



# Numerische Modellierung der elektromagnetischen Kopplungseffekte zur Phasenkorrektur von EIT-Bohrlochmessungen

**Y Zhao<sup>1</sup>, E Zimmermann<sup>1</sup>, J A Huisman<sup>2</sup>, A Treichel<sup>2</sup>, S van Waasen<sup>1</sup>, A Kemna<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Zentralinstitut für Elektronik (ZEL), Forschungszentrum Jülich GmbH

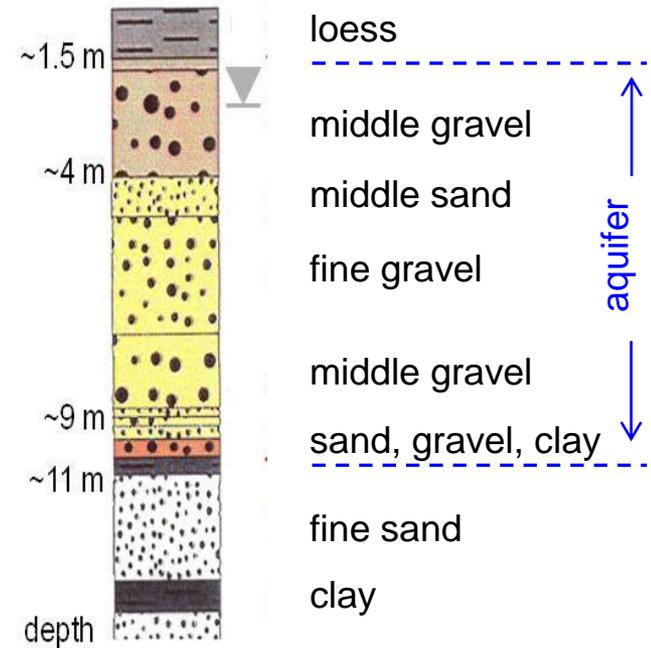
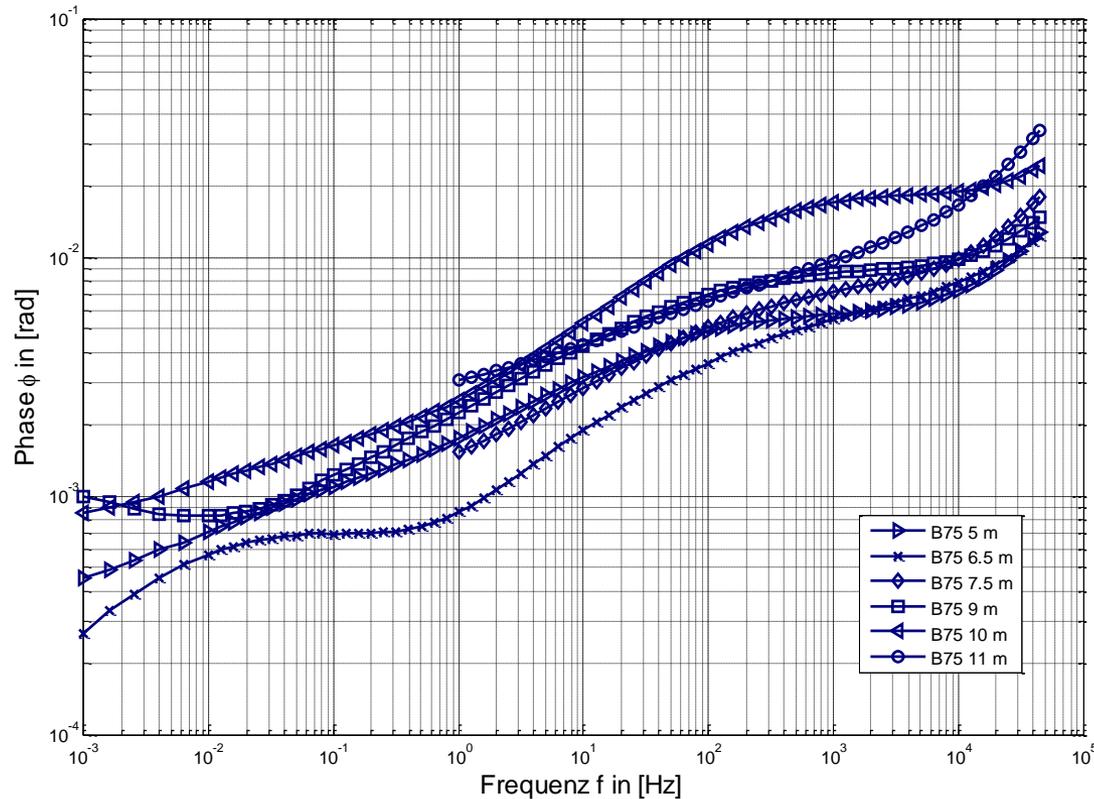
<sup>2</sup> Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3), Forschungszentrum Jülich GmbH

<sup>3</sup> Angewandte Geophysik, Steinmann-Institut, Universität Bonn

- **Ziel der Arbeit**
- **Vorgehensweise und Fortschritte**
  - **Modellierung der induktiven Effekte**
  - **Modellierung der kapazitiven Effekte**
- **Zusammenfassung und Ausblick**

# Ziel der Arbeit

- genaue SIP-Messung auch für hohe Frequenzen mit geringem Phasenfehler der Impedanzen

