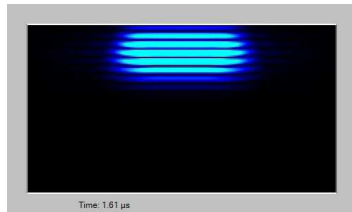


NDT Systems & Services

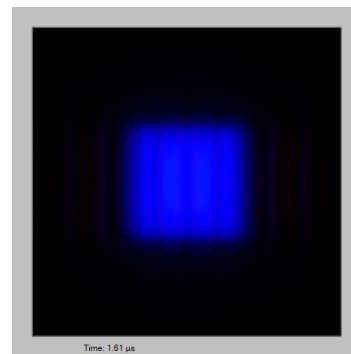
Senkrecht zum Strom und zur Oberfläche



Parallel zum Strom, senkrecht zur Oberfläche



Draufsicht



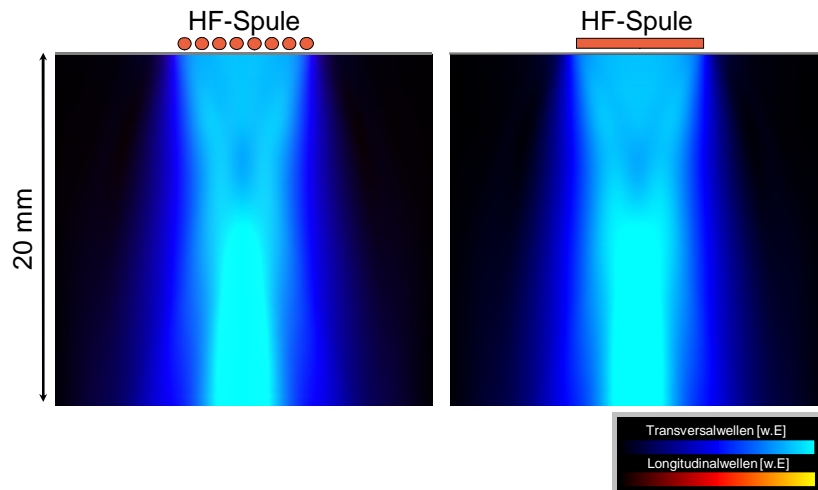
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, Lorentz-Anregung

### Schallfeld in zwei Ebenen senkrecht zur Oberfläche



NDT Systems & Services



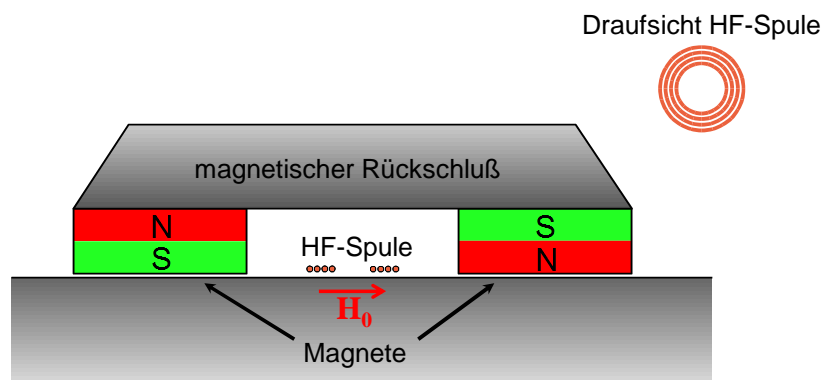
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung

### Aufbau



NDT Systems & Services



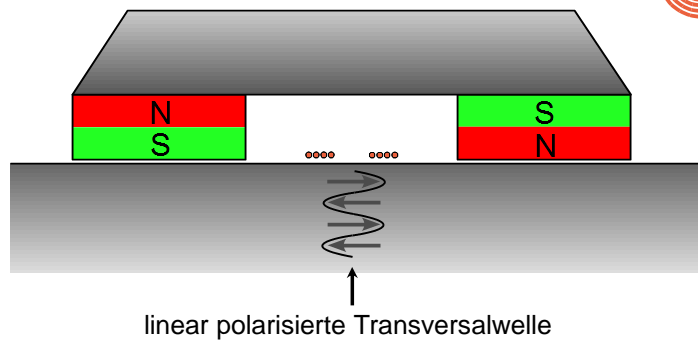
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Aufbau



