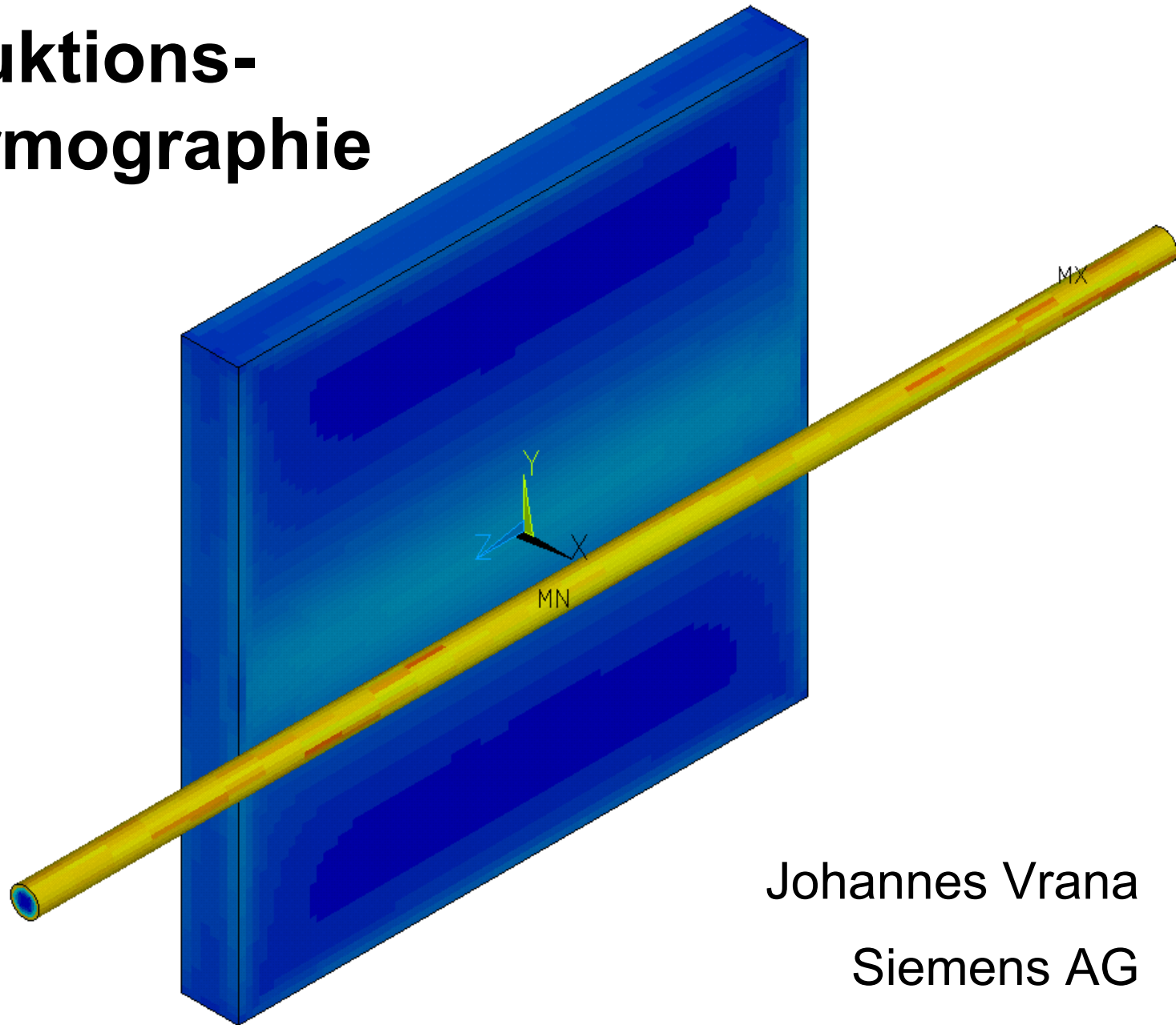


# Induktions- thermographie

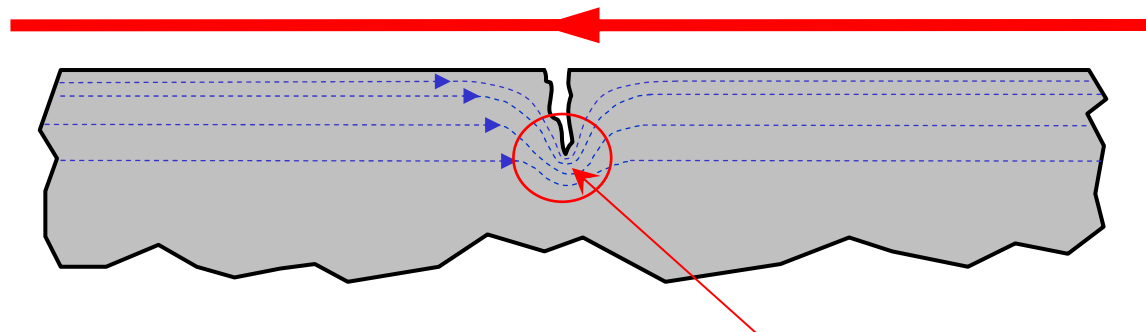
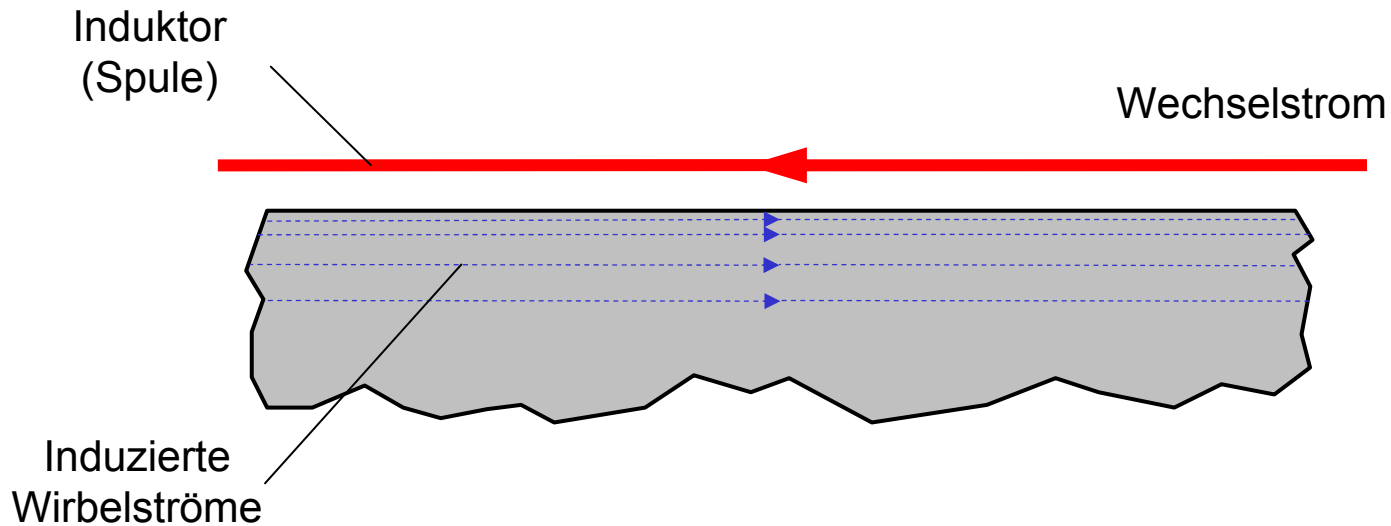


Johannes Vrana  
Siemens AG



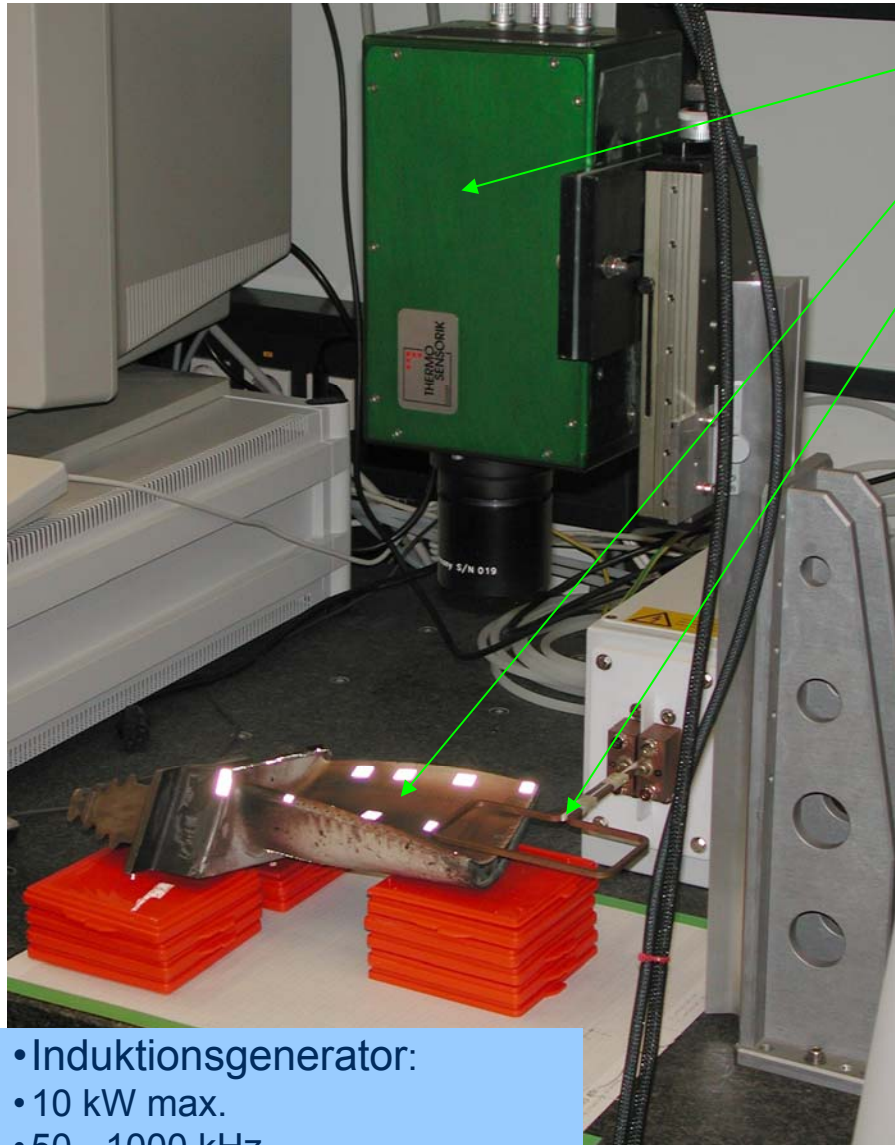
- **Einführung in die Induktionsthermographie**
- **Theoretische Grundlagen der induktiven Anregung**
  - Maxwell Gleichung
  - Diffusionsgleichungen der Elektrodynamik
- **Berechnung der Stromdichteverteilung**
  - Direktkontakt: Stromdichteverteilung in Leitern
  - Induktion: Stromdichteverteilung durch angelegtes Magnetfeld
    - Stromdichteverteilung in halbbunendlichem Körper
    - Stromdichteverteilung in endlich dicker Platte
    - Magnetfeld durch Induktor
    - Stromdichteverteilung in endlich großer Platte
  - Abgleich mit dem Experiment
- **Abhängigkeit von äußeren Parametern**
  - Wirkungsgrad
  - Abstand Induktor – Probe
  - Probendicke
  - Diffusivität
- **Stromdichteverteilung an einer Nut**
  - Variation der Nutbreite
  - Störung der Stromdichteverteilung durch eine Nut
  - Vergleich mit dem Experiment
- **Zusammenfassung & Ausblick**





**Bereich mit erhöhter Stromdichte  
⇒ Erhöhte Wärmeerzeugung an Risspitze**



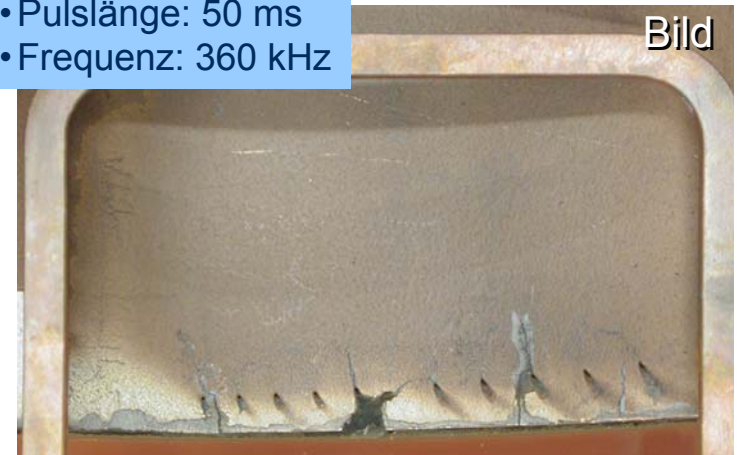


IR-Kamera

Probe (Turbinenschaufel)

Induktor

- Pulslänge: 50 ms
- Frequenz: 360 kHz



- Induktionsgenerator:
- 10 kW max.
- 50 - 1000 kHz
- Typische Pulslänge 50 - 200 ms
- Max. Strom: 700 A

- **Einführung in die Induktionsthermographie**
- **Theoretische Grundlagen der induktiven Anregung**
  - Maxwell Gleichung
  - Diffusionsgleichungen der Elektrodynamik
- **Berechnung der Stromdichteverteilung**
  - Direktkontakt: Stromdichteverteilung in Leitern
  - Induktion: Stromdichteverteilung durch angelegtes Magnetfeld
    - Stromdichteverteilung in halbbunendlichem Körper
    - Stromdichteverteilung in endlich dicker Platte
    - Magnetfeld durch Induktor
    - Stromdichteverteilung in endlich großer Platte
  - Abgleich mit dem Experiment
- **Abhängigkeit von äußeren Parametern**
  - Wirkungsgrad
  - Abstand Induktor – Probe
  - Probendicke
  - Diffusivität
- **Stromdichteverteilung an einer Nut**
  - Variation der Nutbreite
  - Störung der Stromdichteverteilung durch eine Nut
  - Vergleich mit dem Experiment
- **Zusammenfassung & Ausblick**



- In Materie gelten die makroskopischen Maxwell Gleichungen

Gaußsche Gesetze

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Faradaysches Gesetz

$$\operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

Ampersches Gesetz

$$\operatorname{rot} \vec{H} - \underbrace{\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}_{\text{Verschiebungsstrom}} = \vec{j}$$

- In einem homogenen, isotropen Medium gilt

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

- In einem linearen Medium gilt ausserdem das Ohmsche Gesetz

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$



- In den für Induktion wichtigen Frequenzbereichen ist der Verschiebungsstrom vernachlässigbar (da Objektgröße  $\ll$  Wellenlänge (300 m – 6 km))

$$\operatorname{rot} \vec{H} \approx \sigma \vec{E}$$

- Mit diesen Vereinfachungen lassen sich Diffusionsgleichungen herleiten:

- für Magnetfelder 
$$\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \Delta \vec{H}$$

- für Elektrische Felder 
$$\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \Delta \vec{E}$$

- für die Stromdichte 
$$\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \Delta \vec{j}$$



- **Einführung in die Induktionsthermographie**
- **Theoretische Grundlagen der induktiven Anregung**
  - Maxwell Gleichung
  - Diffusionsgleichungen der Elektrodynamik
- **Berechnung der Stromdichteverteilung**
  - **Direktkontakt: Stromdichteverteilung in Leitern**
  - **Induktion: Stromdichteverteilung durch angelegtes Magnetfeld**
    - Stromdichteverteilung in halbbunendlichem Körper
    - Stromdichteverteilung in endlich dicker Platte
    - Magnetfeld durch Induktor
    - Stromdichteverteilung in endlich großer Platte
  - **Abgleich mit dem Experiment**
- **Abhängigkeit von äußeren Parametern**
  - Wirkungsgrad
  - Abstand Induktor – Probe
  - Probendicke
  - Diffusivität
- **Stromdichteverteilung an einer Nut**
  - Variation der Nutbreite
  - Störung der Stromdichteverteilung durch eine Nut
  - Vergleich mit dem Experiment
- **Zusammenfassung & Ausblick**



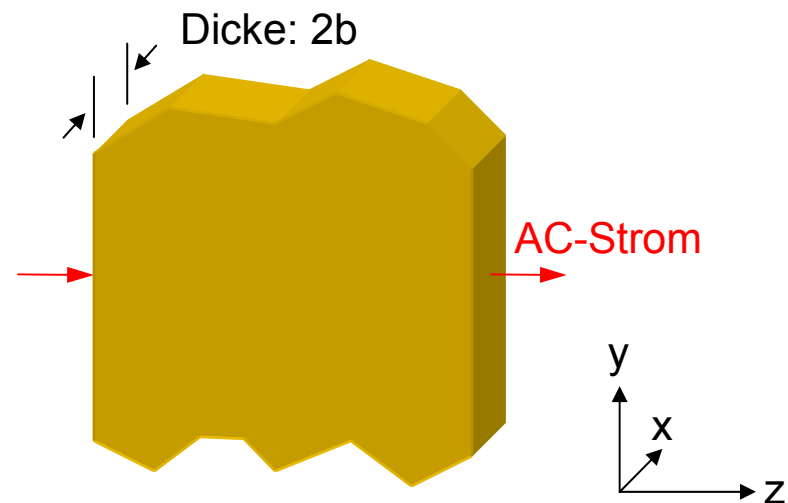


- Um die Stromdichteverteilung in einem wechselstromdurchflossenen Leiter zu berechnen, muss man von der Diffusionsgleichung für elektrische Felder (bzw. für die Stromdichte) ausgehen

$$\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \Delta \vec{E}$$

$$\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \Delta \vec{j}$$

- Im folgenden wird die Stromdichte für einen  $2b$  dicken, unendlich breiten Leiter berechnet



- **Leiter und elektrisches Feld in z-Richtung, Magnetfeld in xy-Ebene**

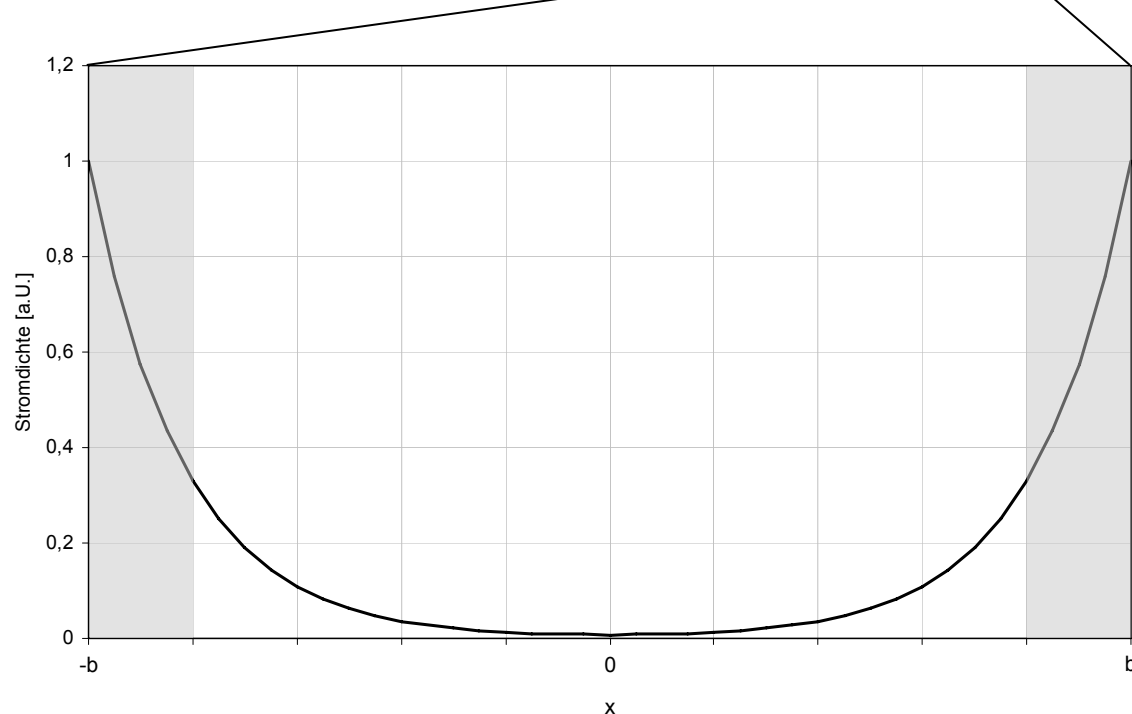
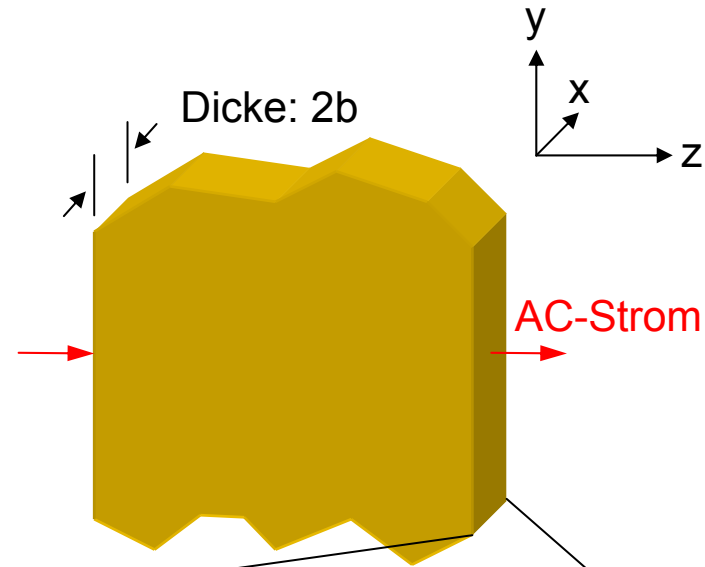
$$\vec{H} = \begin{pmatrix} H_x(x,t) \\ H_y(x,t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{E} = \text{Re} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z(x) e^{i\omega t} \end{pmatrix}$$