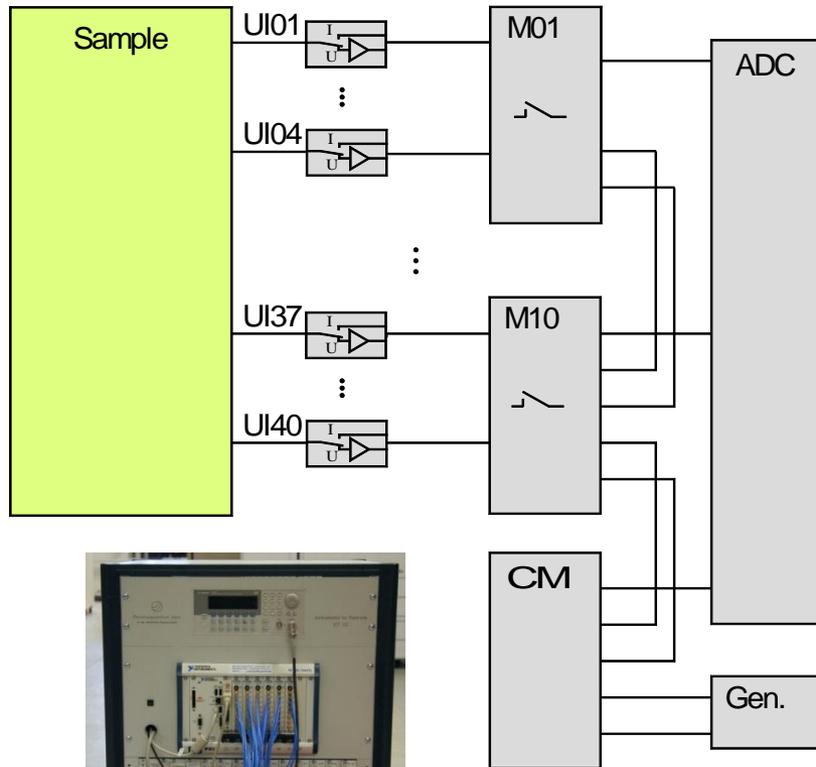


Gemessene Phasen der Bodenproben aus Krauthausen

## - Ausgangssituation und Ziel

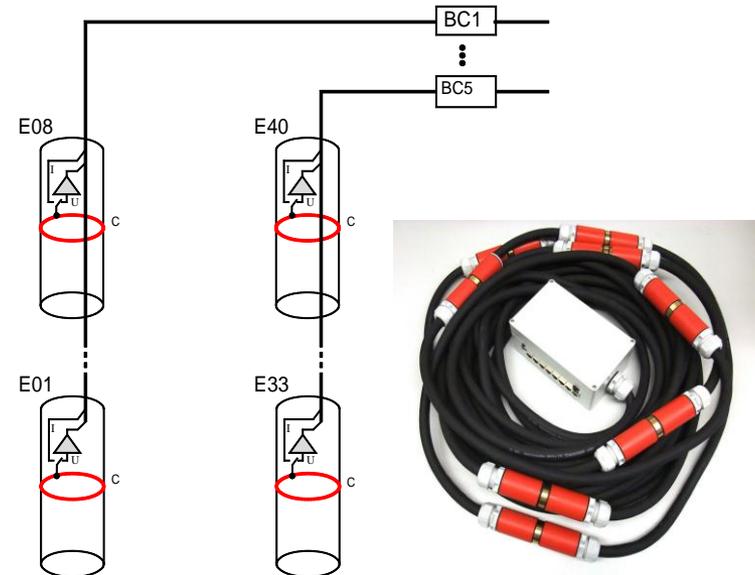
### EIT40

- 40 kombinierte Strom-/Spannung-Kanäle
- <math><1\text{ mrad}</math> Phasengenauigkeit bei 1 kHz in Labormessungen



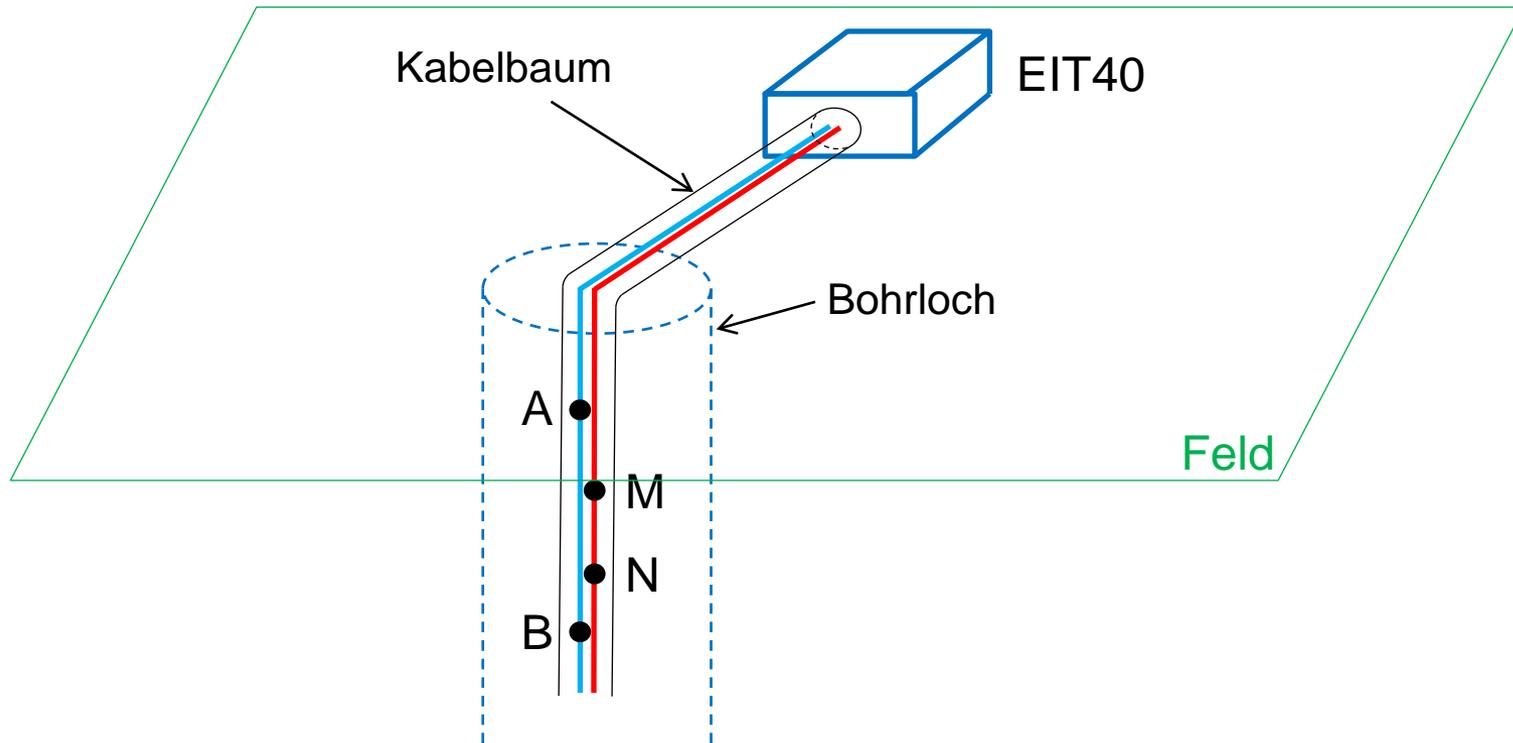
### EIT40-Bohrlochmesssystem

- Korrektur der Phasenfehler aufgrund der induktiven und kapazitiven Effekte der Kabel