NDT Systems & Services

Draufsicht HF-Spule

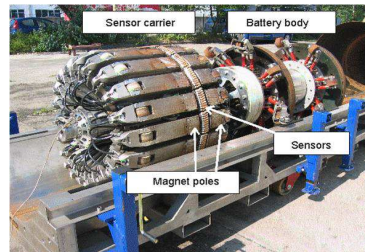
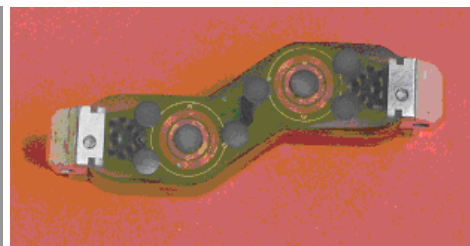
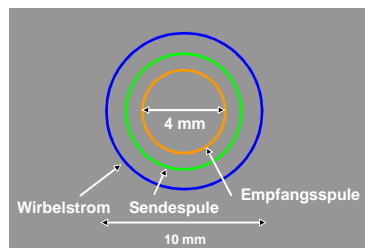


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Kombinationssensor für die Inspektion von Gaspipelines



NDT Systems & Services



Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Ultraschallanregung, 12 mm Wanddicke



NDT Systems & Services

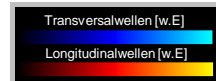
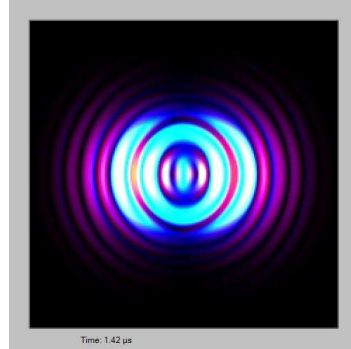
Axiale Richtung senkrecht zur Oberfläche



Umfangsrichtung senkrecht zur Oberfläche



Draufsicht



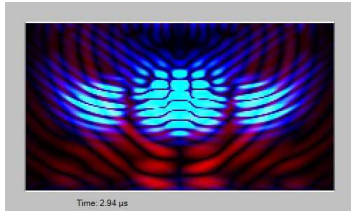
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Ultraschallanregung, 12 mm Wanddicke

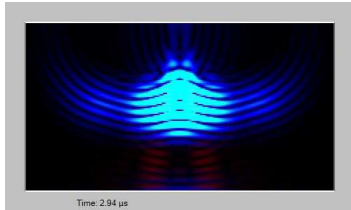


NDT Systems & Services

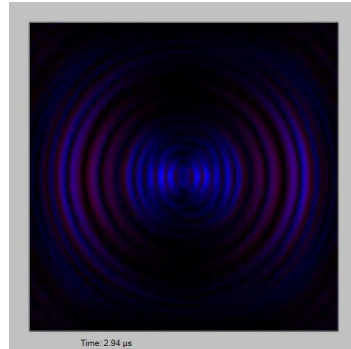
Axiale Richtung senkrecht zur Oberfläche



Umfangsrichtung senkrecht zur Oberfläche



Draufsicht

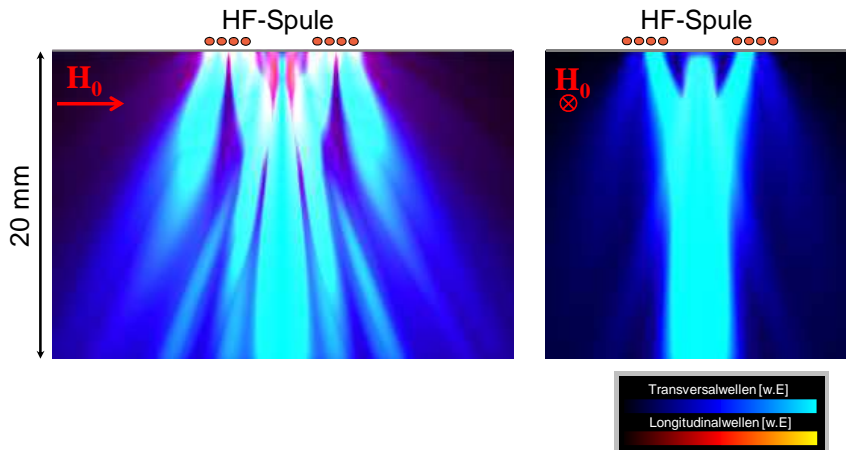


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Schallfeld in zwei Ebenen senkrecht zur Oberfläche