- **Mit der Randbedingung  $j(b) = j_s = j(-b)$  ergibt sich als Lösung der DGL**

$$j_z(x) = j_s \frac{\cosh \sqrt{2i} \frac{x}{s}}{\cosh \sqrt{2i} \frac{b}{s}}$$

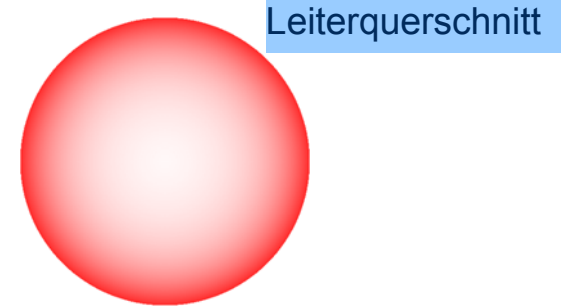
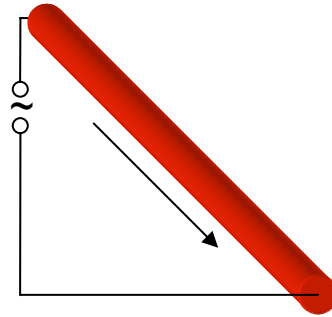
- **mit der Skintiefe**

$$s = \frac{1}{\sqrt{\mu\mu_0\sigma\pi f}}$$



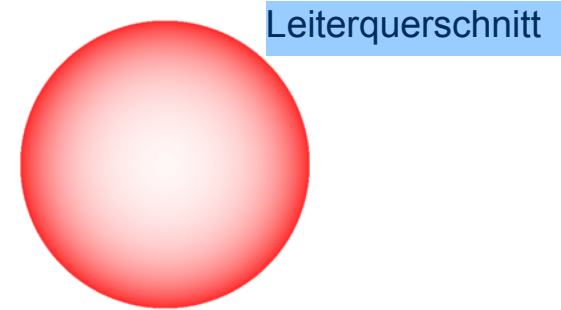
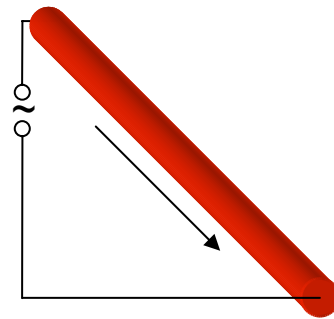
## a. Stromdichteverteilung in einem runden wechselstromdurchflossenen Leiter

- Skin Effekt



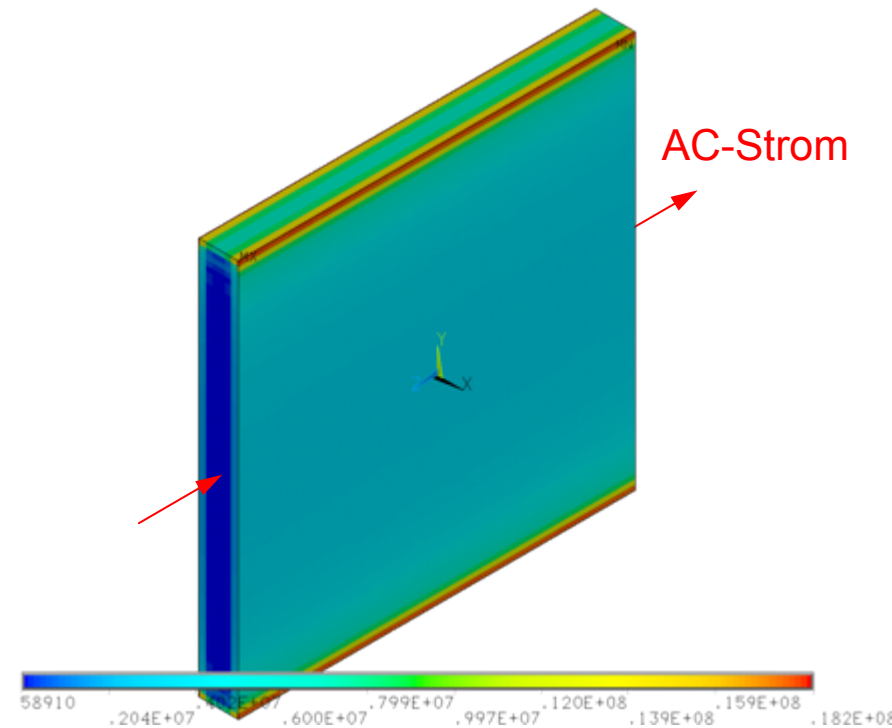
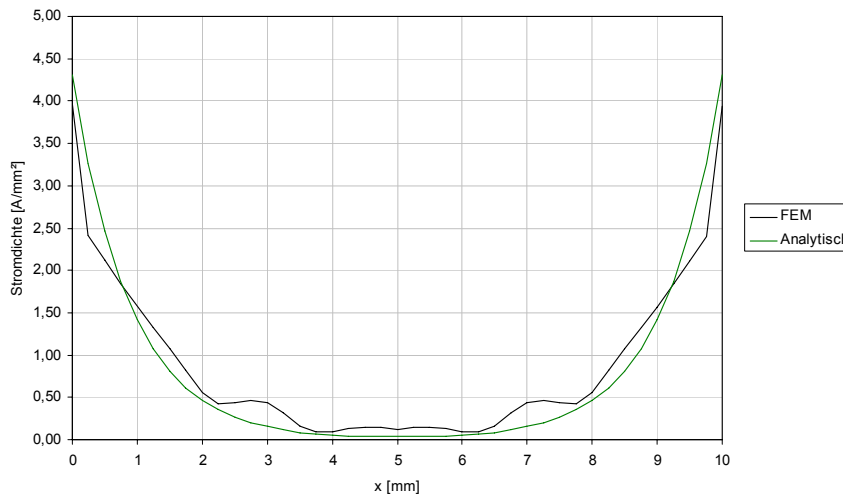
## a. Stromdichteverteilung in einem runden wechselstromdurchflossenen Leiter

- Skin Effekt



## b. Stromdichteverteilung in einem rechteckigen wechselstromdurchflossenen Leiter

- Skin-Effekt an den 4 Seitenflächen
- Edge-Effekt an den 4 Kanten



- Um die Stromdichteverteilung durch Induktion in einem Leiter zu berechnen, muss man

- die Magnetfeldverteilung über die Diffusionsgleichung für magnetische Felder ausrechnen

$$\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \Delta \vec{H}$$

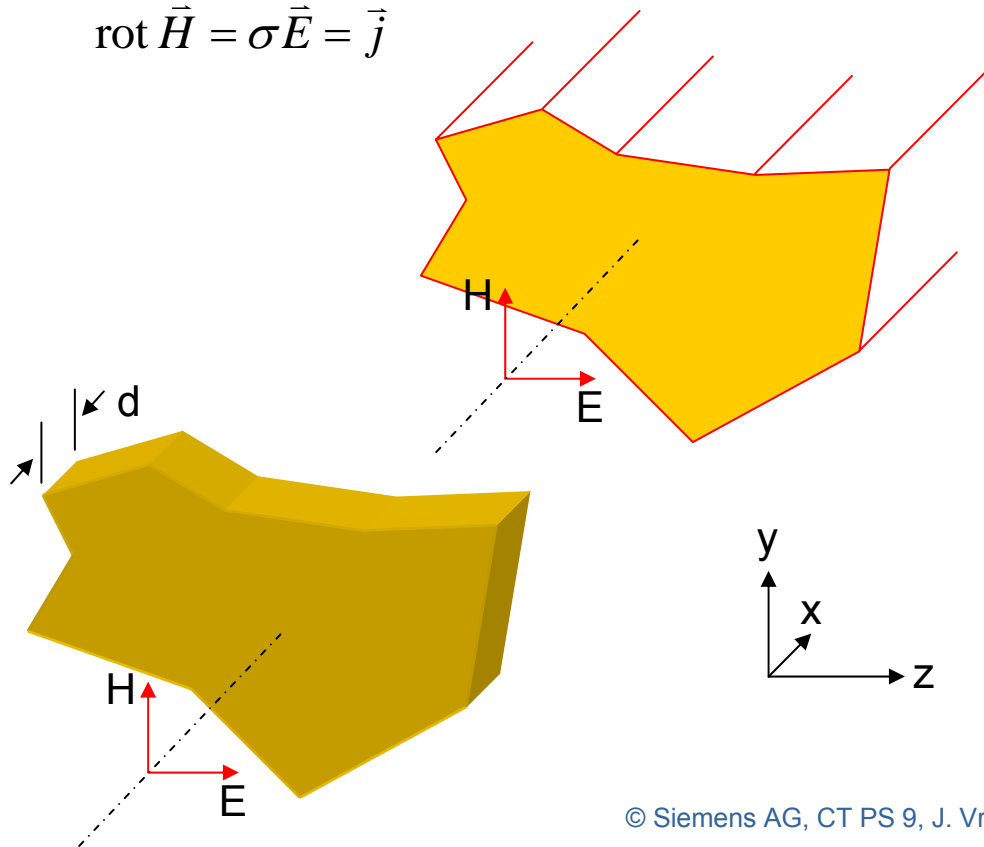
- und schließlich die Stromdichteverteilung über das Amperesche Gesetz

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} = \vec{j}$$

- Im folgenden wird

- die Stromdichte in einem halbunendlichen Körper
- die Stromdichte in einer endlich dicken Platte

berechnet



- halbunendlicher Körper  
Magnetfeld in y, elektrisches Feld in z-Richtung

$$\vec{H} = \text{Re} \begin{pmatrix} 0 \\ H_y(x)e^{i\omega t} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{E}_z(x,t) \end{pmatrix}$$

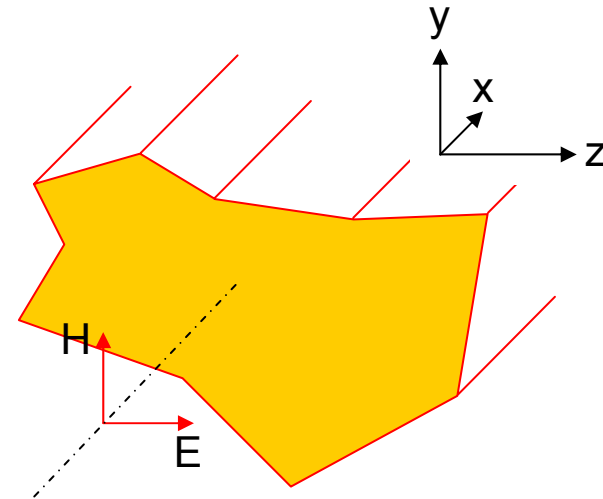
- Lösung der Differentialgleichung

- Für das Magnetfeld:

$$\hat{H}_y(x,t) = H_0 \text{Re} \left[ \left( e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right) e^{i\omega t} \right]$$

- Für die Stromdichte:

$$\hat{j}_z(x,t) = \frac{H_0}{s} \text{Re} \left[ \sqrt{2i} \left( e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right) e^{i\omega t} \right]$$

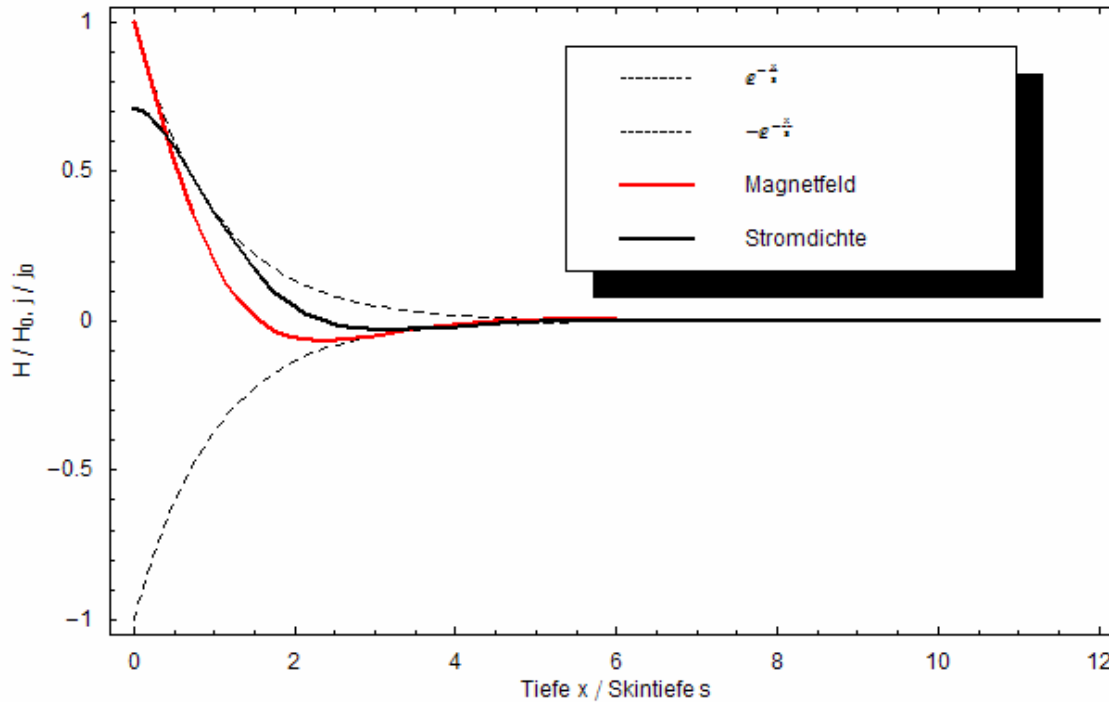


• Magnetfeld

$$\hat{H}_y(x,t) = H_0 \operatorname{Re} \left[ \left( e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right) e^{i\omega t} \right]$$

• Stromdichte

$$\hat{j}_z(x,t) = \frac{H_0}{s} \operatorname{Re} \left[ \sqrt{2i} \left( e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right) e^{i\omega t} \right]$$



- Magnetfeld und Stromdichte oszillieren räumlich und zeitlich
- Magnetfeld und Stromdichte sind 90° Phasenverschoben
- Der typische exponentielle Abfall ist die Einhüllende
- Der Strom in der Tiefe hat eine andere Phasenlage als an der Oberfläche (in bestimmten Tiefenlagen auch exakt entgegengesetzt)



• Magnetfeld und die Stromdichte für eine endlich dicken Platte

$$\hat{H}_y(x,t) = H_0 \operatorname{Re} \left[ \frac{e^{\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} + \frac{e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{-\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} \right] e^{i\omega t}$$

Diese Terme entsprechen einer von der hinteren Wand reflektierten Welle und dabei von hinten nach vorne exponentiell abfällt

$$\hat{j}_z(x,t) = \frac{H_0}{s} \operatorname{Re} \left[ \sqrt{2i} \left( -\frac{e^{\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} + \frac{e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{-\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} \right) \right] e^{i\omega t}$$

• Zur Wiederholung: Magnetfeld und die Stromdichte eines halbunendlichen Körpers

$$\hat{H}_y(x,t) = H_0 \operatorname{Re} \left[ e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right] e^{i\omega t}$$

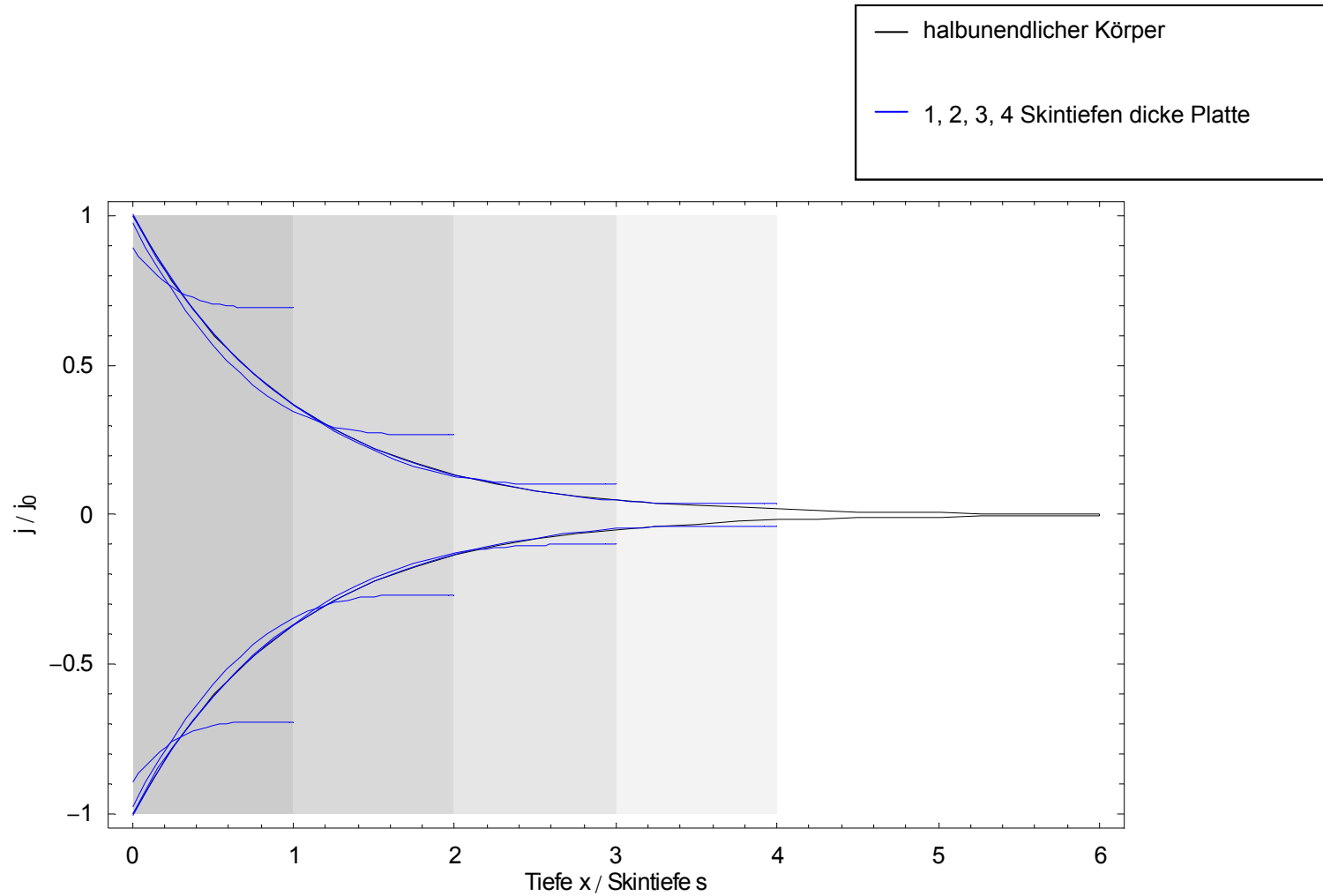
Diese Terme entsprechen einer Welle die in das Material eindringt und exponentiell abfällt (wobei sie auch einen Phasenschub erfährt)

$$\hat{j}_z(x,t) = \frac{H_0}{s} \operatorname{Re} \left[ \sqrt{2i} e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right] e^{i\omega t}$$





# Vergleich der Stromdichte für verschieden dicke Platten **SIEMENS**



- Magnetfeld und die Stromdichte für eine endlich dicken Platte

$$\hat{H}_y(x,t) = H_0 \operatorname{Re} \left[ \left( \frac{e^{\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} + \frac{e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{-\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} \right) e^{i\omega t} \right]$$

$$\hat{j}_z(x,t) = \frac{H_0}{s} \operatorname{Re} \left[ \sqrt{2i} \left( -\frac{e^{\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} + \frac{e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}}}{1 - e^{-\frac{2d}{s}\sqrt{2i}}} \right) e^{i\omega t} \right]$$

- Magnetfeld und die Stromdichte eines halbunendlichen Körpers

$$\hat{H}_y(x,t) = H_0 \operatorname{Re} \left[ \left( e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right) e^{i\omega t} \right]$$

$$\hat{j}_z(x,t) = \frac{H_0}{s} \operatorname{Re} \left[ \sqrt{2i} \left( e^{-\frac{x}{s}\sqrt{2i}} \right) e^{i\omega t} \right]$$