# - Fallunterscheidungen bei der Feldmessung:

## 1. Sender und Empfänger in einem Bohrloch



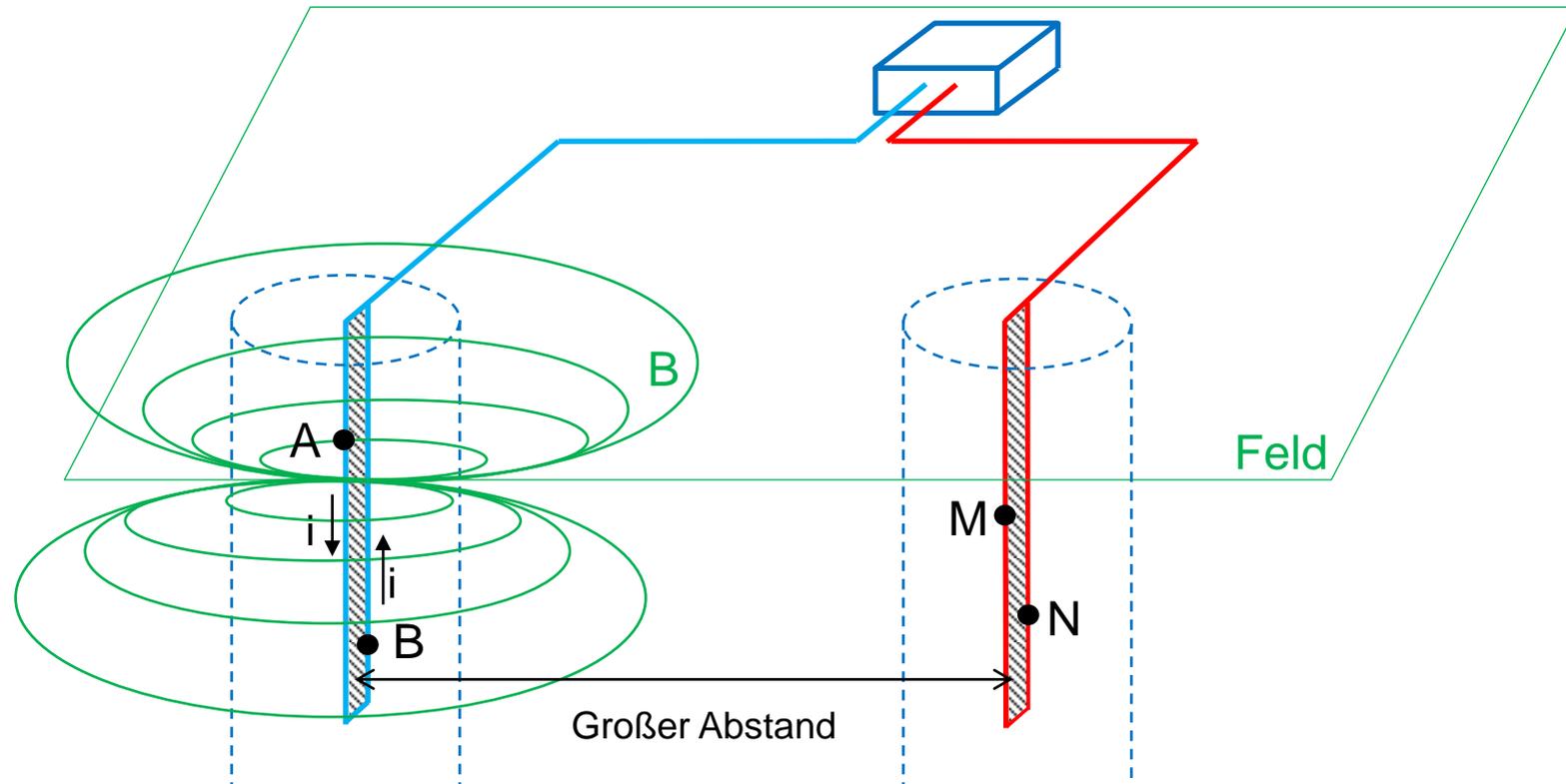
A, B: Stromelektrode  
 M, N: Spannungselektrode

— (blue) : Doppelleitung für Stromeinspeisung  
 — (red) : Doppelleitung für Spannungsmessung

1. Induktive Kopplung zwischen den Leitungen im Kabelbaum
2. Kapazitive Kopplung zwischen Kabel und Boden

# - Fallunterscheidungen bei der Feldmessung:

## 2. Sender und Empfänger in jeweiligem Bohrloch



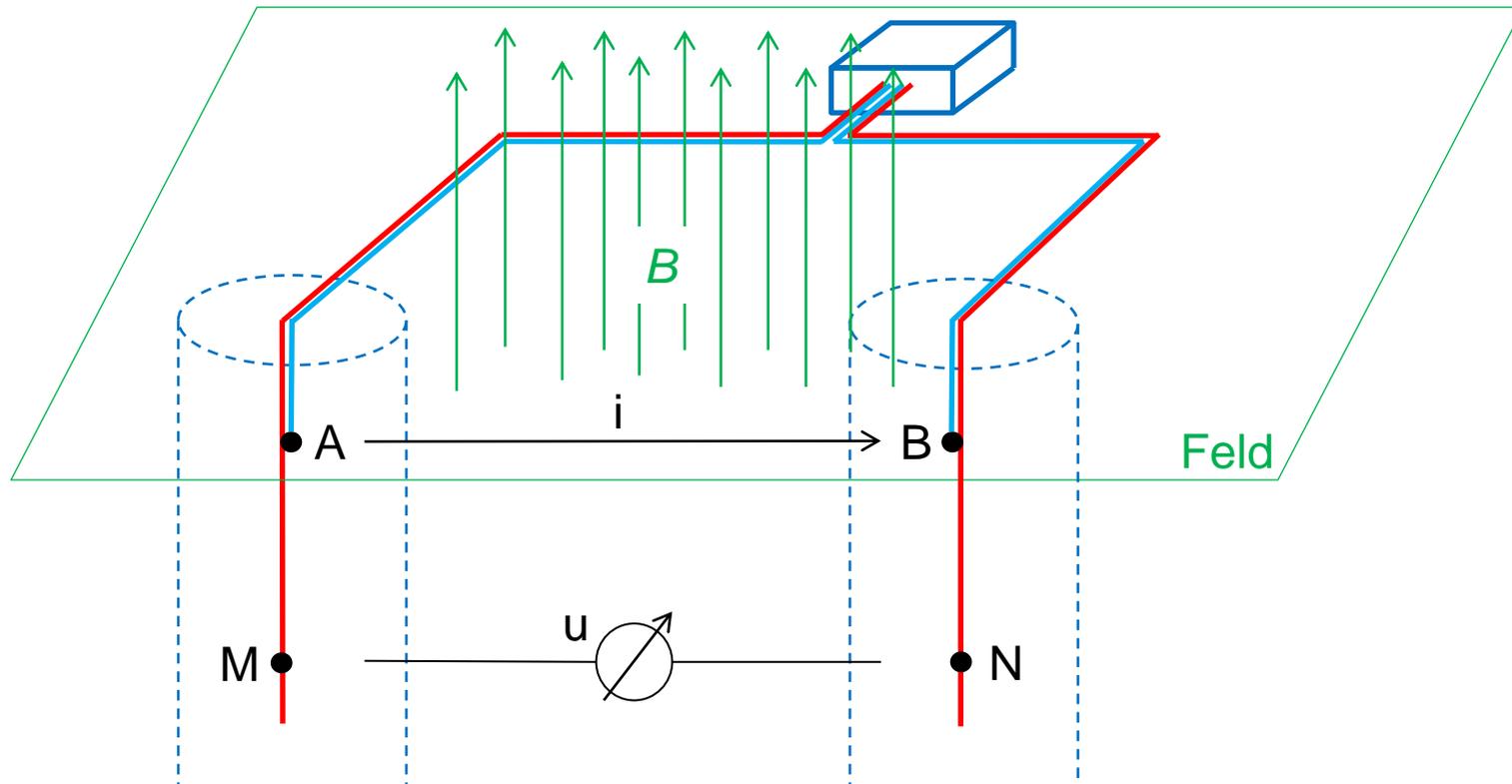
A, B: Stromelektrode  
 M, N: Spannungselektrode