NDT Systems & Services

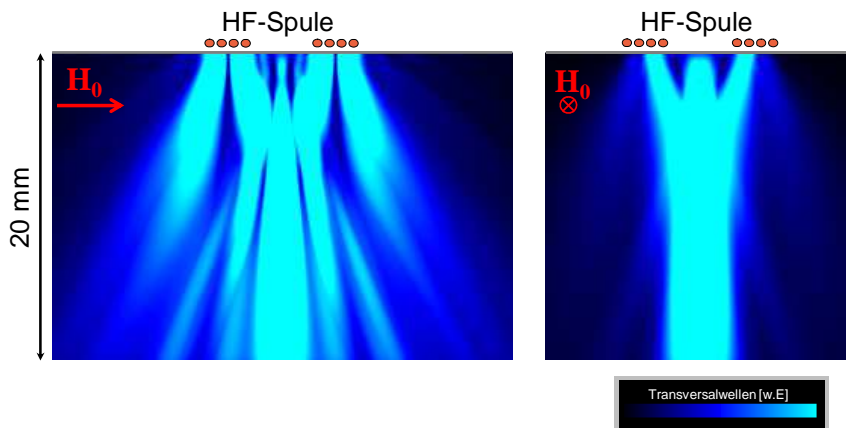


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Schallfeld in zwei Ebenen senkrecht zur Oberfläche



NDT Systems & Services

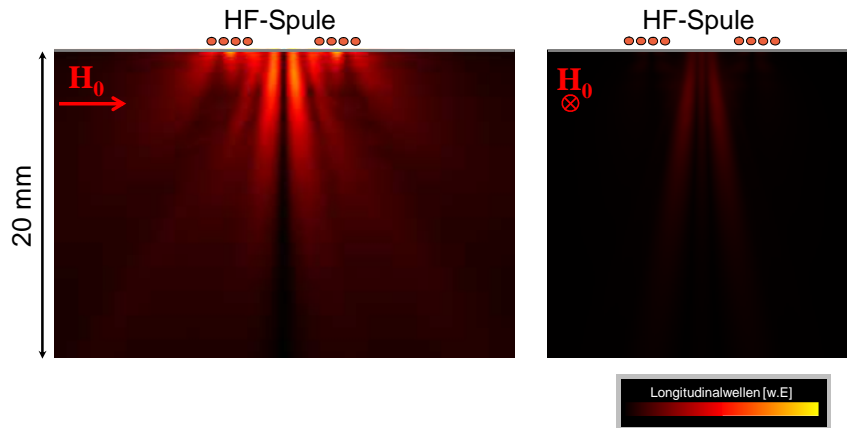


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Schallfeld in zwei Ebenen senkrecht zur Oberfläche



NDT Systems & Services



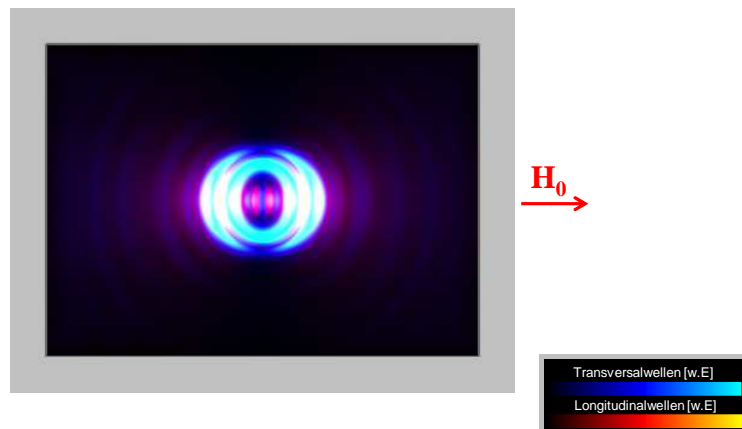
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Tiefensequenz des Schallfelds



NDT Systems & Services

Draufsicht



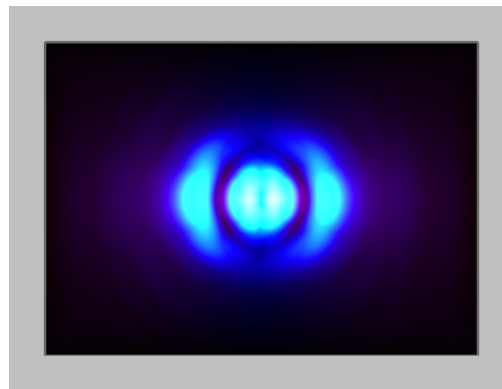
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung  
Tiefensequenz des Schallfelds