- Das Magnetfeld das von einem stromdurchflossenen Leiter im Abstand  $r$  erzeugt wird ist

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

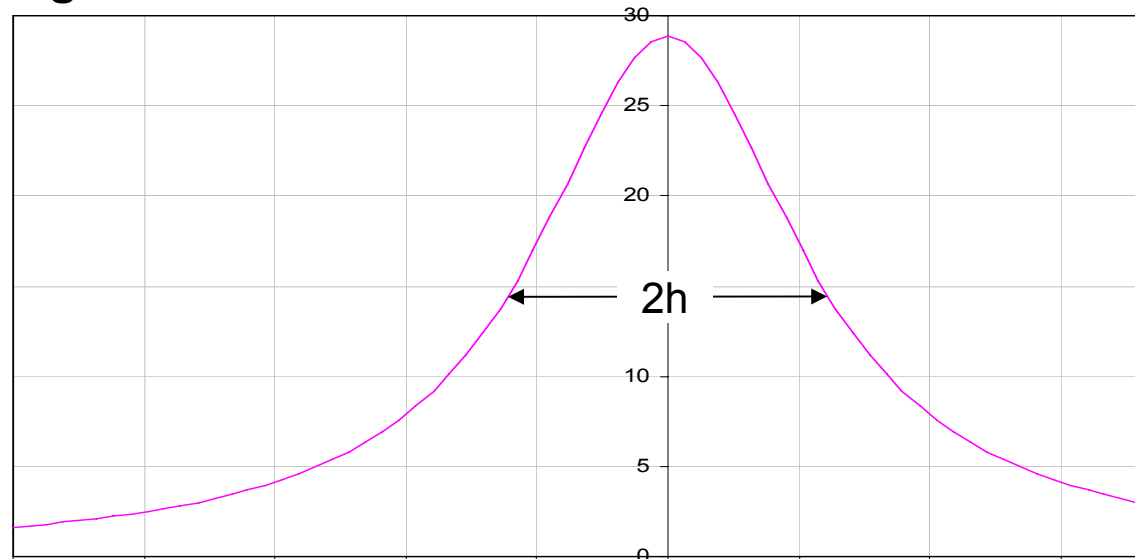
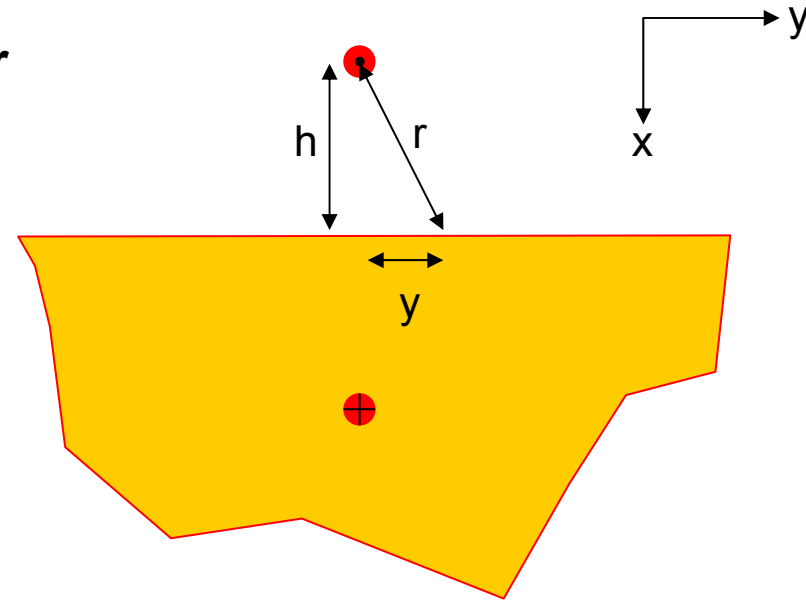
- mit

$$r = \sqrt{h^2 + y^2}$$

- zusammen mit dem vom Spiegelleiter erzeugten Feld ergibt dies

$$H_0 = \frac{I}{\pi} \frac{h}{h^2 + y^2}$$

- Daher ist das Magnetfeld und die Stromdichte im horizontalen Abstand  $h$  vom Leiter nur halb so groß wie direkt unter dem Leiter



- **Das von dem Strom**

- in zwei unendlich dünnen Drähten (blau) im Abstand  $2h'$
- in zwei endlich dicken Leitern mit Radius  $a$  (rot) im Abstand  $2h$

**erzeugte Magnetfeld stimmt überein**

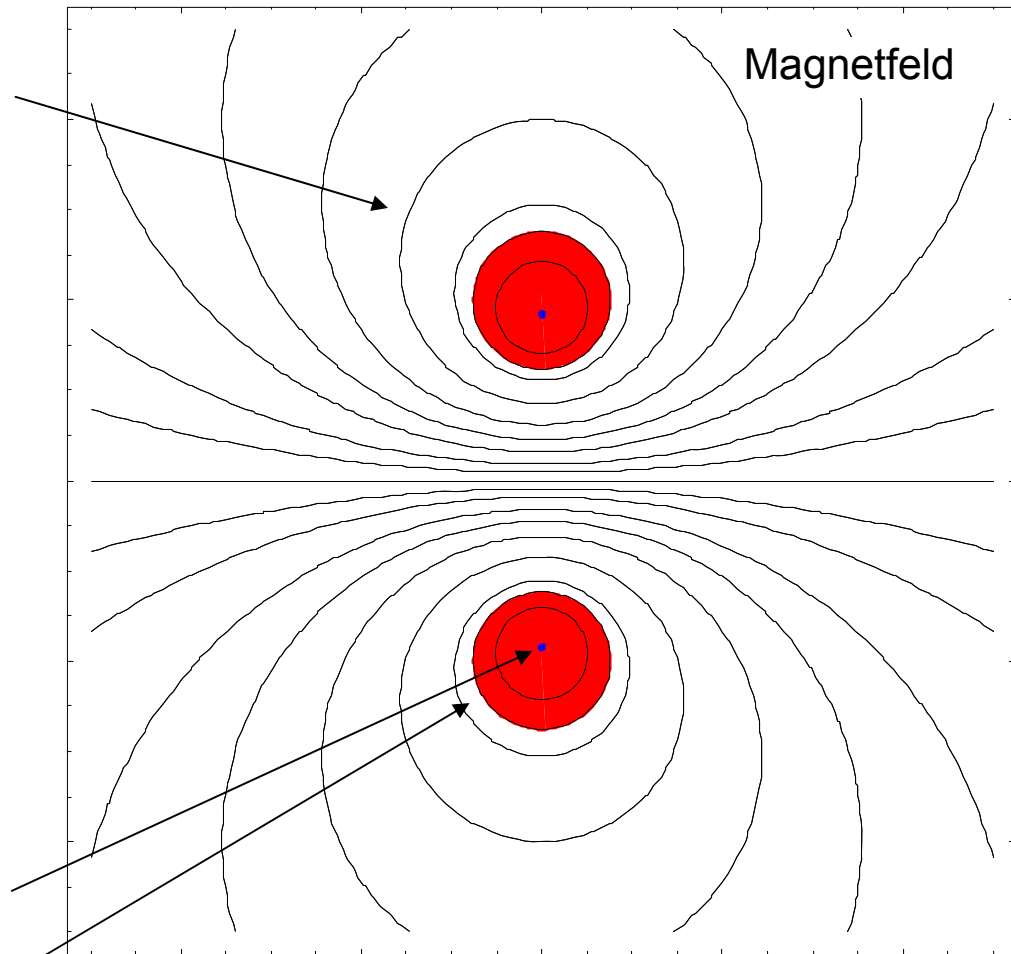
**=> Zur Berechnung des Magnetfelds zweier endlich dicker Leiter**

- kann das Magnetfeld zweier dünnen Drähte verwendet werden
- diese befinden sich im Abstand  $2h'$  mit

$$h' = \sqrt{h^2 - a^2}$$

- **Damit berechnet sich  $H_0$  zu**

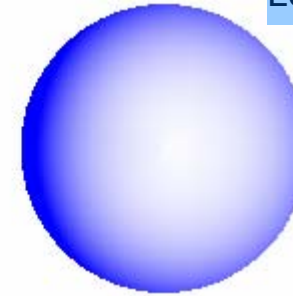
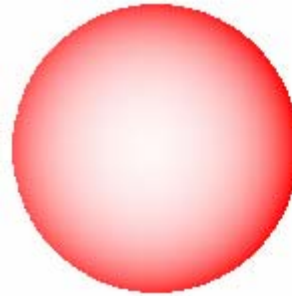
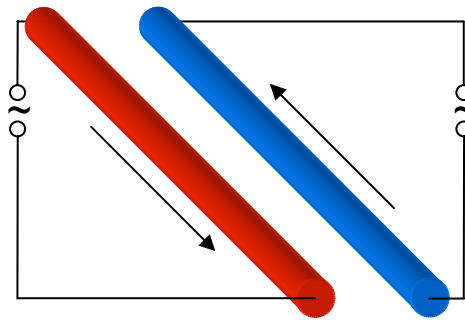
$$H_0(y) = \frac{I}{\pi} \frac{\sqrt{h^2 - a^2}}{h^2 - a^2 + y^2}$$



Leiter mit Radius  $a$

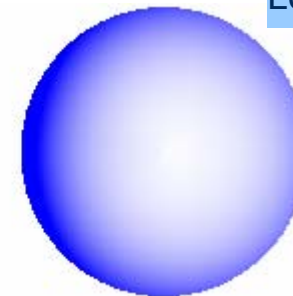
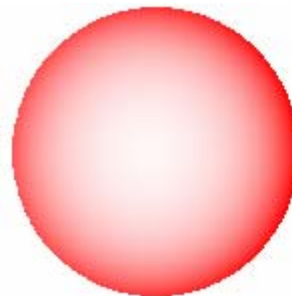
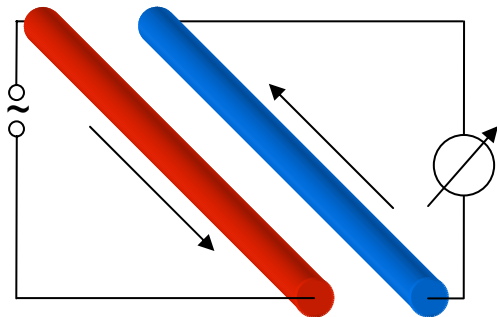


- Zwei Leiter mit gegenläufigem AC-Strom (näher) => Proximity Effekt



Leiterquerschnitte

- Zwei Leiterschleifen – in einem fließt Wechselstrom, im anderen wird Wechselstrom induziert

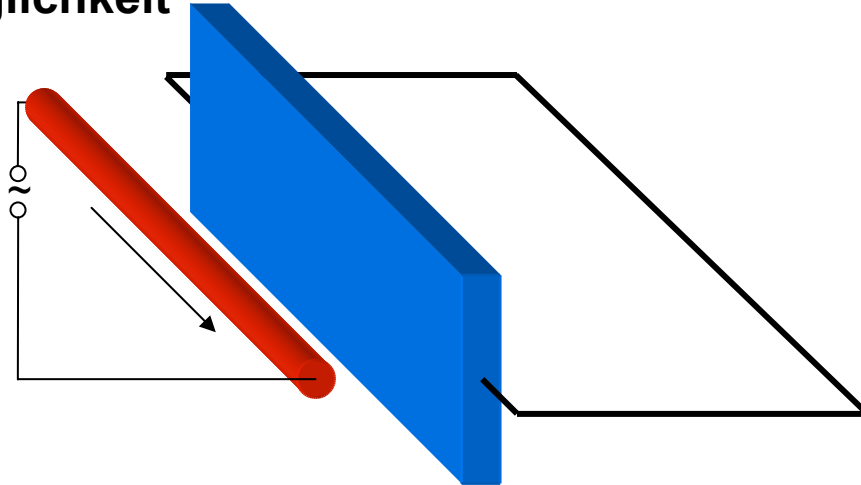


Leiterquerschnitte

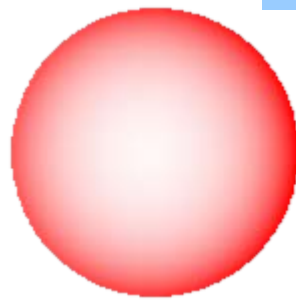
=> Für 100% Wirkungsgrad ergibt sich das gleiche Bild wie oben



- Ein Wechselstromdurchflossener Leiter in der Nähe einer Probe (z.B. eine Platte) mit Rückflußmöglichkeit



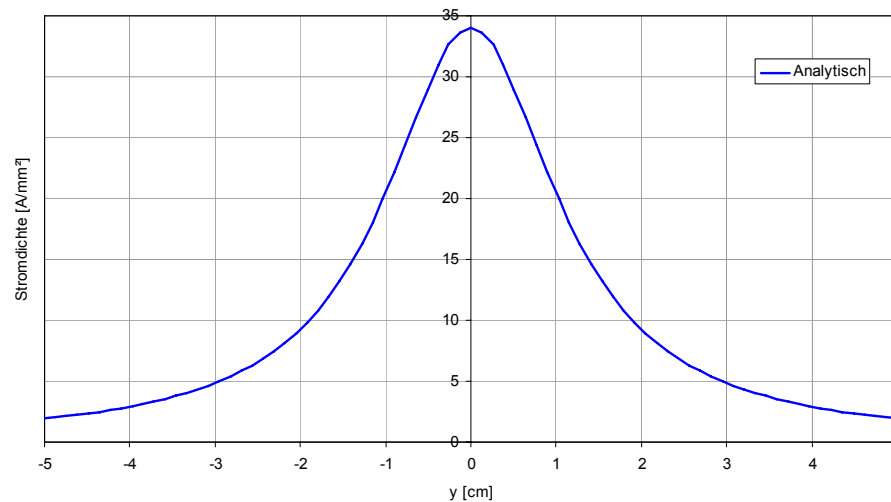
- Im Induktor, (im linken, stromdurchflossenen Leiter) ergibt sich das gleiche Bild wie auf der vorhergehenden Folie (überlagerter Skin und Proximity Effekt)



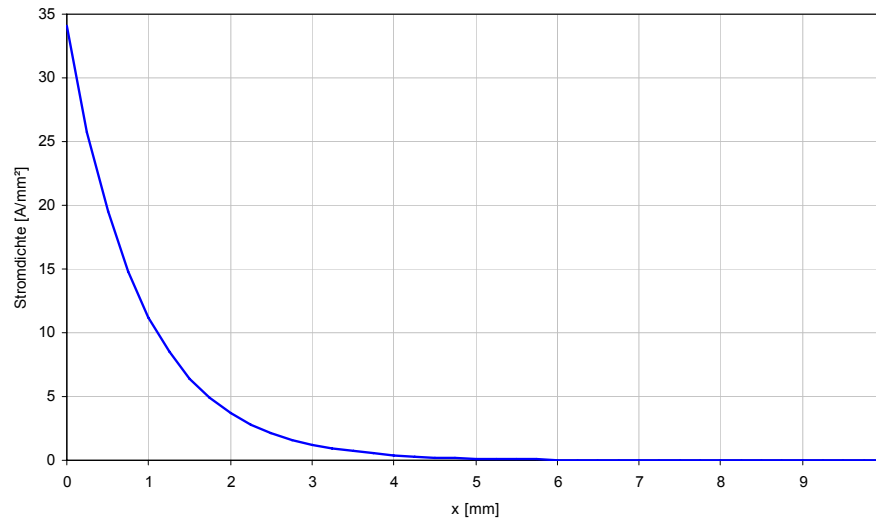
Leiterquerschnitte



- In der Probe wird ein Strom induziert
  - Auf Grund des Proximity Effektes ergibt sich die Stromdichteverteilung an der Oberfläche

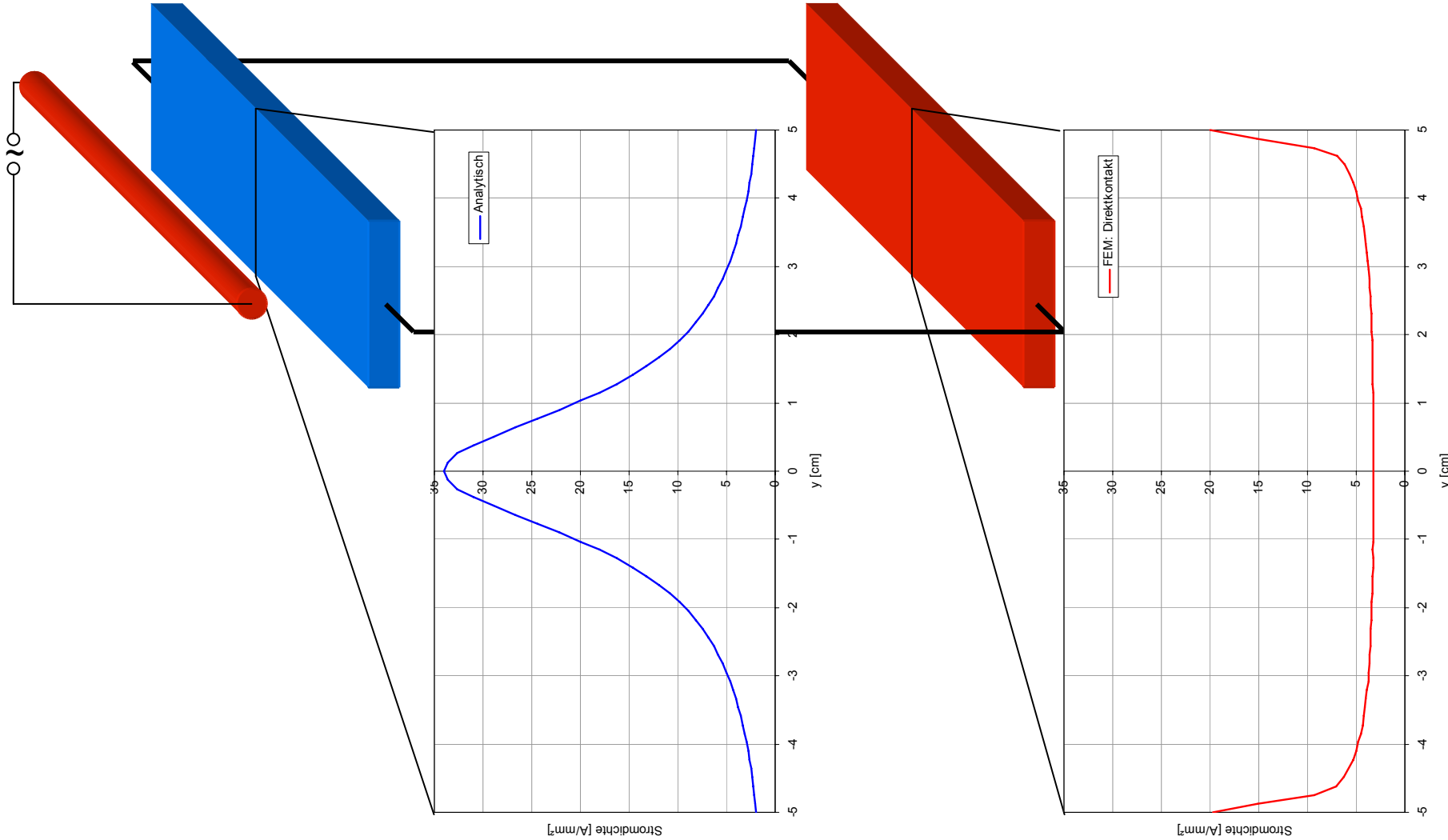


- Die Stromdichteverteilung in der Tiefe ergibt sich aufgrund des Skinneffektes



- Leiterschleife mit 2 Platten

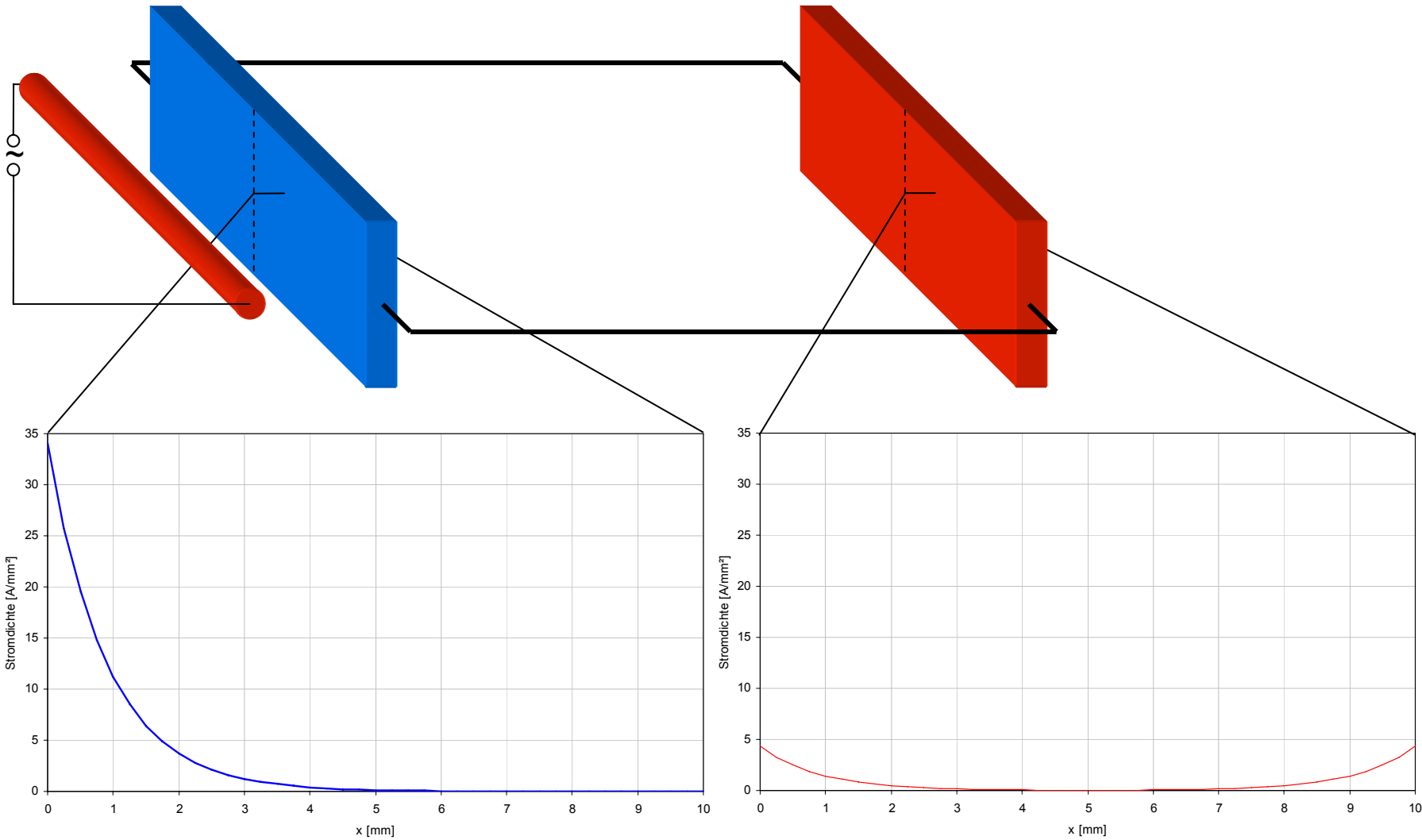
- In der blauen Platte wird ein Strom induziert (hinfließend) und durch die rote Platte fließt der Strom zurück (rückfließend)