— (blue) —: Doppelleitung für Stromeinspeisung  
 — (red) —: Doppelleitung für Spannungsmessung

1. Induktive Kopplung (schwach, wegen des relativ großen Abstandes)
2. Kapazitive Kopplung

# - Fallunterscheidungen bei der Feldmessung:

## 3. Sender und Empfänger in zwei Bohrlöchern (cross-hole)



A, B: Stromelektrode  
 M, N: Spannungselektrode

— (blue line) : Leitungen für Stromeinspeisung  
 — (red line) : Leitungen für Spannungsmessung

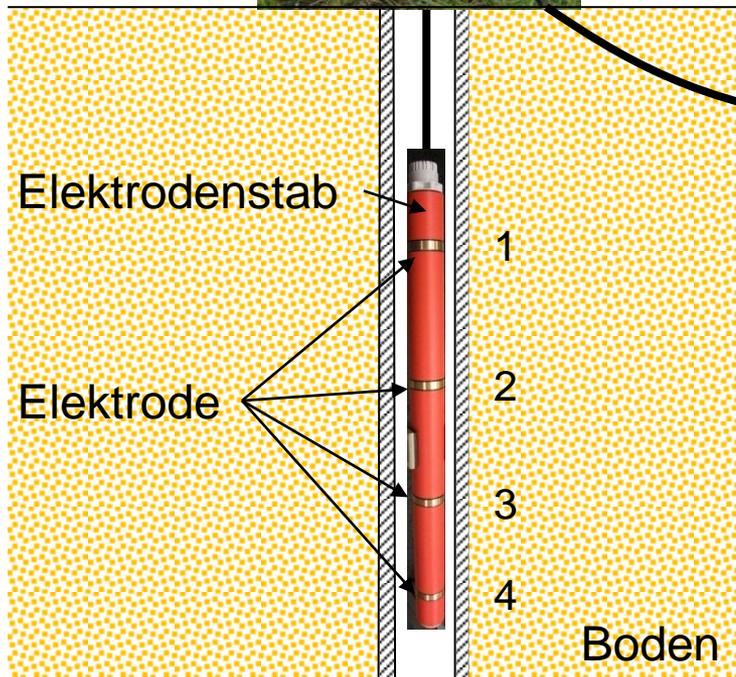
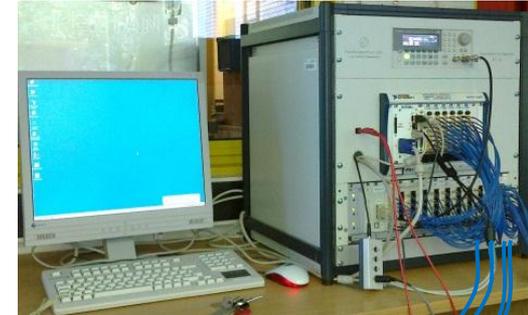
1. Induktive Kopplung (stark, zwei große überlagerte Schleifen)
2. Kapazitive Kopplung

# - Erste Testphase mit Elektrodenstab (Fall 1)



Bohrloch in Krauthausen

EIT40



Multicore-Kabel

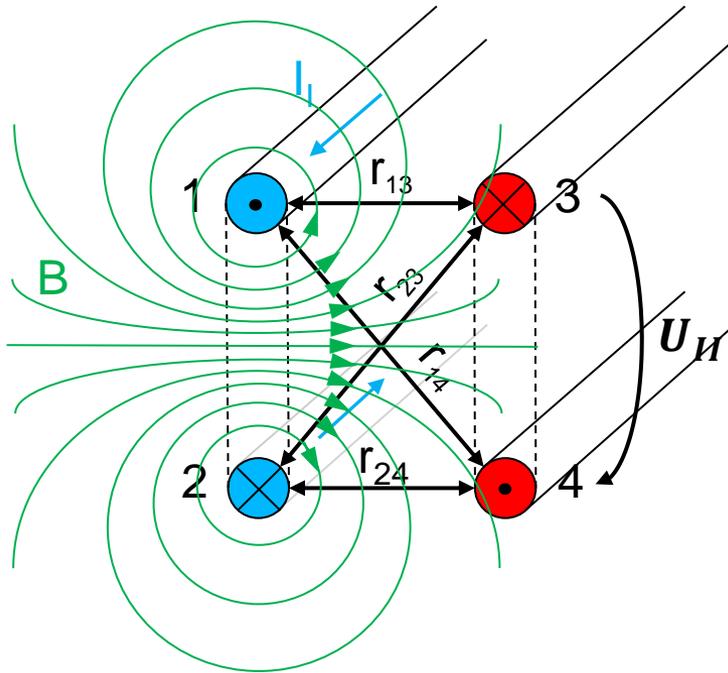
Adapterbox

**Modellierung und Korrektur der Messfehler verursacht durch:**

- die induktiven Kopplungseffekte im Kabel
- die kapazitive Last des Kabels
- die induktiven Effekte Kabel-Untergrund

# Vorgehensweise und Fortschritte

## - Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel



● : Doppelleitung I (Stromeinspeisung)    ● : Doppelleitung II (Potentialmessung)

→ : Einspeisestrom

→ : magnetische Feldlinie

Gegeninduktion zwischen zwei Doppelleitungen

Gegeninduktivität:

$$L_{II,I} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_{14} r_{23}}{r_{13} r_{24}} = L_{I,II} = M$$