NDT Systems & Services

Draufsicht



$H_0$  →



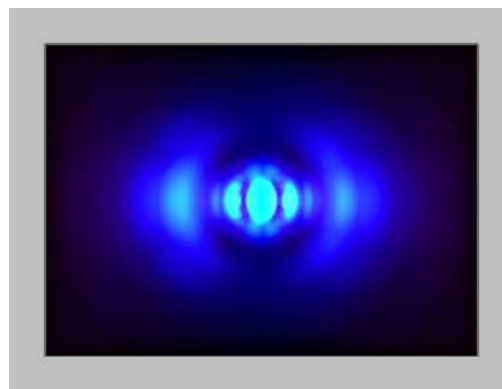
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung  
Tiefensequenz des Schallfelds

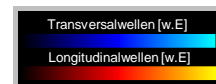


NDT Systems & Services

Draufsicht



$H_0$  →

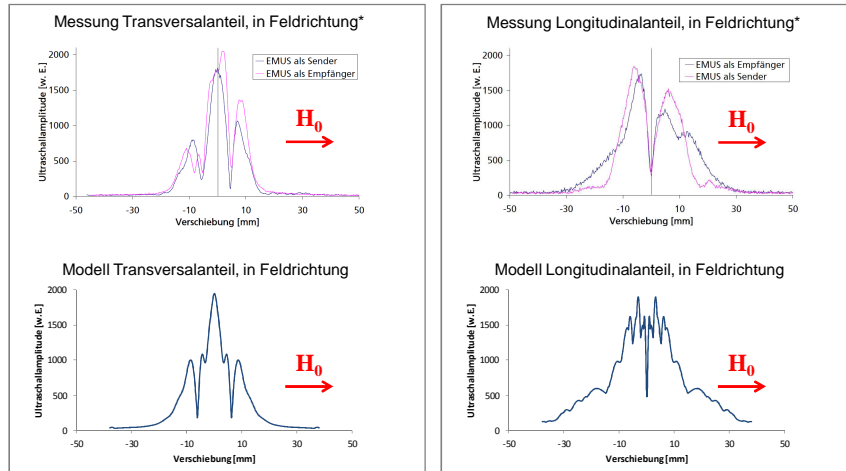


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Vergleich des gemessenen Schallfeldes mit dem Modell



NDT Systems & Services



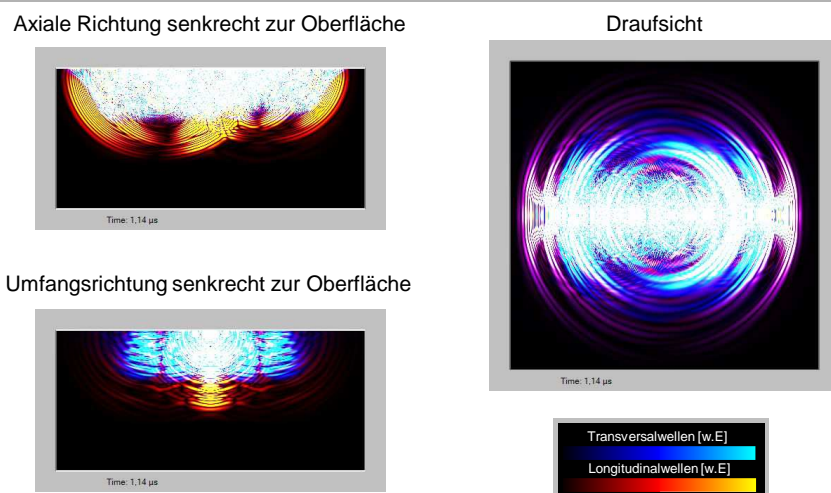
\* F. Niese, EMUS Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung, IZFP Saarbrücken, 2010

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Normalprüfkopf, magnetostr. Anregung Ultraschallanregung, 10 mm Wand, hoher Sendestrom



NDT Systems & Services



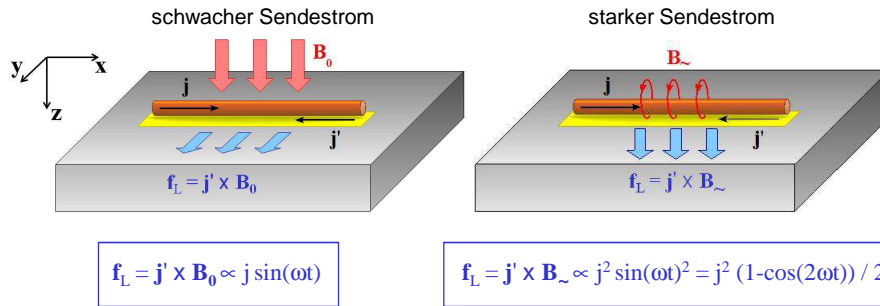
Copyright © 2013, NDT Systems & Services.