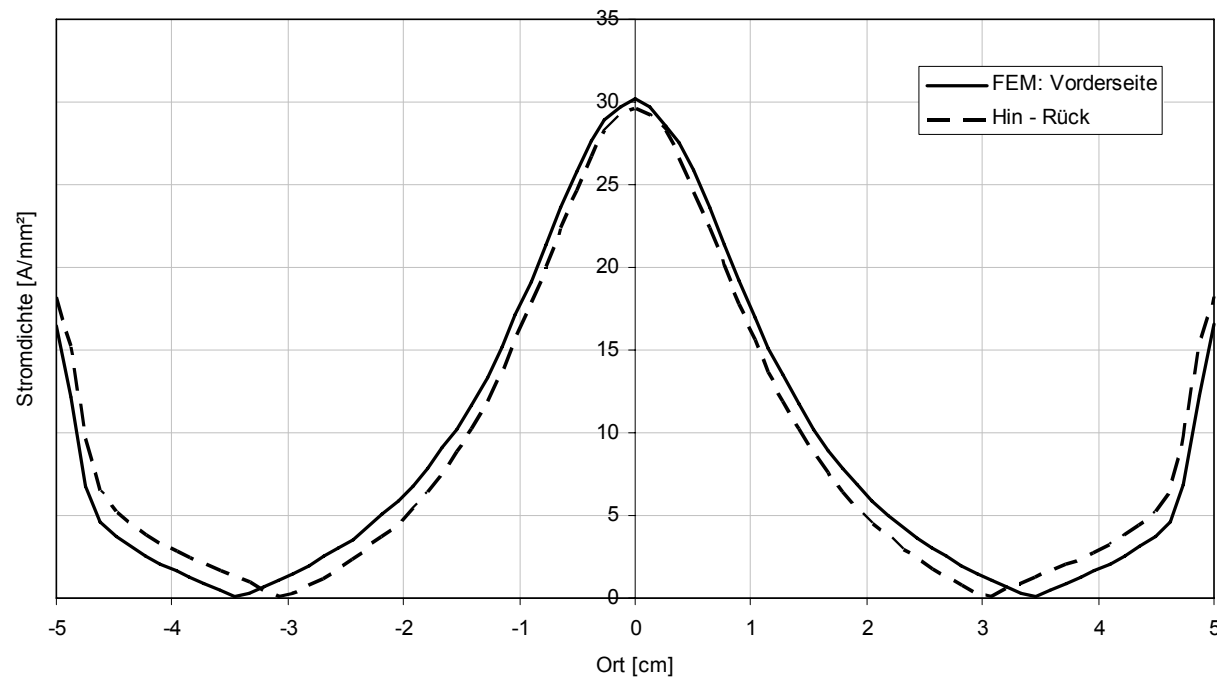
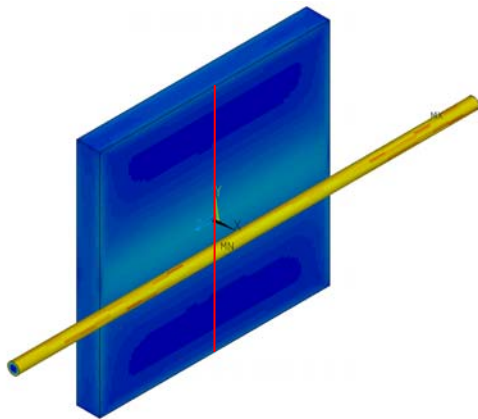
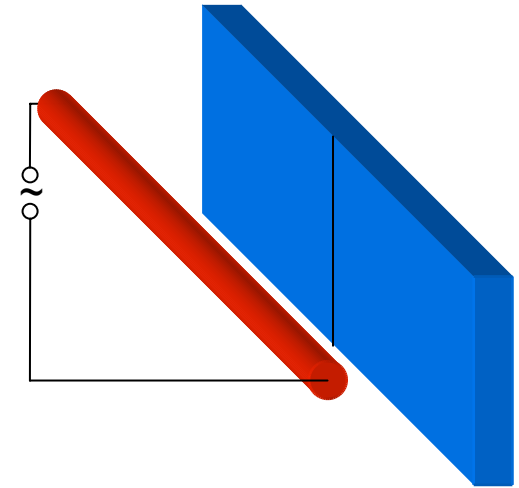
- Leiterschleife mit 2 Platten

- In der blauen Platte wird ein Strom induziert (hinfließend) und durch die rote Platte fließt der Strom zurück (rückfließend)

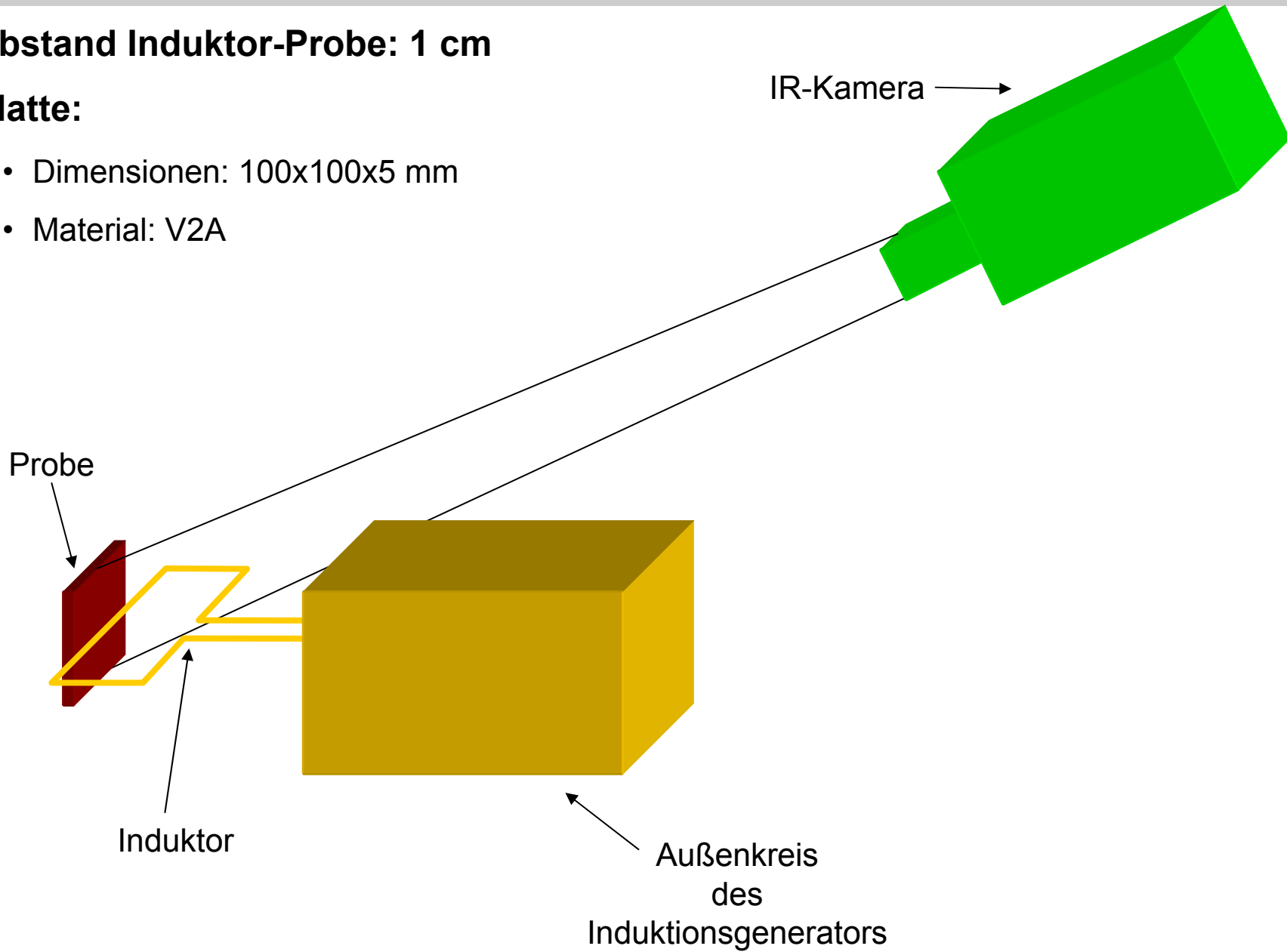


## • Leiter in der Nähe einer Probe (z.B. eine Platte)

- Da im Falle einer wechselstromdurchflossenen Platte der Rückfluß in der gleichen Platte stattfinden muss
  - Findet in erster Näherung eine Addition des hin- und rückfließenden Stroms statt
  - Über die Leiterfläche integriert muss der rückfließende Strom gleich groß, aber mit umgekehrten Vorzeichen sein wie der induzierte Strom
- Um die real induzierte Stromdichteverteilung in der Probe zu erhalten, muss die hin- und der rückfließende Stromdichte addiert werden

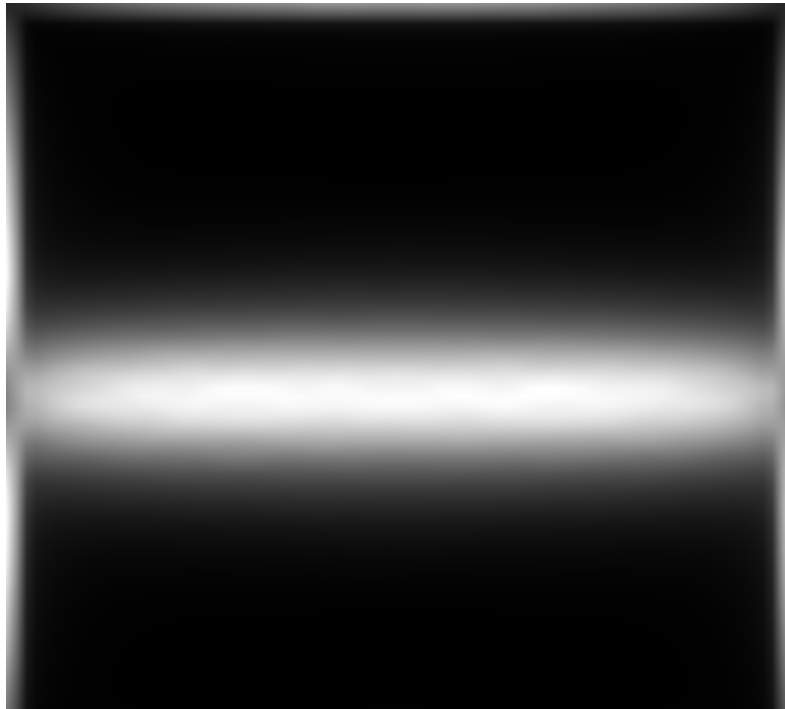


- Abstand Induktor-Probe: 1 cm
- **Platte:**
  - Dimensionen: 100x100x5 mm
  - Material: V2A



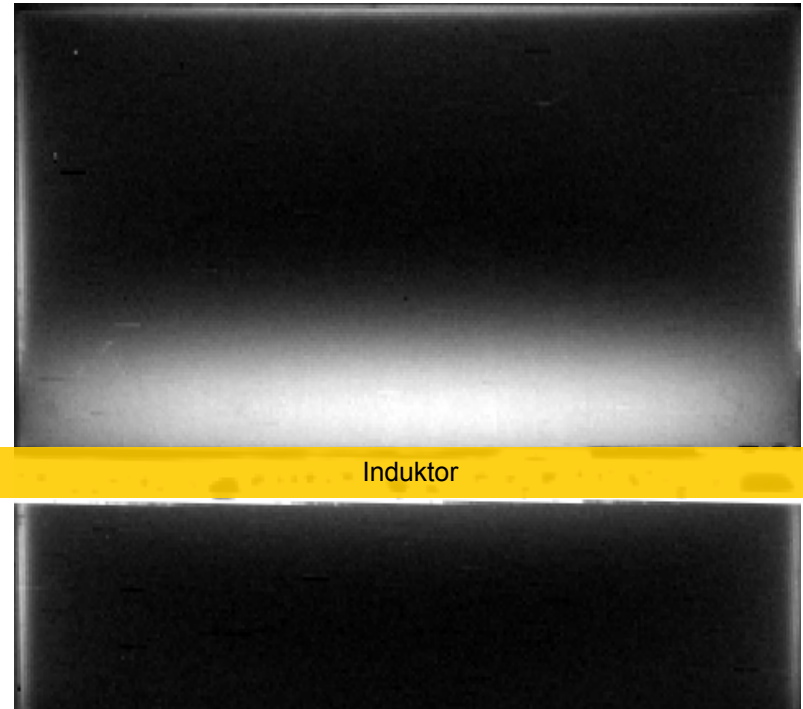
## • Simulation:

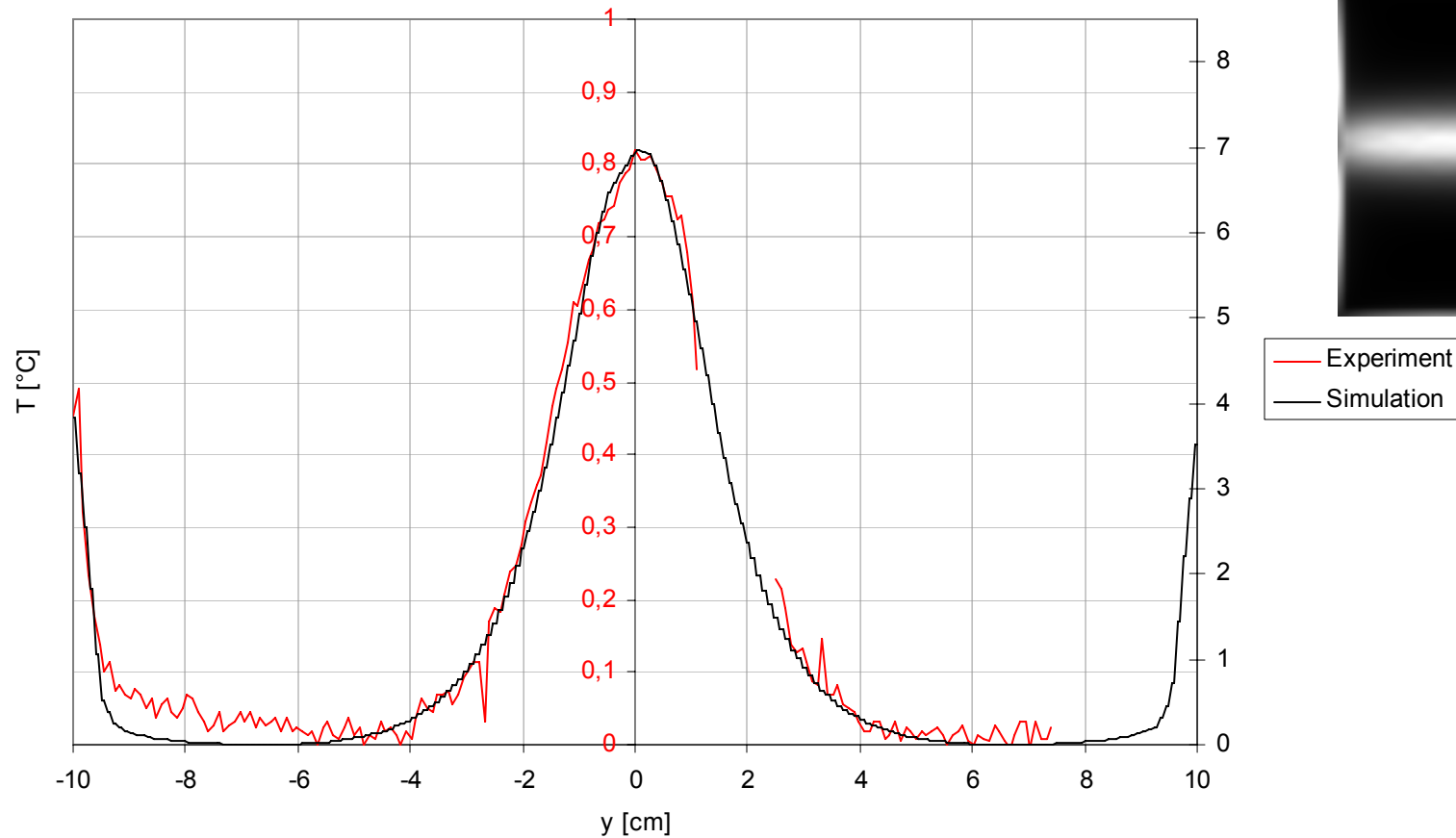
- Material: V2A
- 100 ms Induktionpuls
- 1000 A bei 400 kHz Strom im Induktor



## • Experiment:

- Material: V2A
- 100 ms Induktionpuls
- 400 - 800 A bei ca. 360 kHz Strom im Induktor
- geschwärzt und Nullbild abgezogen





- **An den Bildern und an dem Vergleich der Daten sieht man dass Experiment und Simulation sehr gut übereinstimmen**



## • Grundlagen der induktiven Anregung

- Analytische Modelle können zur Vorhersage des Stromflusses bei induktiver Anregung verwendet werden (induzierter und rückfließender Strom können getrennt behandelt werden)
- Die induzierte Stromdichteverteilung an der Oberfläche wird durch den Proximity Effekt bestimmt
  - => Der Strom fließt hauptsächlich unter dem Induktor (in der Entfernung  $h$  neben dem Induktor fließt nur noch 50%)
- Die Stromdichteverteilung in der Tiefe wird durch den Skin Effekt bestimmt
  - => Der Strom fließt hauptsächlich an der Oberfläche (innerhalb 1 Skintiefe sinkt die Stromdichte auf 37% ab)
- Der hinfließende Strom fließt hauptsächlich an der Vorderseite
- Der rückfließende Strom fließt zu gleichen Teilen auf der Vorder- und Rückseite
- Der rückfließende Strom ist genauso stark wie der hinfließende Strom aber von entgegengesetztem Vorzeichen
- Der real induzierte Strom resultiert aus Addition des hin- und rückfließenden Strom