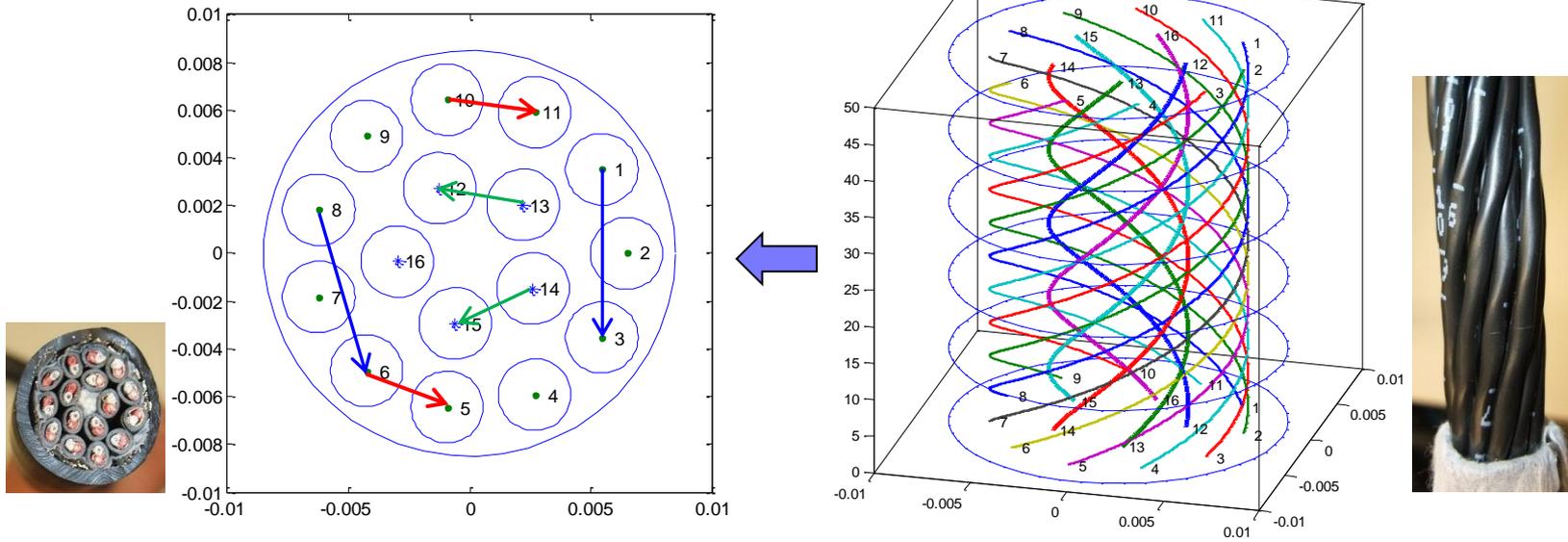
Berechnung der Spannungen:

$$U_{II}(\omega) = j\omega M(\omega) \cdot I_I(\omega)$$

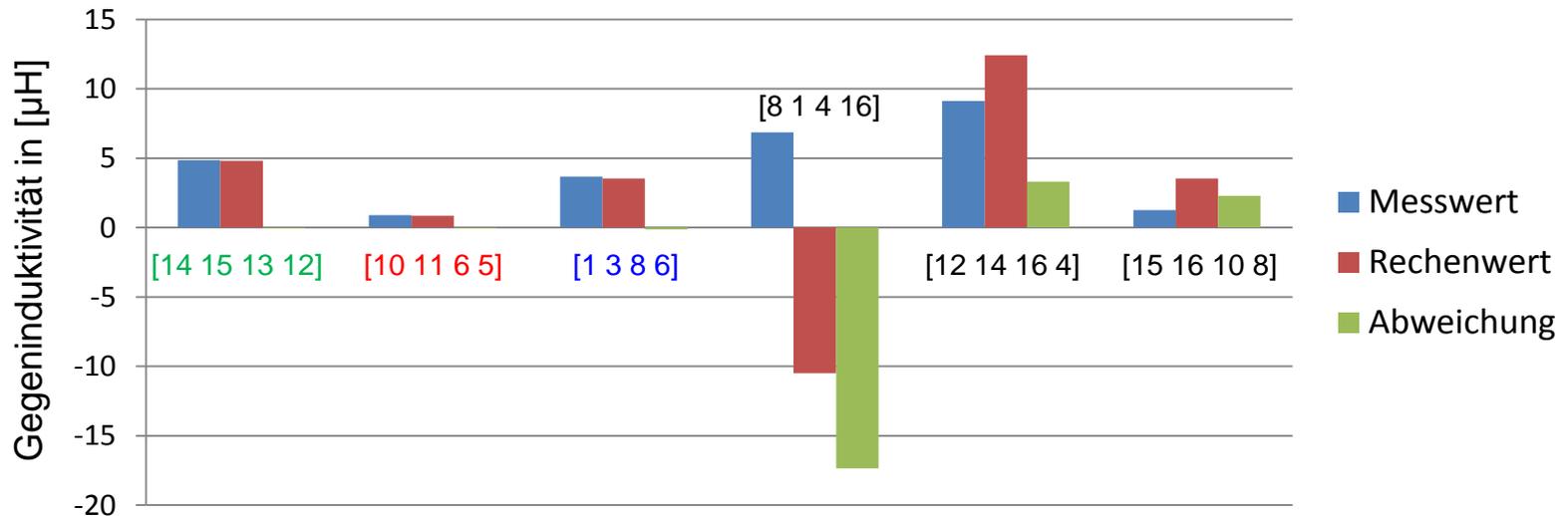
$$U_o(\omega) = Z_o(\omega) \cdot I_I(\omega)$$

$$\frac{U_M(\omega)}{I_I(\omega)} = Z_M = Z_o(\omega) + j\omega M(\omega)$$

# - Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel



Querschnitt und 3D-Ansicht vom Kabel



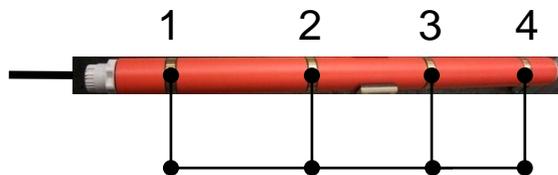
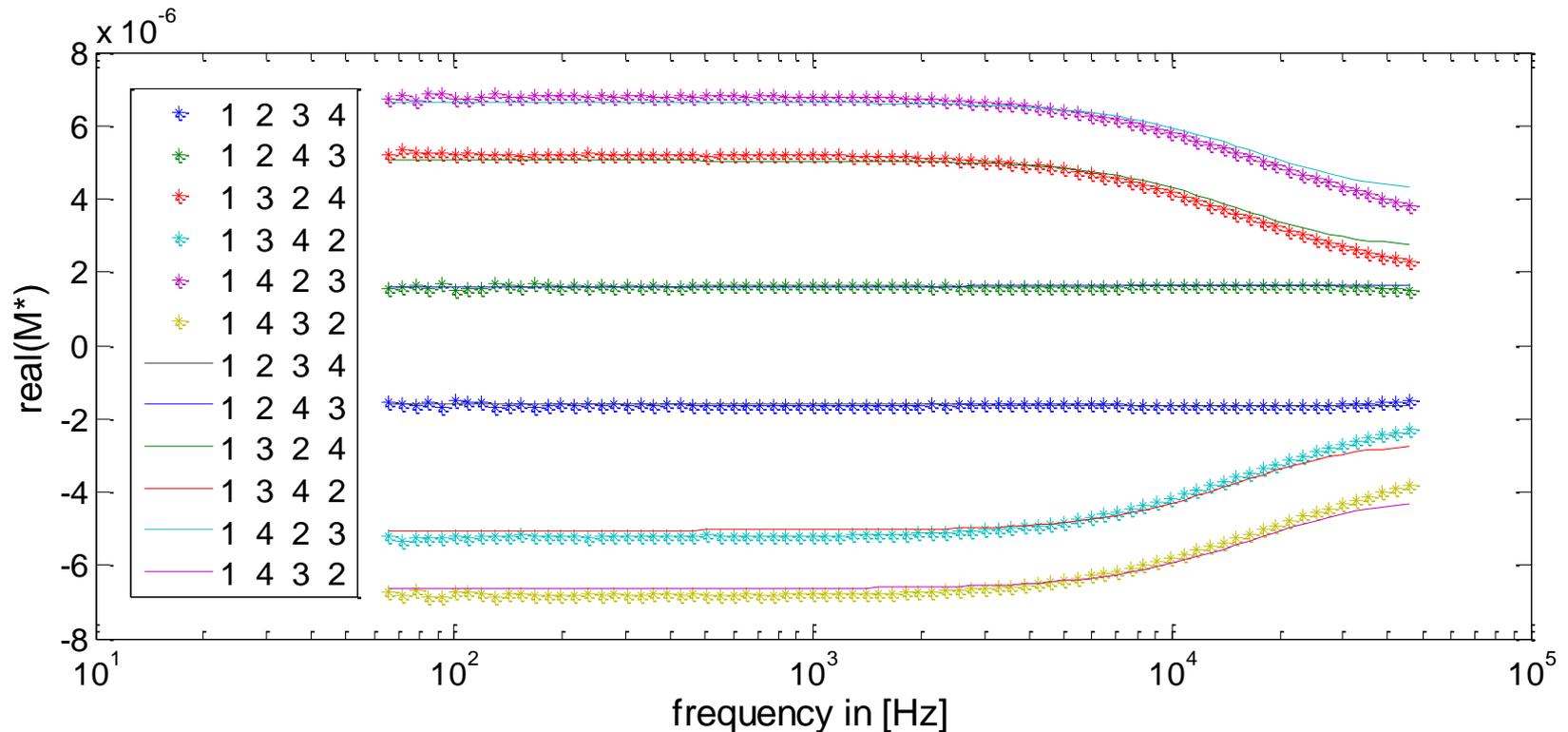
Vergleich der Labormessdaten ( $f \leq 1$  kHz, 50 m Kabel) und Rechenwerte

# - Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel

## - Kurvenanpassung der Frequenzabhängigkeit mit Cole-Cole

$$R + j\omega M = j\omega M^* \quad \Rightarrow \quad M^* = M - jR/\omega \quad \Rightarrow \quad M^* \text{ fitten mit Cole-Cole}$$

$$\varepsilon^* - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}} \quad \Rightarrow \quad M^* = \frac{M_{20} \cdot C_3}{1 + (j\omega C_2)^{1-C_1}} + M_{20} \cdot C_4$$

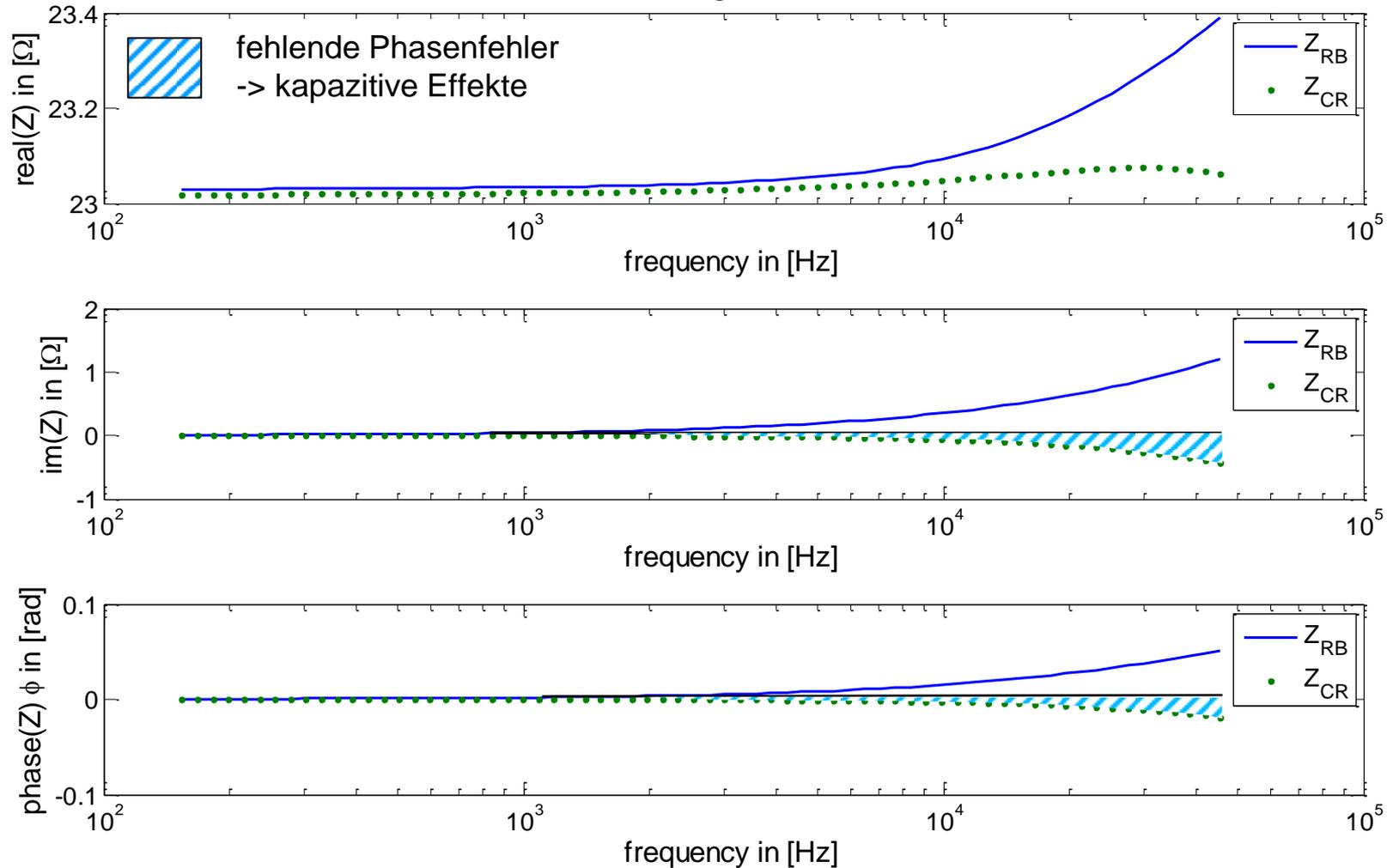


Kurzschlussmessung im Labor,  
Elektrodenstab mit 25 m Kabel

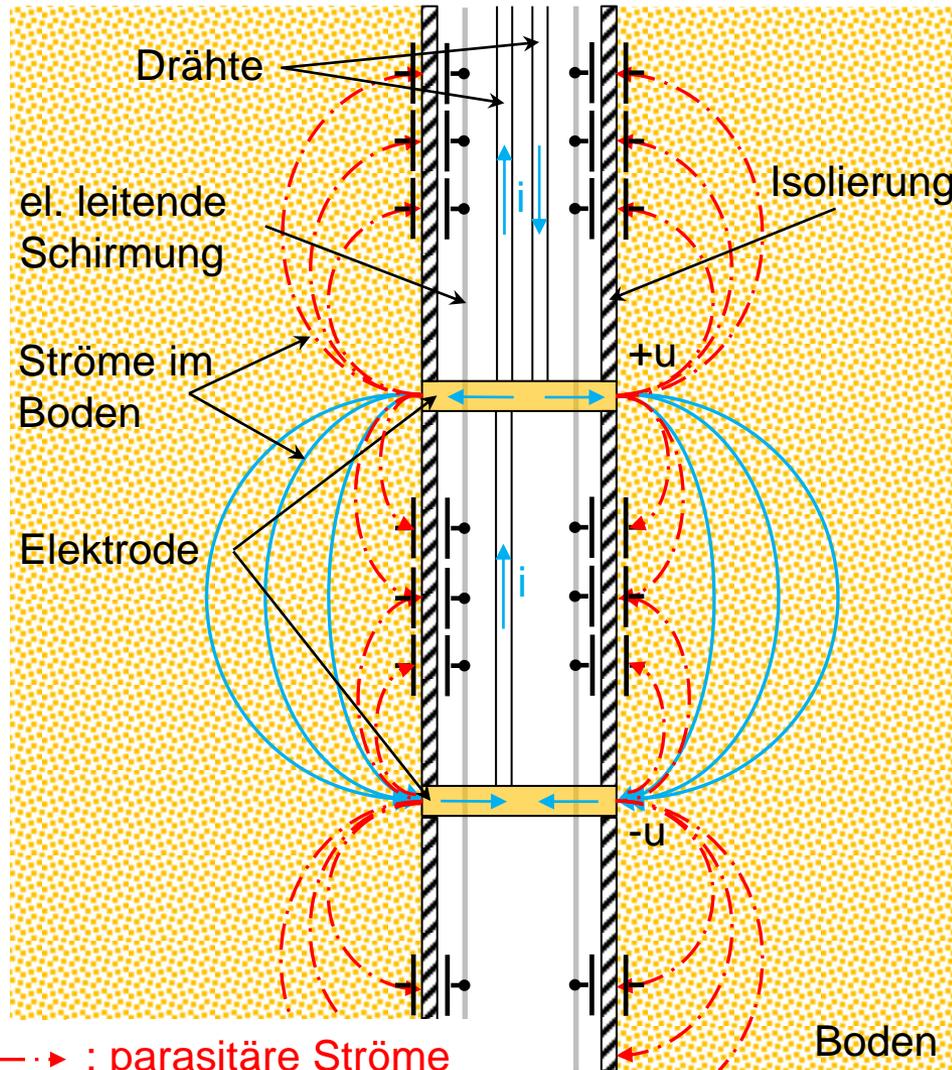
# - Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel

## - Abziehen der induktiven Effekte

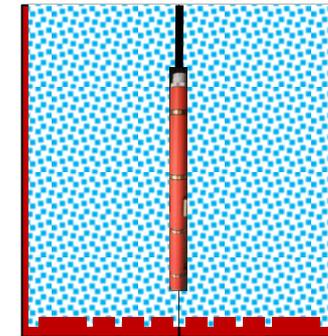
- $Z_{cr} = Z_M - j\omega M^*$  ( $Z_M$ : Messdaten aus der Regentonnenmessung)
- Ein Beispiel für die Konfiguration ABMN = 1 4 2 3



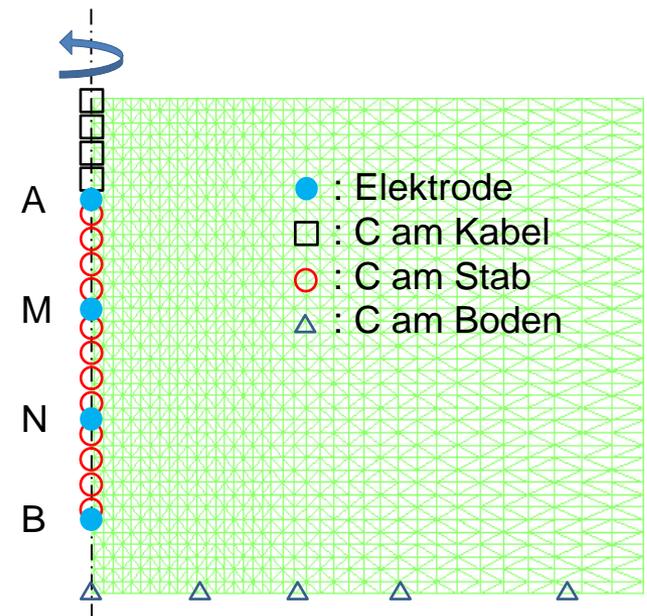
# - Modellierung der kapazitiven Effekte mit FEM



- -> : parasitäre Ströme  
—> : Einspeiseströme  
 : Kondensator



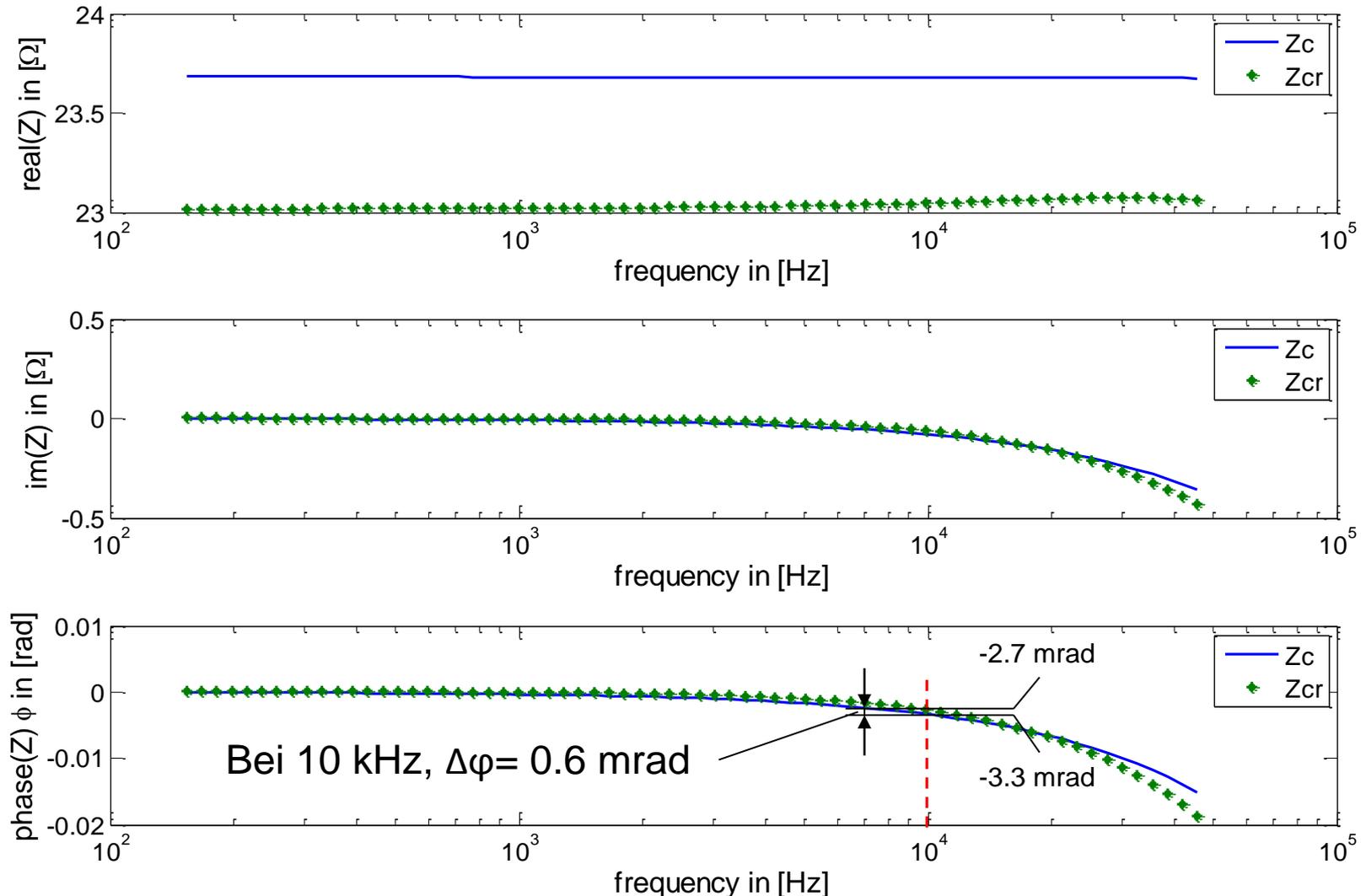
- Testmessung in der Regentonne
- $\rho_{\text{Leitungswasser}} = 30 \Omega\text{m}$