## Mechanismen der EMUS-Anregung Anregung von Oberwellen über die Lorentzkraft



NDT Systems & Services



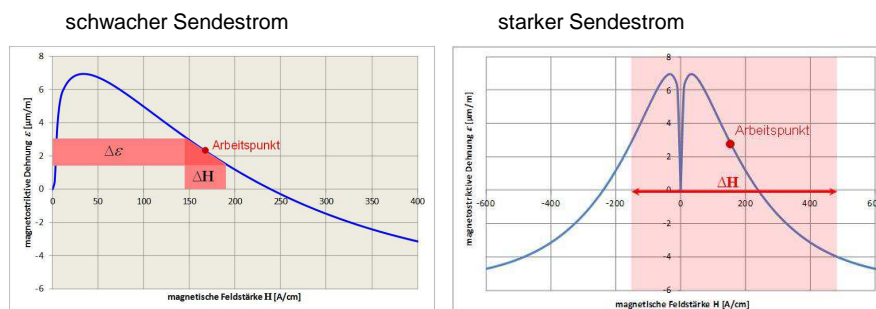
siehe z.B. R. Ribichini, Modelling of Electromagnetic Acoustic Transducers, Imperial College London, 2011

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Mechanismen der EMUS-Anregung Anregung von Oberwellen über Magnetostriktion



NDT Systems & Services



siehe z.B. R. Koch, Entwicklung und Erprobung eines Moduls zur Ausnutzung der dynamischen Magnetostriktion als eine Messgröße zur Charakterisierung von Struktur- und Spannungszuständen im Rahmen des 3MA-Ansatzes, Saarbrücken, 1989