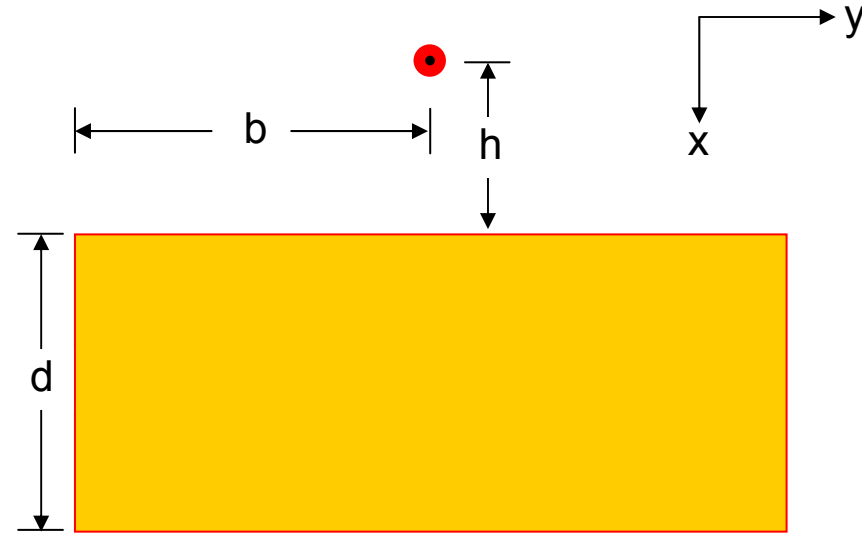


- **Einführung in die Induktionsthermographie**
- **Theoretische Grundlagen der induktiven Anregung**
  - Maxwell Gleichung
  - Diffusionsgleichungen der Elektrodynamik
- **Berechnung der Stromdichteverteilung**
  - Direktkontakt: Stromdichteverteilung in Leitern
  - Induktion: Stromdichteverteilung durch angelegtes Magnetfeld
    - Stromdichteverteilung in halbbunendlichem Körper
    - Stromdichteverteilung in endlich dicker Platte
    - Magnetfeld durch Induktor
    - Stromdichteverteilung in endlich großer Platte
  - Abgleich mit dem Experiment
- **Abhängigkeit von äußeren Parametern**
  - Wirkungsgrad
  - Abstand Induktor – Probe
  - Probendicke
  - Diffusivität
- **Stromdichteverteilung an einer Nut**
  - Variation der Nutbreite
  - Störung der Stromdichteverteilung durch eine Nut
  - Vergleich mit dem Experiment
- **Zusammenfassung & Ausblick**



- Der in der Probe induzierte Strom ist

$$I_{ind}(b) = \operatorname{Re} \left( \int_{-b}^b \int_0^d \hat{j}_z(x, y, t) dx dy \right) =$$
$$= \frac{2I(t)}{\pi} \arctan \left( \frac{b}{h} \right)$$



- Dies ergibt für einen in  $y$ -Richtung unendlich ausgedehnten Körper

$$\lim_{b \rightarrow \infty} I_{ind}(b) = I$$

- Die induzierte Leistung beträgt

$$P_P(b) = \frac{I^2 \cdot l}{\pi h} \arctan \left( \frac{b}{h} \right) \sqrt{\frac{\mu \mu_0 f}{\pi \sigma}}$$





$$\eta = \frac{P_P}{P_P + P_C} = \frac{1}{1 + \frac{\pi h}{2a} \sqrt{\frac{\mu_C \sigma_P}{\mu_P \sigma_C}} \frac{1}{\arctan\left(\frac{b}{h}\right)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{\pi h}{2a} \sqrt{\frac{\sigma_P}{\mu_P \sigma_C}}}$$

- **Um den Wirkungsgrad zu maximieren sollte**

- die Leitfähigkeit des Induktors möglichst hoch und die relative Permeabilität gleich eins sein => gute Materialien für Induktoren: Silber, Kupfer (beide  $\sim 60 \cdot 10^6$  S/m)
- die Leitfähigkeit der Probe möglichst schlecht (Voraussetzung ist natürlich eine leitfähige Probe) (z.B. Stahl  $\sim 1,5 \cdot 10^6$  S/m) und die Permeabilität möglichst groß sein (magnetische Materialien)
- der Abstand Induktor – Probe möglichst klein sein (Aber: Umso kleiner der Abstand desto schmaler wird der Bereich in dem Strom induziert wird)
- der Radius des Induktors möglichst groß sein (Aber: Problem mit der Sichtbarkeit)
- die Breite der Probe sollte möglichst groß sein

- **Der Wirkungsgrad ist unabhängig von der Frequenz**

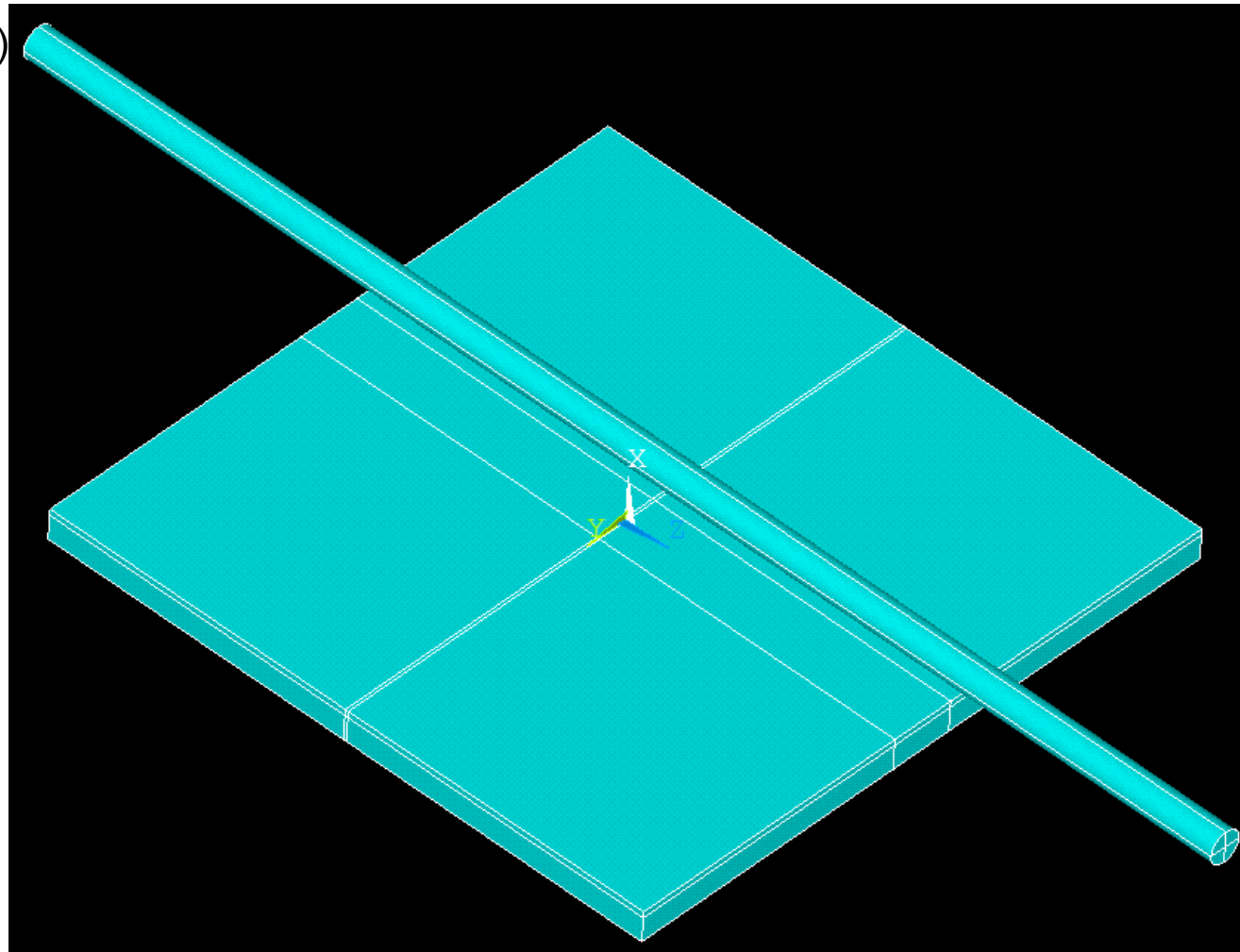


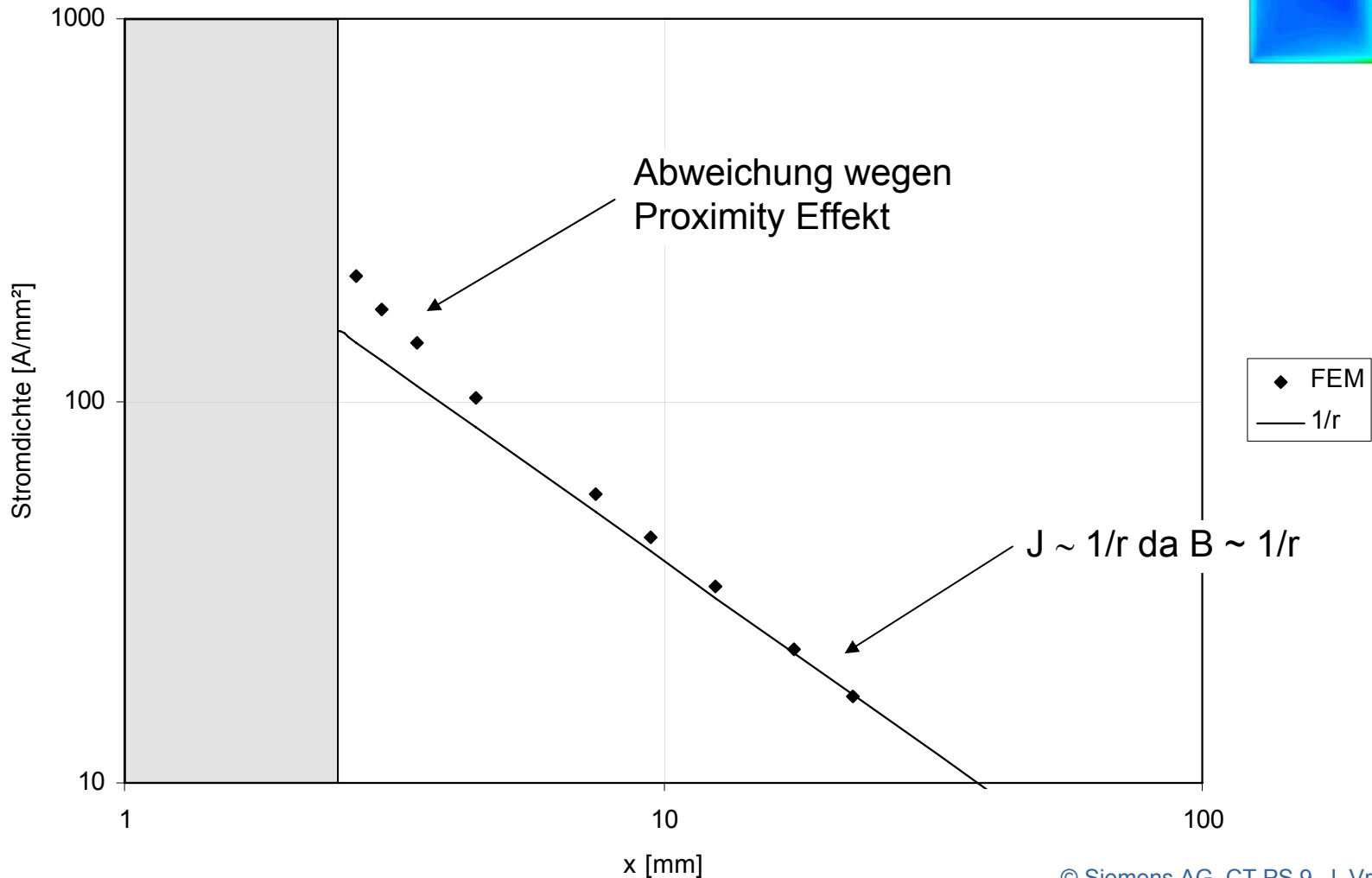
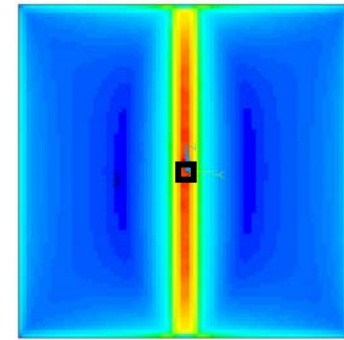
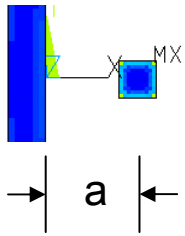
- **Untersuchungen ausgehend von einer Standardprobe mit folgenden Eigenschaften**

- Material:  
V2A (bzw. Inconel)
- Dimensionen:  
100x100x5 mm

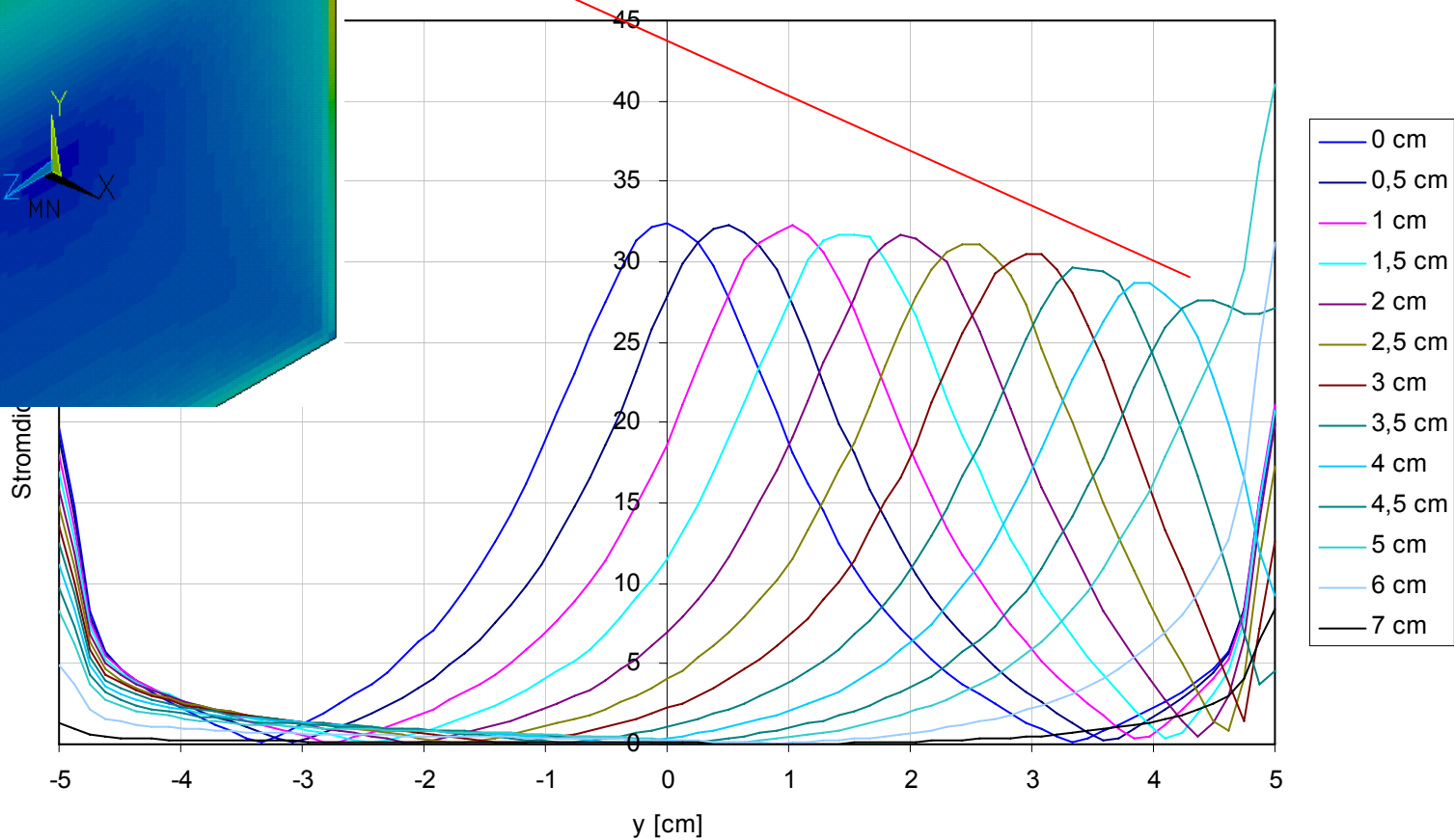
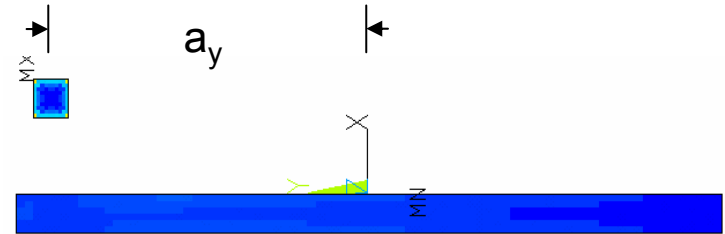
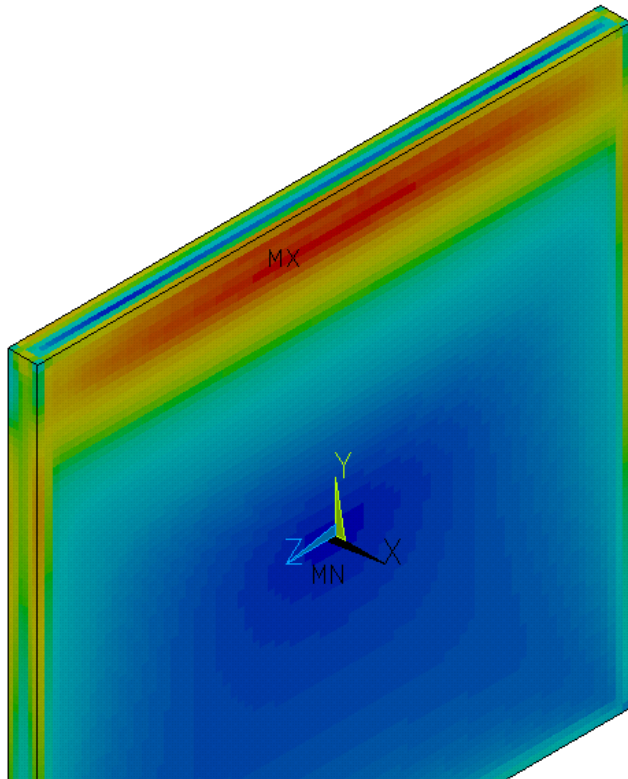
- **Induktor:**

- Material:  
Kupfer
- Abstand zur  
Probe: 10mm
- Strom:  
1000 A
- Frequenz:  
400 kHz