Integration der Kapazitäten im FEM-Netz

# - Modellierung der kapazitiven Effekte mit FEM

- Vergleich  $Z_{cr}$  und  $Z_c$  ( $Z_{cr} = Z_M - j\omega M^*$  und  $Z_c$ : modellierte Z)
- Für die Konfiguration ABMN = 1 4 2 3



## Zusammenfassung

- Phasenfehler verursacht durch induktive Kopplungseffekte im Kabel wurden korrigiert
- Kapazitive Effekte zwischen dem Elektrodenkabel und der Umgebung wurden in der FEM-Modellierung mit berücksichtigt
- Hohe Phasengenauigkeit von 0,6 mrad bei 10 kHz und  $Z = 23 \Omega$

## Ausblick

- Feldmessungen in Krauthausen
- Korrektur der Messfehler für die Bohrlochkette (8 Elektrode)
- Untersuchung und Modellierung der Phasenfehler wegen induktiver Effekte im System Kabel-Untergrund (Fall 2 und 3)

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Yulong Zhao: [y.zhao@fz-juelich.de](mailto:y.zhao@fz-juelich.de)  
08.03.2012, Hamburg

# Vorgehensweise und Fortschritte

## Modellierung der kapazitiven Effekte

- Integration der Kapazität im FEM-Netz

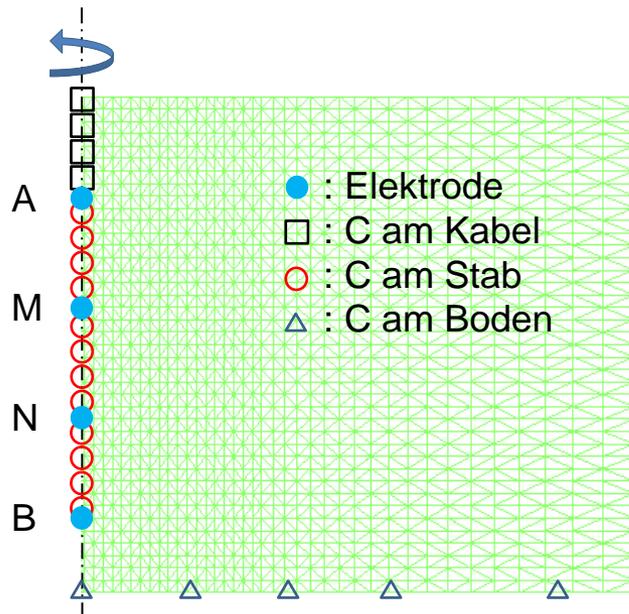
Für jeden Knoten wird Y mit C\* berechnet:  $Y_{C_{n,n}} = j\omega C_{n,n}^*$

$Y_C$ : Admittanzmatrix

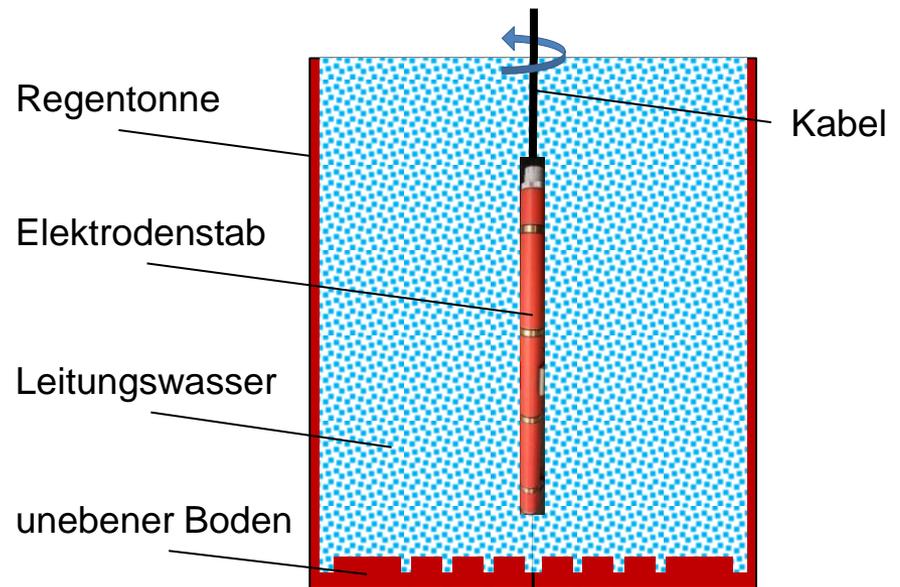
$$[Y_{C_{n,n}}] = \begin{bmatrix} Y_{C_{1,1}} & \cdots & 0 \\ \vdots & Y_{C_{x,x}} & \vdots \\ 0 & \cdots & Y_{C_{n,n}} \end{bmatrix}$$

Für die gesamte Admittanzmatrix gilt:  $[Y_G] = [Y_S] + [Y_{C_{n,n}}]$

Aus  $[Y_G] [U] = [I]$ , ergibt sich  $[U] = [Y_G]^{-1} [I] \rightarrow Z_{M,N} = U_{M,N}/I$



Integration der Kapazitäten im FEM-Netz



Messungsaufbau in der Regentonne

# Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel

- Abziehen der induktiven Effekte

- $Z_{cr} = Z_M - j\omega M^*$
- Ein Beispiel für die Konfiguration ABMN = 1 4 2 3