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

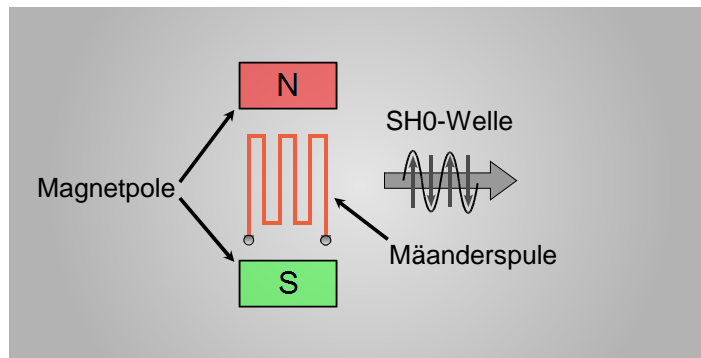
## EMUS-Winkelprüfkopf für SH-Wellen

### Aufbau



NDT Systems & Services

Draufsicht



Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

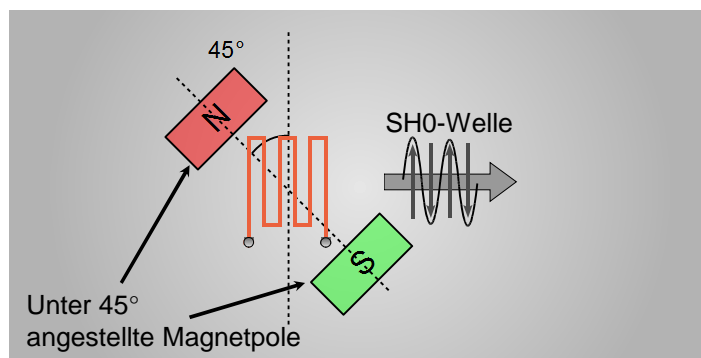
## EMUS-Winkelprüfkopf für SH-Wellen

### Aufbau eines optimierten Prüfkopfes



NDT Systems & Services

Draufsicht



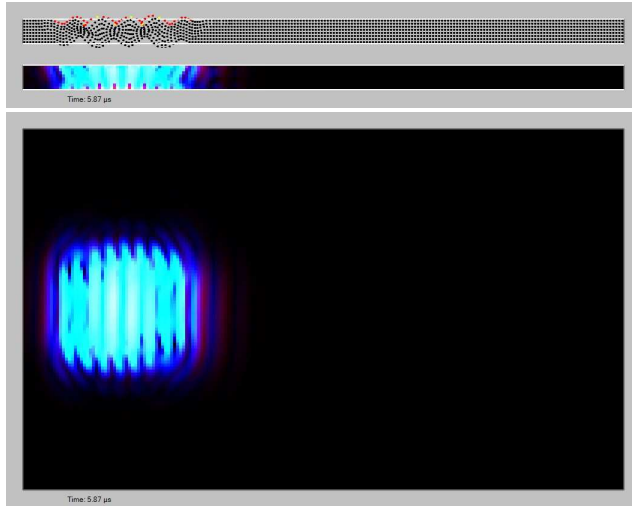
H. Ogi, E. Goda and M. Hirao, Increase of Efficiency of Magnetostriction SH-Wave Electromagnetic Acoustic Transducer by Angeled Bias Field: Piezomagnetic Theory and Measurements, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. 3020-3024

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Winkelprüfkopf für SH-Wellen Ultraschallanregung mittels Magnetostriktion



NDT Systems & Services



Querschnitt  
(8 mm Wanddicke)

Draufsicht

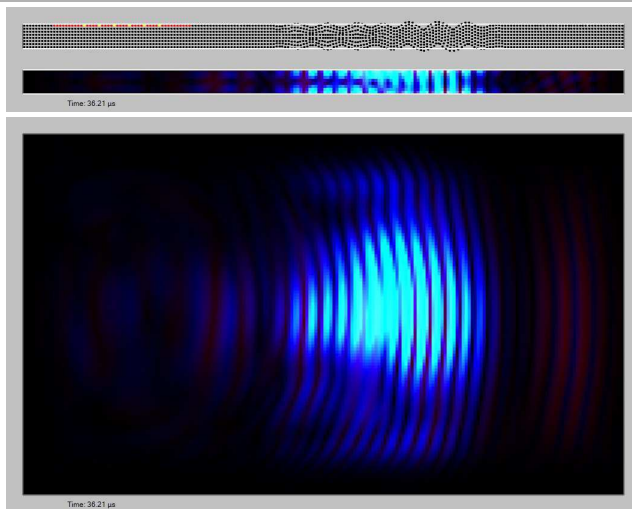


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Winkelprüfkopf für SH-Wellen Ultraschallanregung mittels Magnetostriktion



NDT Systems & Services



Querschnitt  
(8 mm Wanddicke)

Draufsicht

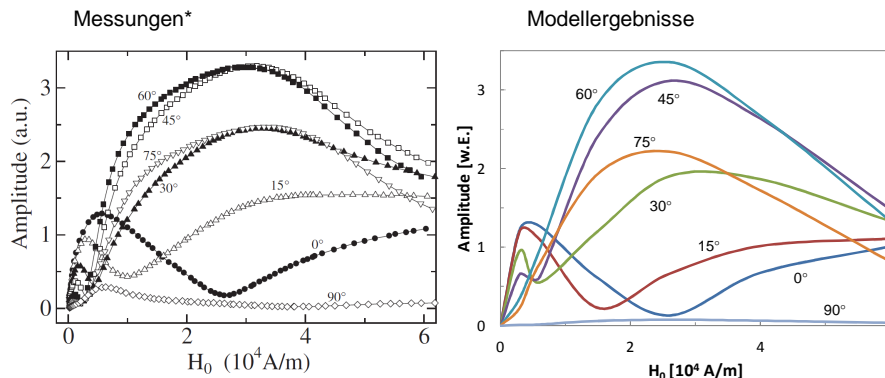


Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## EMUS-Winkelprüfkopf für SH-Wellen SH-Wellenamplitude in Abhängigkeit von $H_0$



NDT Systems & Services



\* H. Ogi, E. Goda and M. Hirao, Increase of Efficiency of Magnetostriction SH-Wave Electromagnetic Acoustic Transducer by Angeled Bias Field: Piezomagnetic Theory and Measurements, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. 3020-3024

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.

## Modellierung und Visualisierung der EMUS- Anregung als Hilfsmittel zur Wandleroptimierung



NDT Systems & Services

### Zusammenfassung

- Modell zur Berechnung der EMUS-Anregung und Schallausbreitung im Prüfobjekt
- Visualisierung der Schallausbreitung als Gittermodell
- Visualisierung der Schallausbreitung als Konturplot, separate Darstellung des Longitudinal- und Transversalanteils
- Berechnung und Darstellung von Schallfeldern
- Vergleich der Modellergebnisse mit Messungen

Copyright © 2013, NDT Systems & Services.