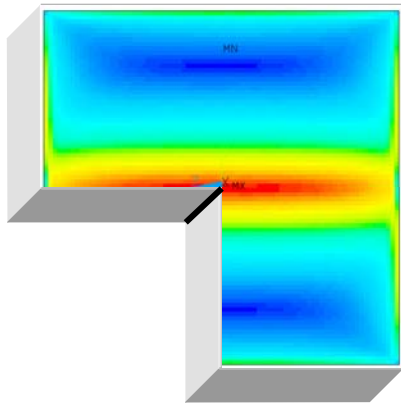


- Umso näher am Rand desto geringer die Stromdichte

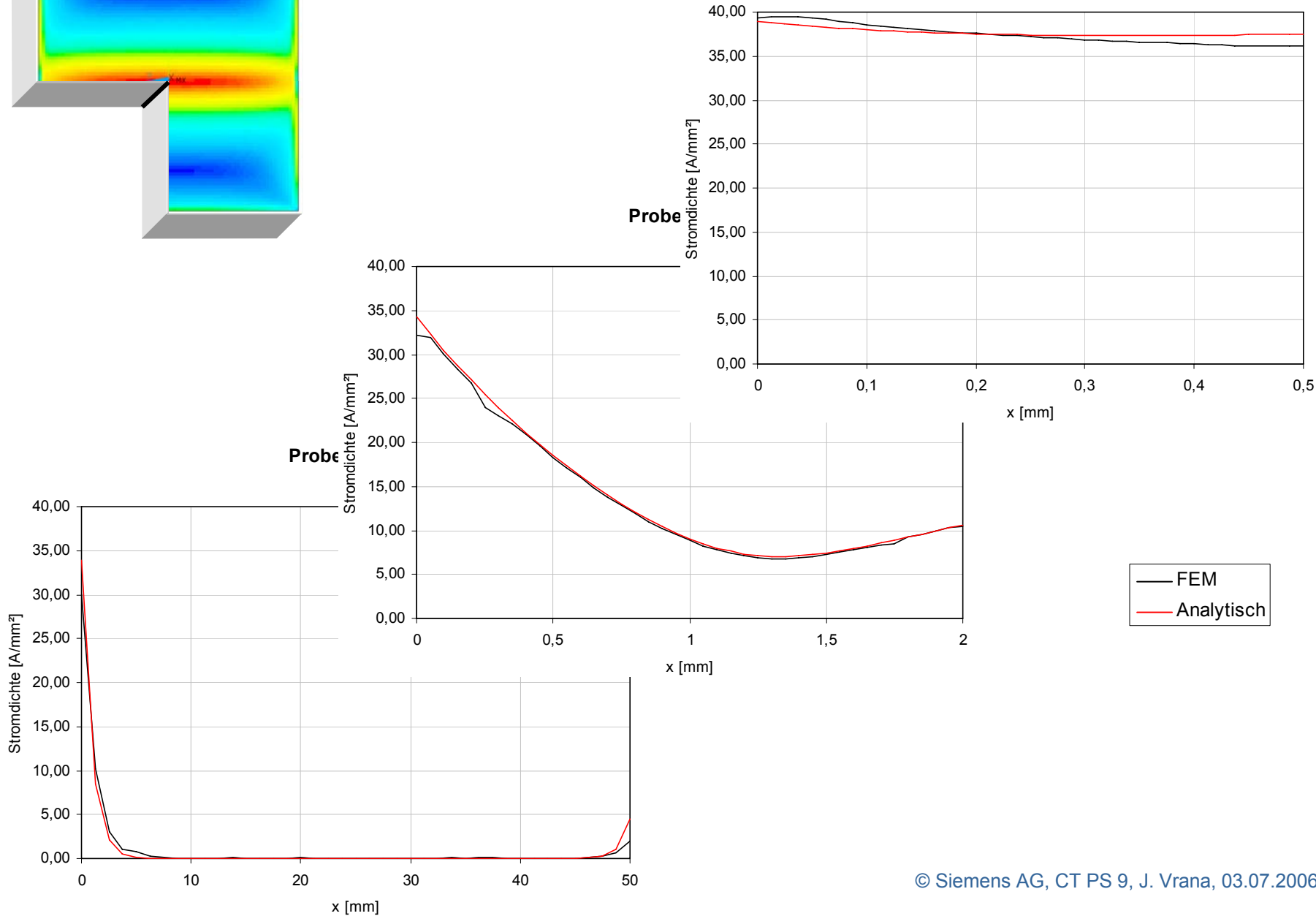


# Verlauf der Stromdichte in der Tiefe

SIEMENS

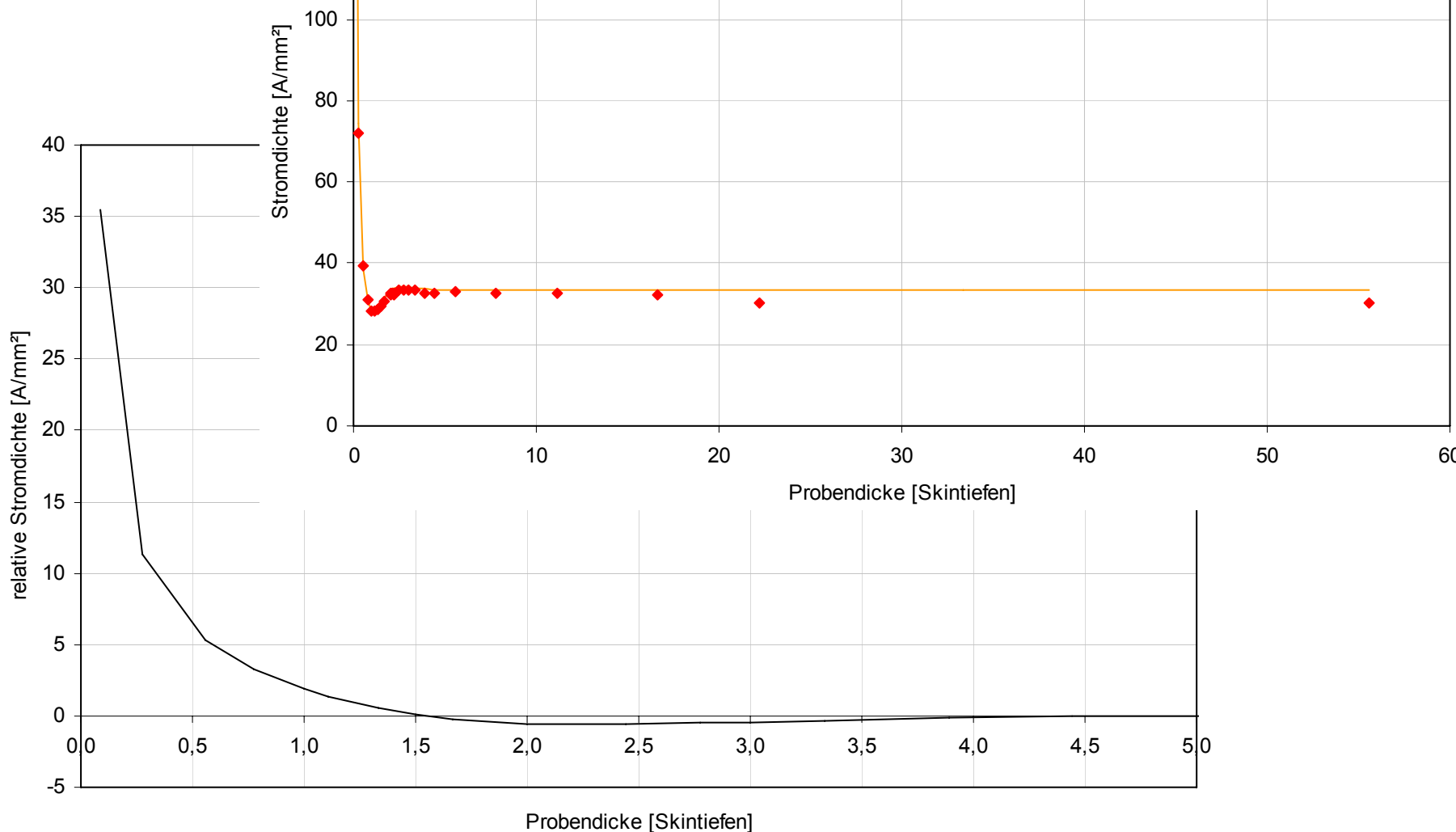


Probendicke: 0,5 mm

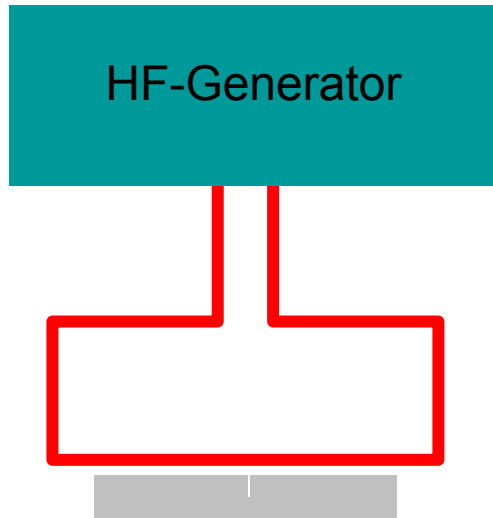


**=> Bei dünnen Proben (< 1,5 Skintiefen) wird die Stromdichte durch den Strom auf der Rückseite reduziert!**

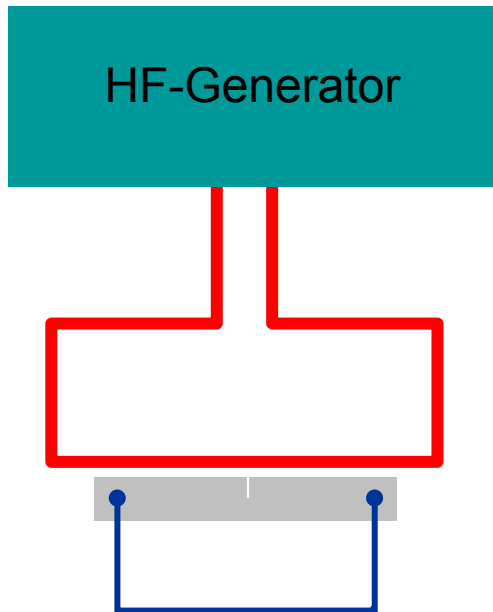
◆ FEM: Mitte (Vorderseite)  
— Analytisch (Vorderseite)



- Induktion



- Induktion mit Rückflußmöglichkeit (Bypass)

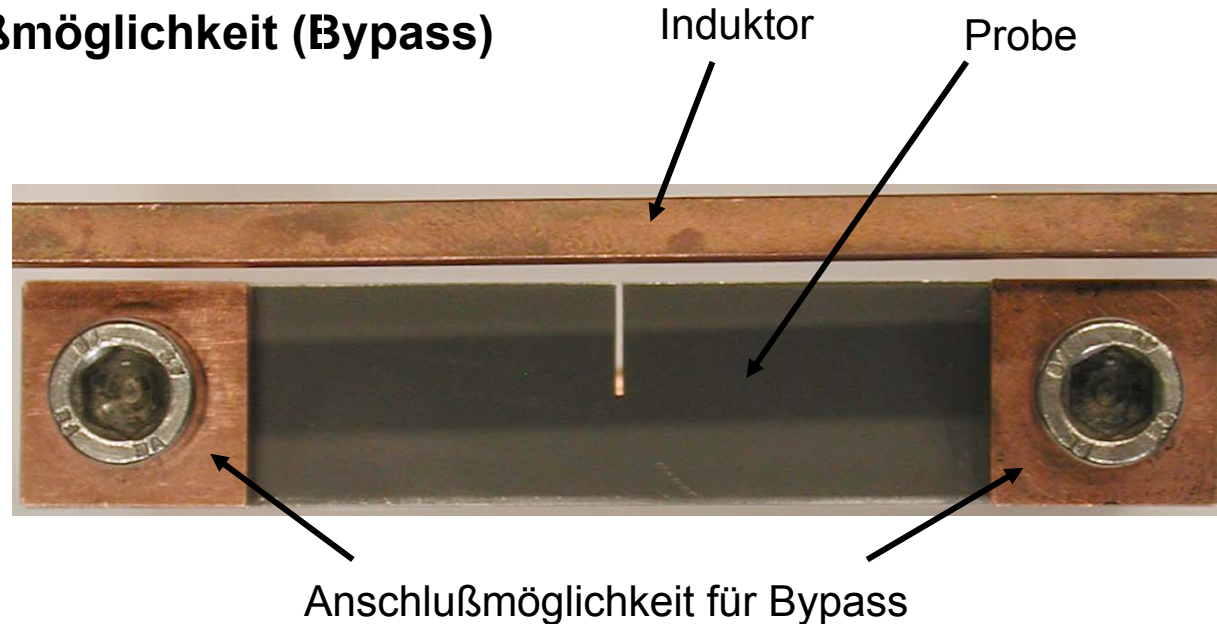


- Probe

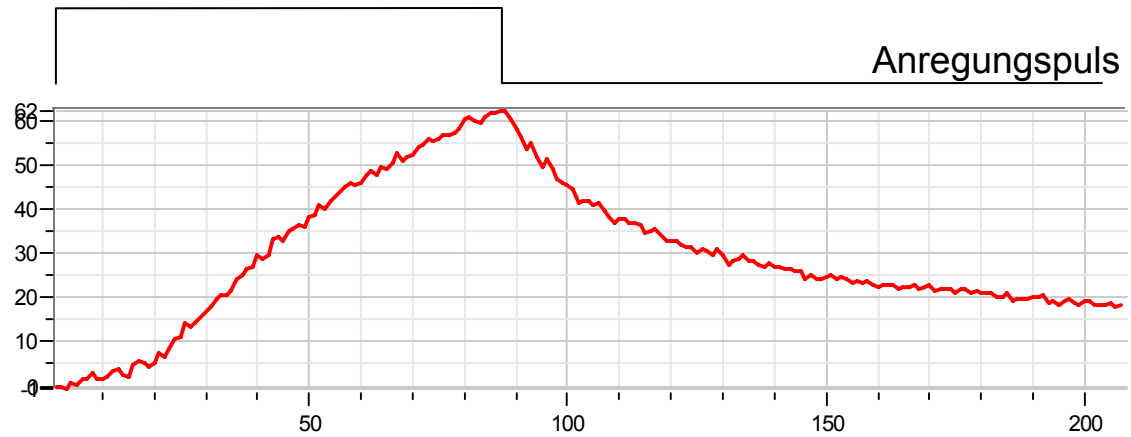
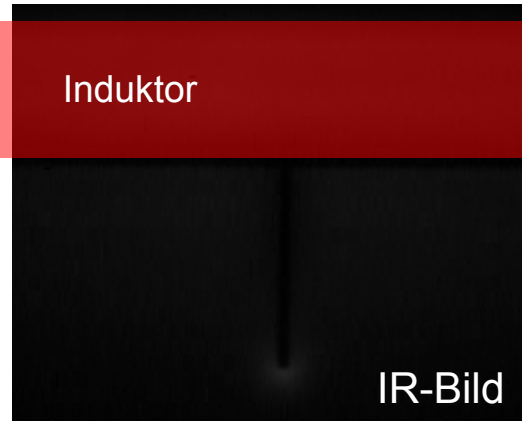
- Dimensionen: 80x15x1,5 mm
- Material: V2A
- Schlitz: 0,5x7,5 mm

- Induktion:

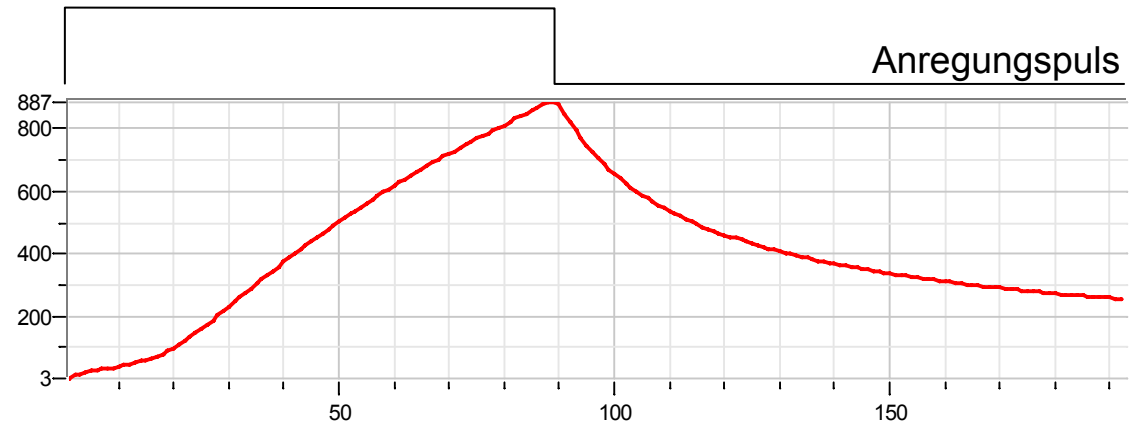
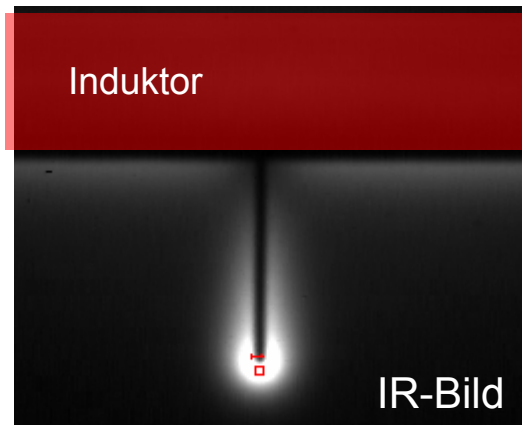
- Pulslänge: 100 ms
- Frequenz: 360kHz



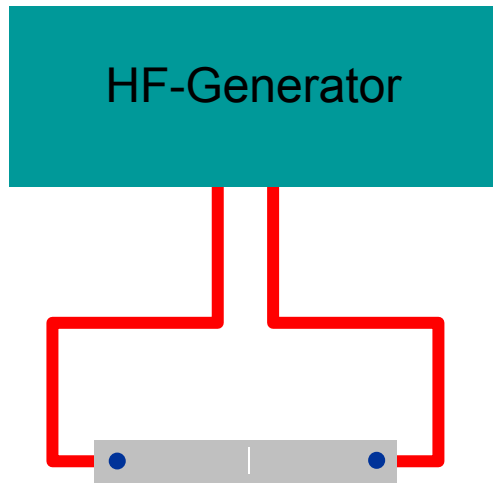
- Induktion



- Induktion mit Rückflußmöglichkeit (Bypass)







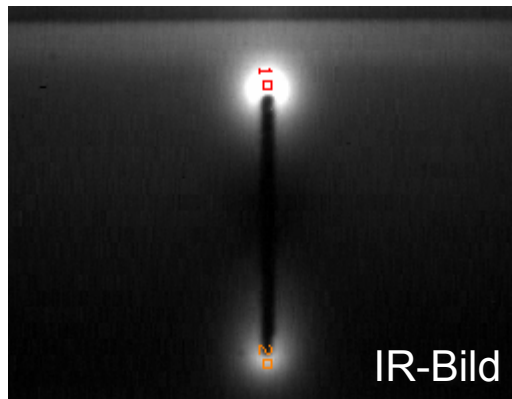
## • Probe

- Dimensionen: 80x15x1,5 mm
- Material: V2A
- Schlitz: 0,5x10 mm

## • Strompuls:

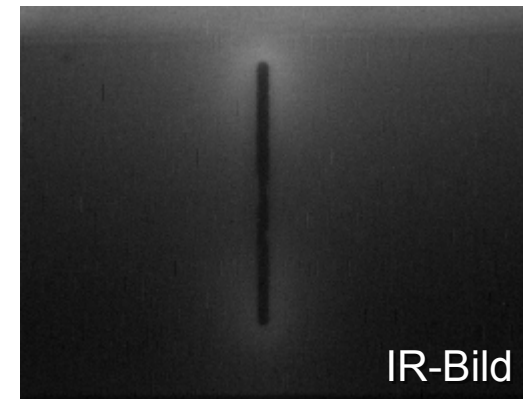
- Pulslänge: 100 ms
- Frequenz: 360kHz

## • V2A



$$\alpha = 3,5 \text{ mm}^2/\text{s}$$

## • Aluminium



$$\alpha = 70 \text{ mm}^2/\text{s}$$

**=> Die Diffusivität sollte nicht zu hoch sein!**

- **Der Strom fließt hauptsächlich**
  - An der Oberfläche (innerhalb 1 Skintiefe sinkt die Stromdichte auf 37% ab)
  - Unter dem Induktor (in der Entfernung h neben dem Induktor fließt nur 50%)
- **Der Induktor sollte aus Kupfer oder Silber bestehen**
- **Welche Proben eignen sich für Induktionsthermographie:**
  - Magnetische eignen sich gut
  - Proben mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit eignen sich weniger (z.B.: Kupfer, Silber, Gold, Aluminium, ...)
  - Große, dicke, ... Proben eignen sich besser
  - Die Diffusivität sollte nicht zu groß sein da sonst die Wärme zu schnell wegfließen und nicht mehr detektiert werden kann (schlecht ist z.B. Aluminium)
- **Wenn möglich sollte man dem Strom (insbesondere bei dünnen Proben) eine andere Rückflussmöglichkeit bieten! (Bypass)**



- **Einführung in die Induktionsthermographie**
- **Theoretische Grundlagen der induktiven Anregung**
  - Maxwell Gleichung
  - Diffusionsgleichungen der Elektrodynamik
- **Berechnung der Stromdichteverteilung**
  - Direktkontakt: Stromdichteverteilung in Leitern
  - Induktion: Stromdichteverteilung durch angelegtes Magnetfeld
    - Stromdichteverteilung in halbbunendlichem Körper
    - Stromdichteverteilung in endlich dicker Platte
    - Magnetfeld durch Induktor
    - Stromdichteverteilung in endlich großer Platte
  - Abgleich mit dem Experiment
- **Abhängigkeit von äußeren Parametern**
  - Wirkungsgrad
  - Abstand Induktor – Probe
  - Probendicke
  - Diffusivität
- **Stromdichteverteilung an einer Nut**
  - Variation der Nutbreite
  - Störung der Stromdichteverteilung durch eine Nut
  - Vergleich mit dem Experiment
- **Zusammenfassung & Ausblick**



- **Probe:**

- Dimensionen: 100x100x5 mm
- Material: Inconel

- **Nut:**

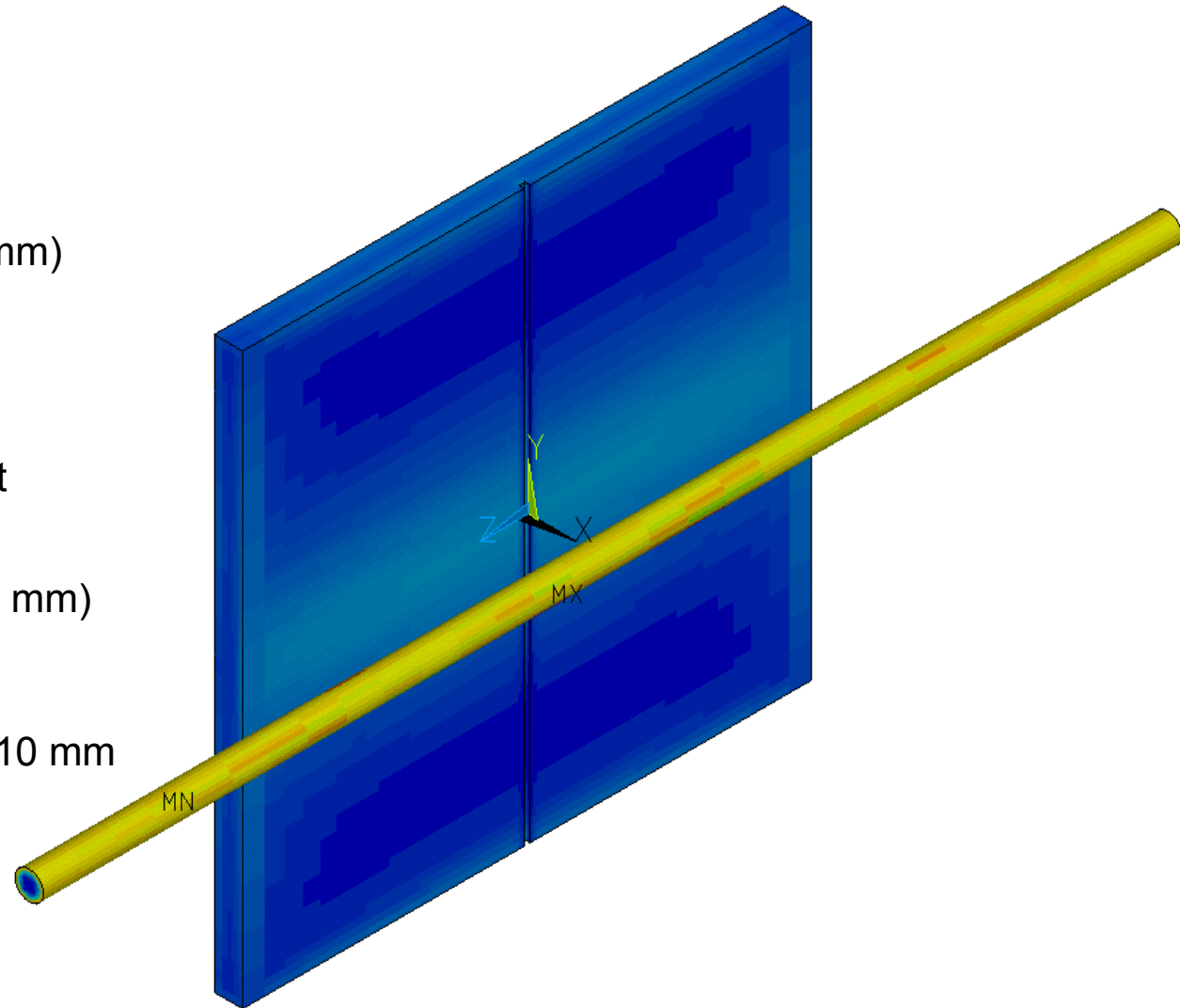
- Tiefe:  
1 Skintiefe (ca. 0,9 mm)

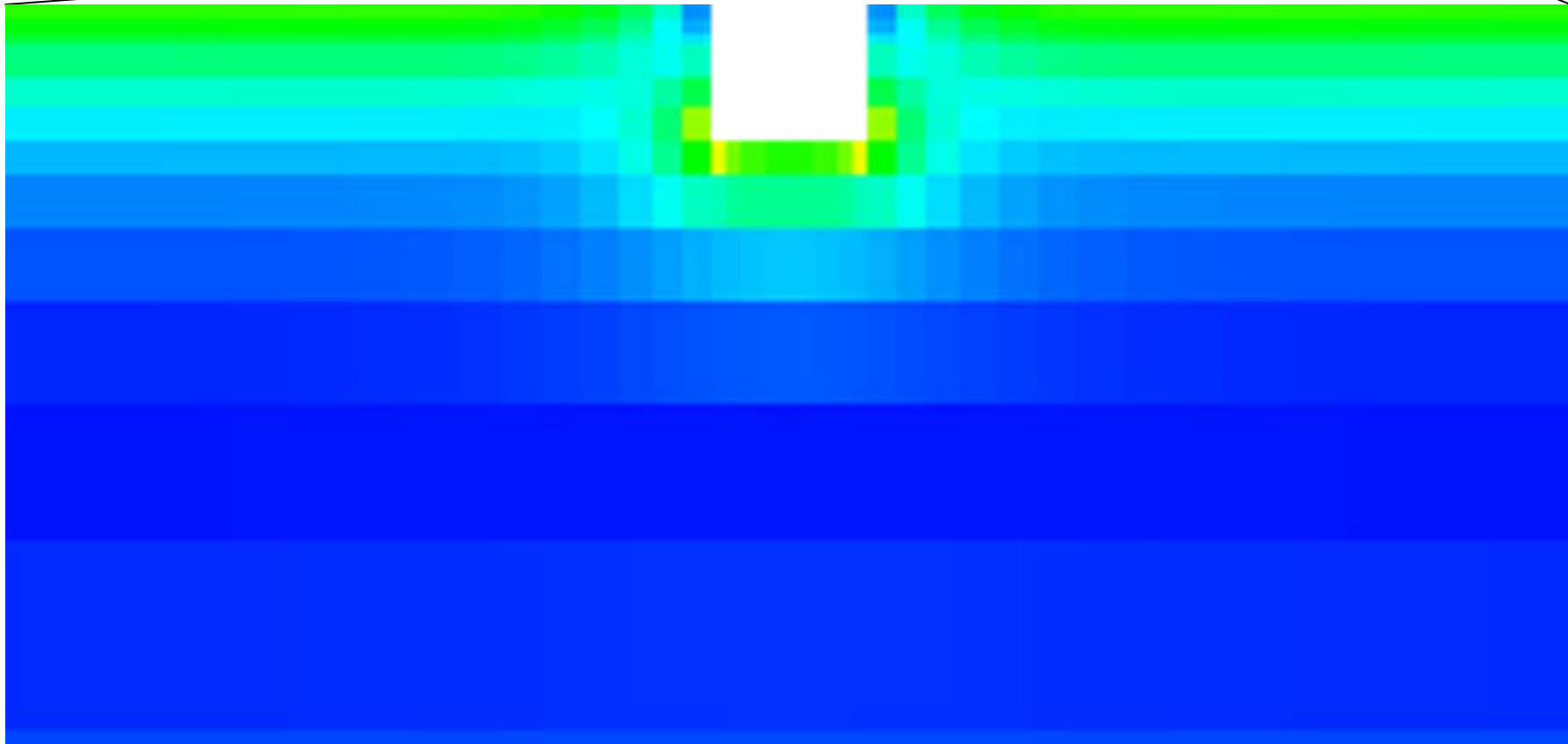
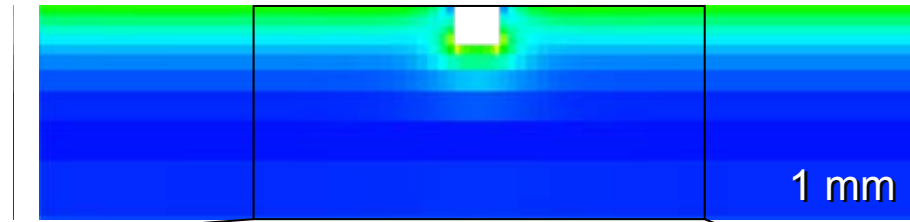
- **Breite:**

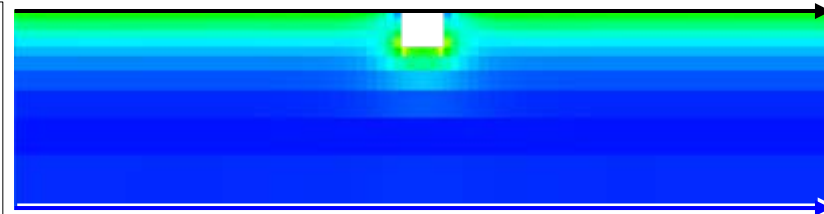
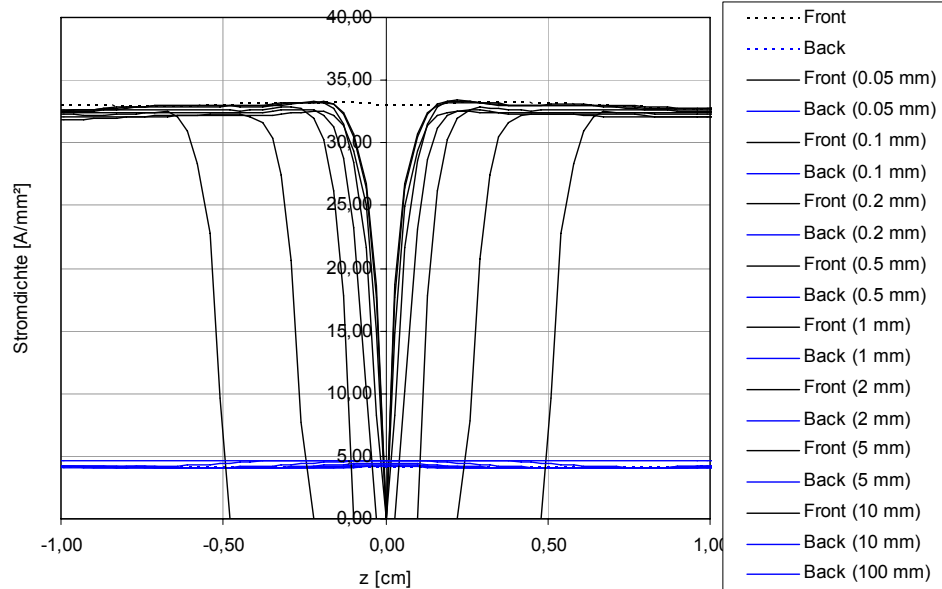
- 0,05 mm – 10 mm
- + 1x Probe ohne Nut
- + 1x „∞“ breit  
(=> Probendicke 4,1 mm)

- **Induktor:**

- Abstand zur Probe: 10 mm
- Strom: 1000 A
- Frequenz: 400 kHz

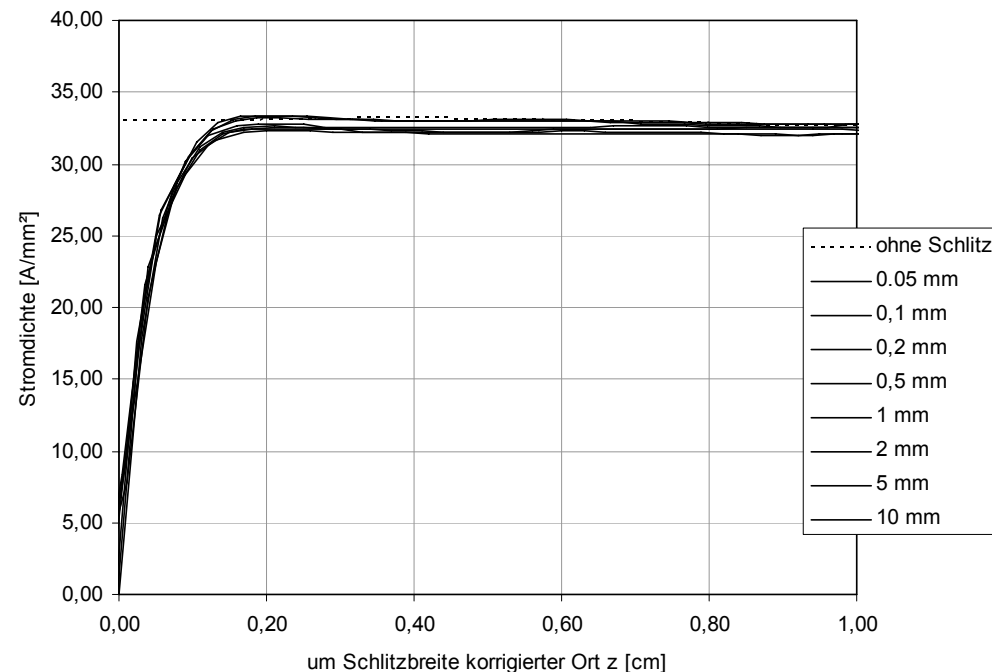






• Die Stromdichteverteilung an der Probenrückseite ändert sich nicht mit der Schlitzbreite

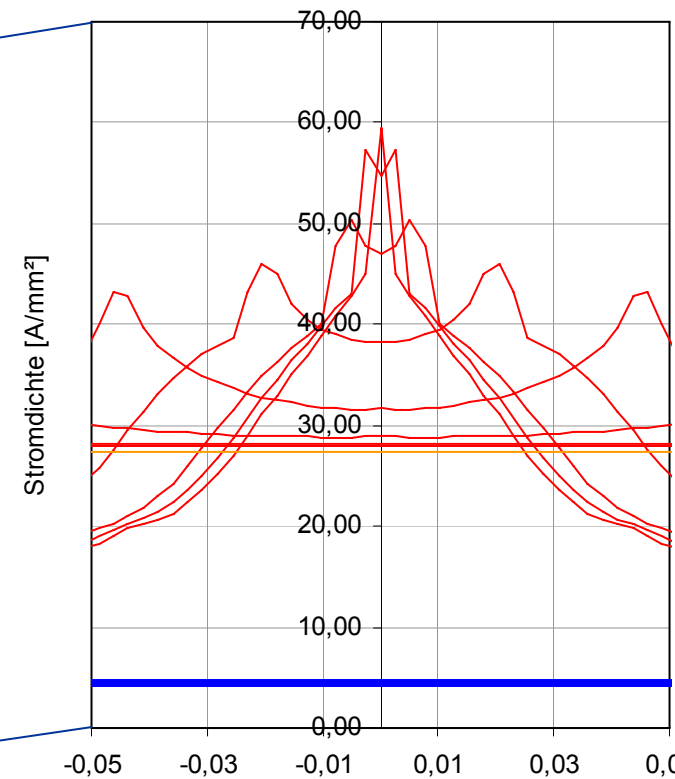
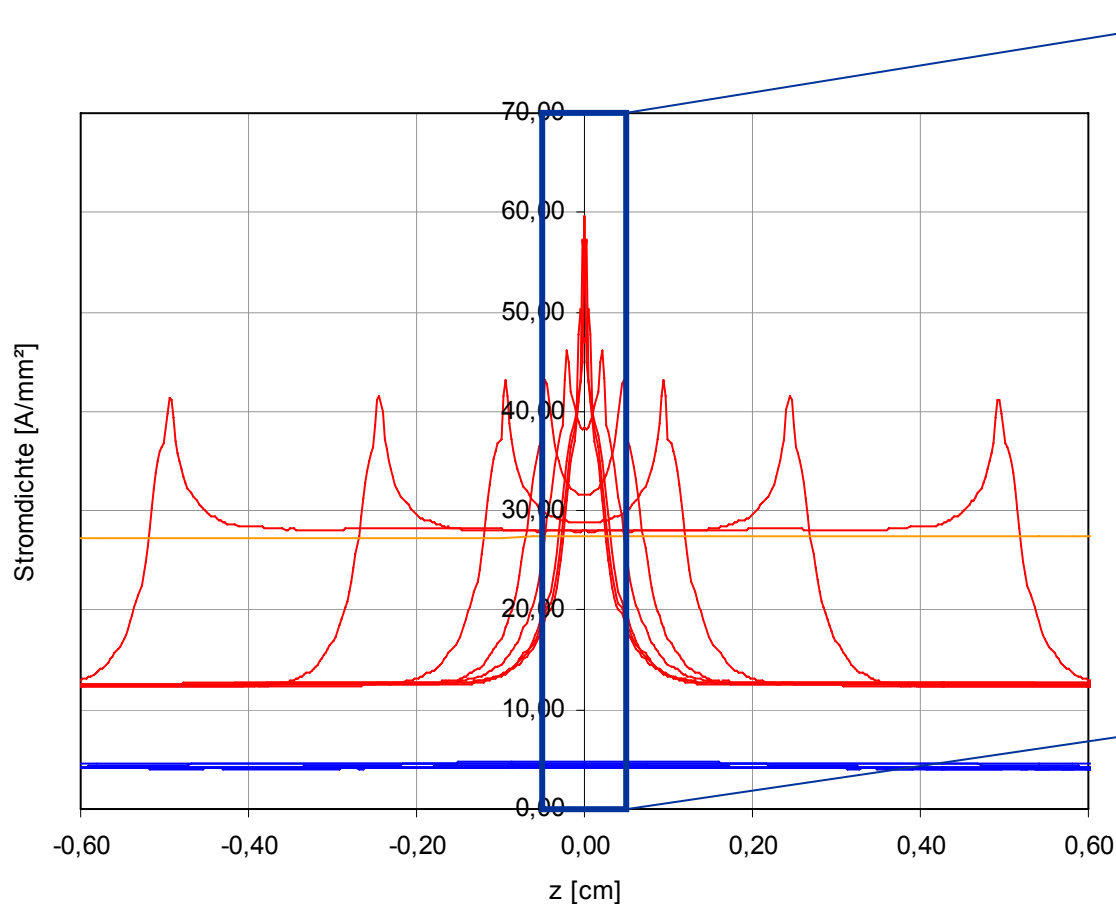
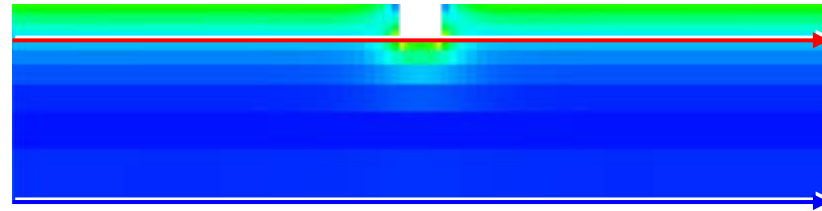
• Die Stromdichteverteilung an der Probenvorderseite ist nur um die Schlitzbreite verschoben

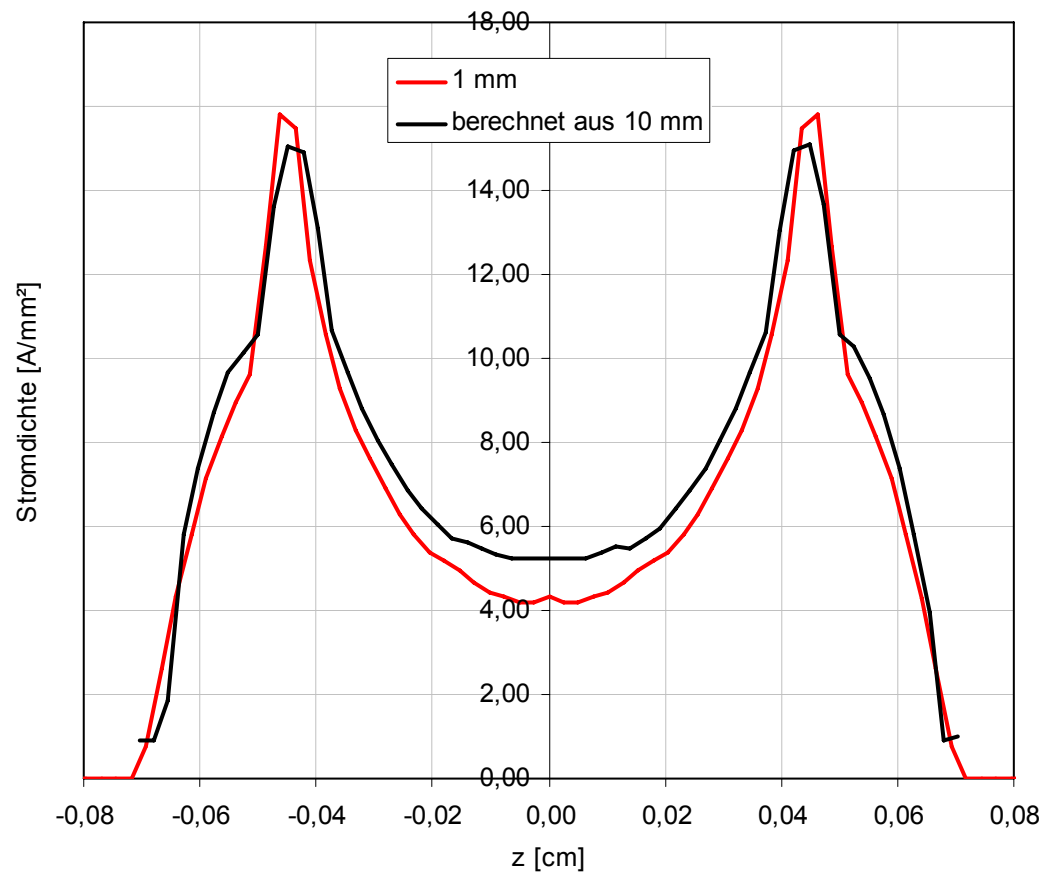
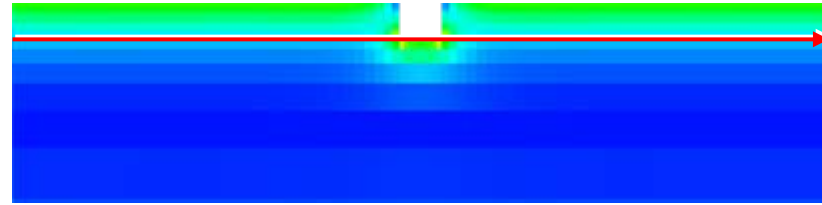


# Stromdichteverteilung an einer Nut

SIEMENS

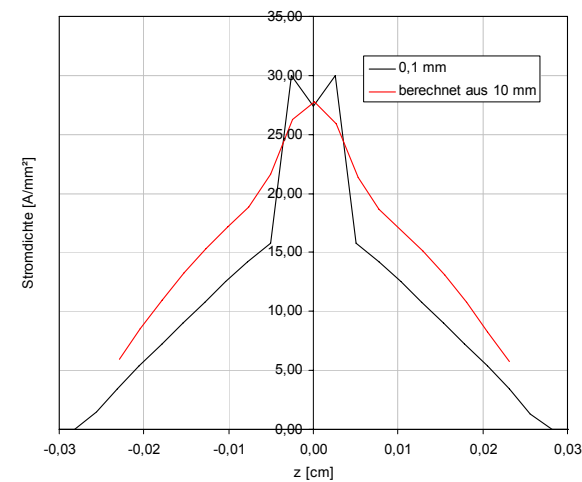
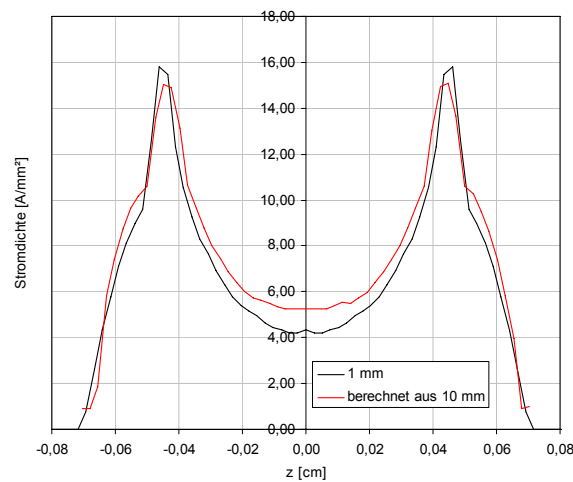
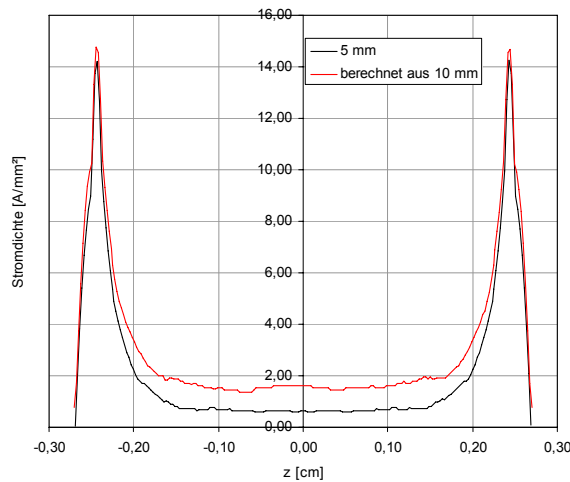
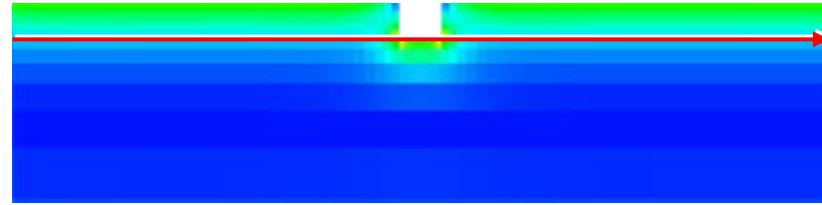
- Die Stromdichteverteilung in 0,9 mm Tiefe (Tiefe der Nut) wird an den Kanten des Schlitzes verstärkt
- Dazwischen sinkt die Stromdichte auf das Signal der Probe mit der „∞“ breiten Nut



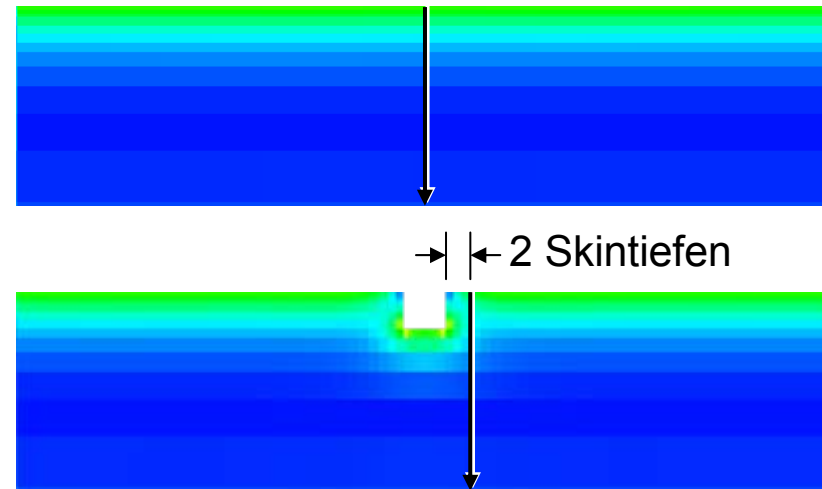
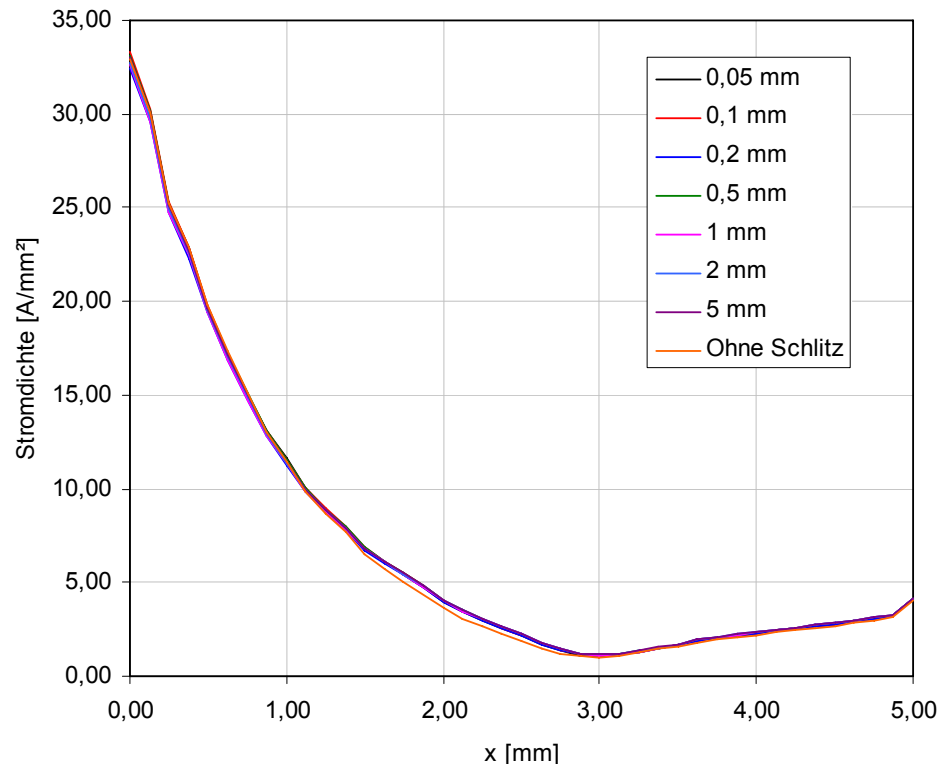




- Für schmalere Nuten ergibt sich die Stromdichte aus additiver Überlagerung der Stromdichteverstärkung der rechten und linken Ecke



- **Stromdichte aufgetragen über der x-Achse der Probe (Tiefe), in der Mitte der Probe ohne Nut, bzw. 2 Skintiefen neben der Nut**



- **Die durch den Schlitz hervorgerufene Störung der Stromdichteverteilung ist auf die Nut und einen schmalen Bereich neben der Nut beschränkt (ca. 2 Skintiefen neben der Nut ist kein Effekt mehr zu sehen)**



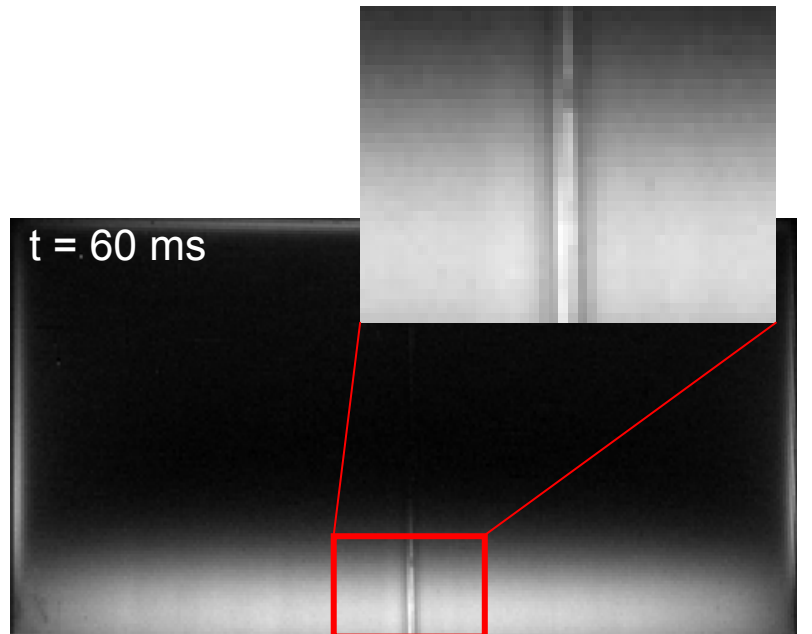
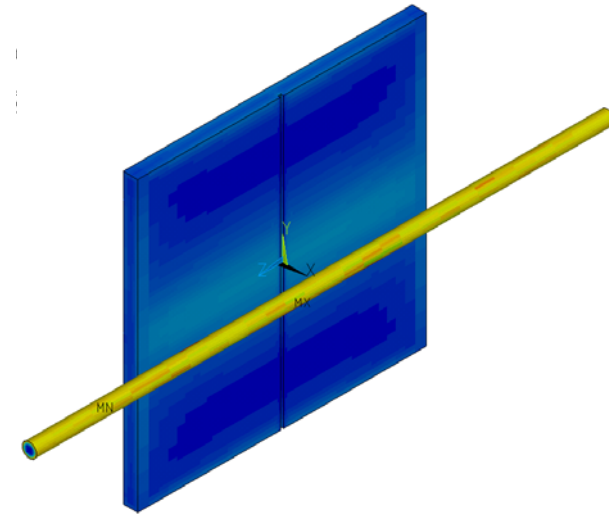
- **Probe**

- Dimensionen: 100x100x5 mm
- Material: V2A

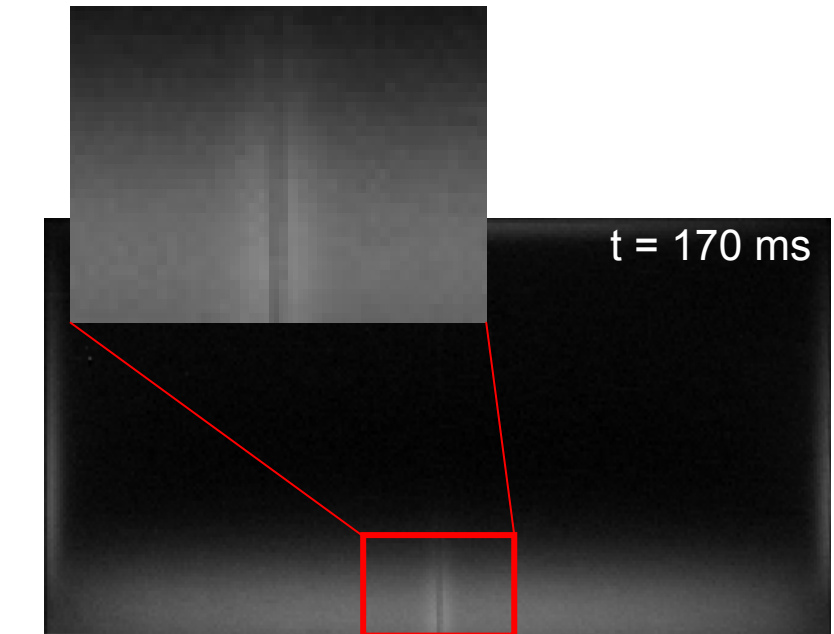
- **Nut:**

- Tiefe: ca. 1 mm (ca. 1,5 Skintiefen)
- Breite: 0,5 mm

- **Induktionspuls: 60 ms**

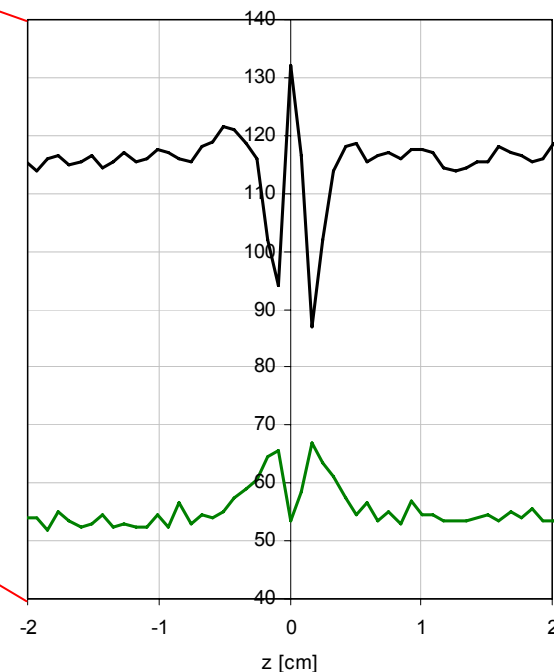
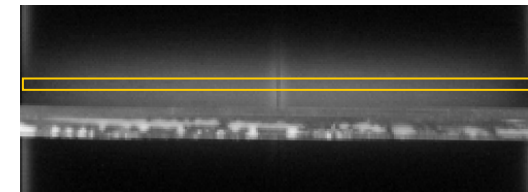
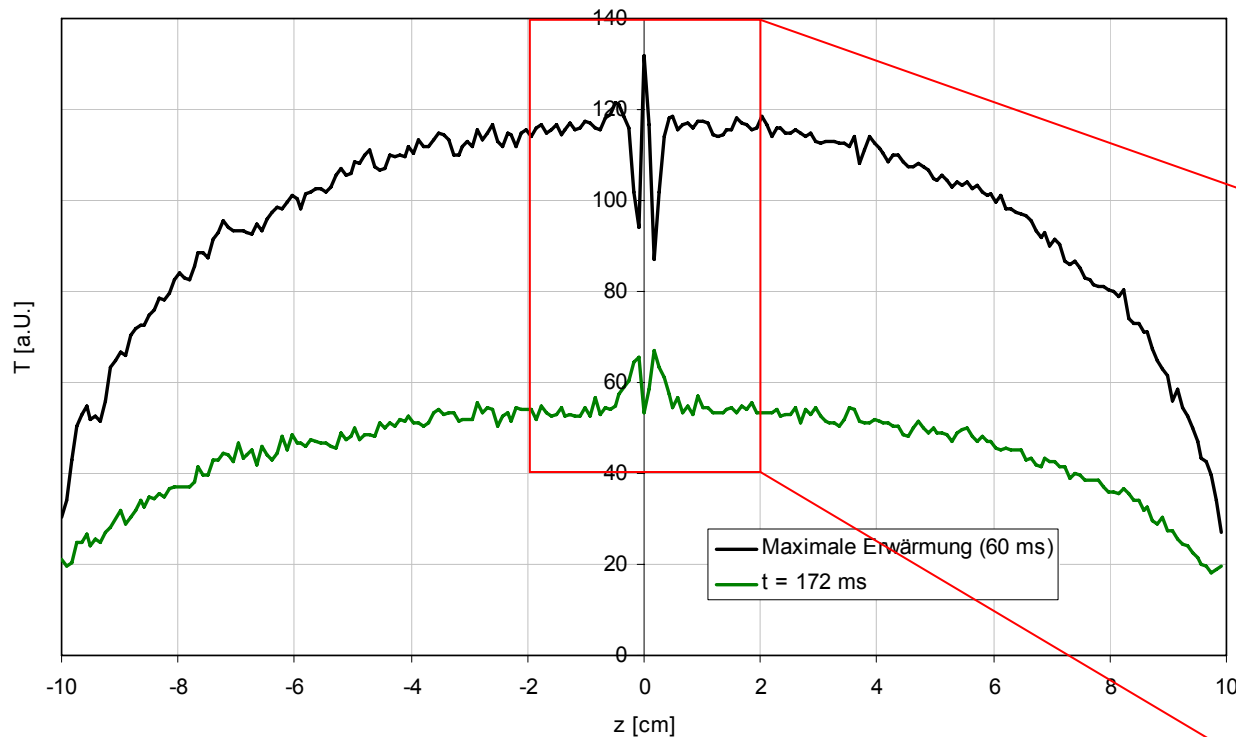


Induktor



Induktor

- $t = 60 \text{ ms}$  (Zeitpunkte der maximalen Erwärmung): Material links und rechts neben der Nut ist deutlich kühler
- $t = 172 \text{ ms}$  (nachdem die Wärme einige Zeit hatte aus der Tiefe an die Oberfläche zu gelangen): Material direkt neben der Nut ist wärmer
- Dieser Effekt tritt nur in unmittelbarer Nähe der Nut auf



- **Einführung in die Induktionsthermographie**
- **Theoretische Grundlagen der induktiven Anregung**
  - Maxwell Gleichung
  - Diffusionsgleichungen der Elektrodynamik
- **Berechnung der Stromdichteverteilung**
  - Direktkontakt: Stromdichteverteilung in Leitern
  - Induktion: Stromdichteverteilung durch angelegtes Magnetfeld
    - Stromdichteverteilung in halbbunendlichem Körper
    - Stromdichteverteilung in endlich dicker Platte
    - Magnetfeld durch Induktor
    - Stromdichteverteilung in endlich großer Platte
  - Abgleich mit dem Experiment
- **Abhängigkeit von äußeren Parametern**
  - Wirkungsgrad
  - Abstand Induktor – Probe
  - Probendicke
  - Diffusivität
- **Stromdichteverteilung an einer Nut**
  - Variation der Nutbreite
  - Störung der Stromdichteverteilung durch eine Nut
  - Vergleich mit dem Experiment
- **Zusammenfassung & Ausblick**



## • Grundlagen der induktiven Anregung

- Analytische Modelle können zur Vorhersage des Stromflusses bei induktiver Anregung verwendet werden (induzierter und rückfließender Strom können getrennt behandelt werden)
- Die induzierte Stromdichteverteilung an der Oberfläche wird durch den Proximity Effekt bestimmt
  - => Der Strom fließt hauptsächlich unter dem Induktor (in der Entfernung  $h$  neben dem Induktor fließt nur noch 50%)
- Die Stromdichteverteilung in der Tiefe wird durch den Skin Effekt bestimmt
  - => Der Strom fließt hauptsächlich an der Oberfläche (innerhalb 1 Skintiefe sinkt die Stromdichte auf 37% ab)
- Der hinfließende Strom fließt hauptsächlich an der Vorderseite
- Der rückfließende Strom fließt zu gleichen Teilen auf der Vorder- und Rückseite
- Der rückfließende Strom ist genauso stark wie der hinfließende Strom aber von entgegengesetztem Vorzeichen
- Der induzierte Strom resultiert aus Addition des hin- und rückfließenden Strom



## • **Abhängigkeit von äußeren Parametern**

- Der Induktor sollte aus Kupfer oder Silber bestehen
- Welche Proben eignen sich für Induktionsthermographie:
  - Magnetische eignen sich gut
  - Proben mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit eignen sich weniger (z.B.: Kupfer, Silber, Gold, Aluminium, ...)
  - Große, dicke, ... Proben eignen sich besser
  - Die Diffusivität sollte nicht zu groß sein da sonst die Wärme zu schnell abfließen und nicht mehr detektiert werden kann (schlecht ist z.B. Aluminium)
- Wenn möglich sollte man dem Strom (insbesondere bei dünnen Proben) eine andere Rückflussmöglichkeit bieten! (Bypass)

## • **Störung der Stromdichteverteilung an einer Nut**

- An einer Nut erwärmen sich die Kanten der Nut
- Die Wärme muss von den Kanten an die Oberfläche diffundieren
- Daher erwärmt sich das Material direkt neben einer Nut später wie das umliegende Material
- Die Störung des Stromflusses durch die Nut beschränkt sich auf eine schmale Zone um die Nut (etwa 2 Skintiefen)



- **Nuttiefe**
- **Endlich lange Schlitze**
  - Abgleich und Entwicklung von Modellen um die Veränderung des Stromflusses an Schlitzen zu verstehen (z.B. durch Current Intensity Factor)
- **Risse mit mehreren Berührungspunkten**
- **Reale Risse**

**=> Verständnis der Induktionsthermographie von der induktiven Anregung, über die Stromdichteveränderung an Nuten, bis hin zur Wärmeentstehung und -transport durch die Probe**

