



Numerische Modellierung der elektromagnetischen Kopplungseffekte zur Phasenkorrektur von EIT-Bohrlochmessungen

Y Zhao¹, E Zimmermann¹, J A Huisman², A Treichel², S van Waasen¹, A Kemna³

¹ Zentralinstitut für Elektronik (ZEL), Forschungszentrum Jülich GmbH

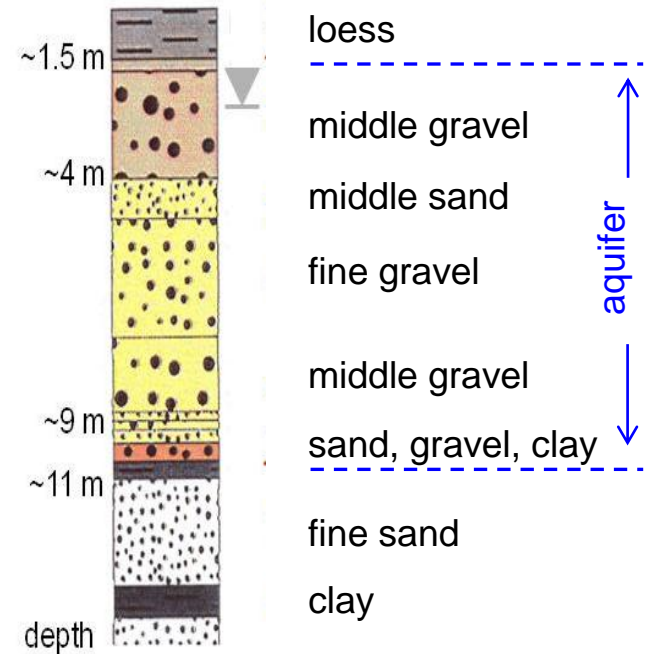
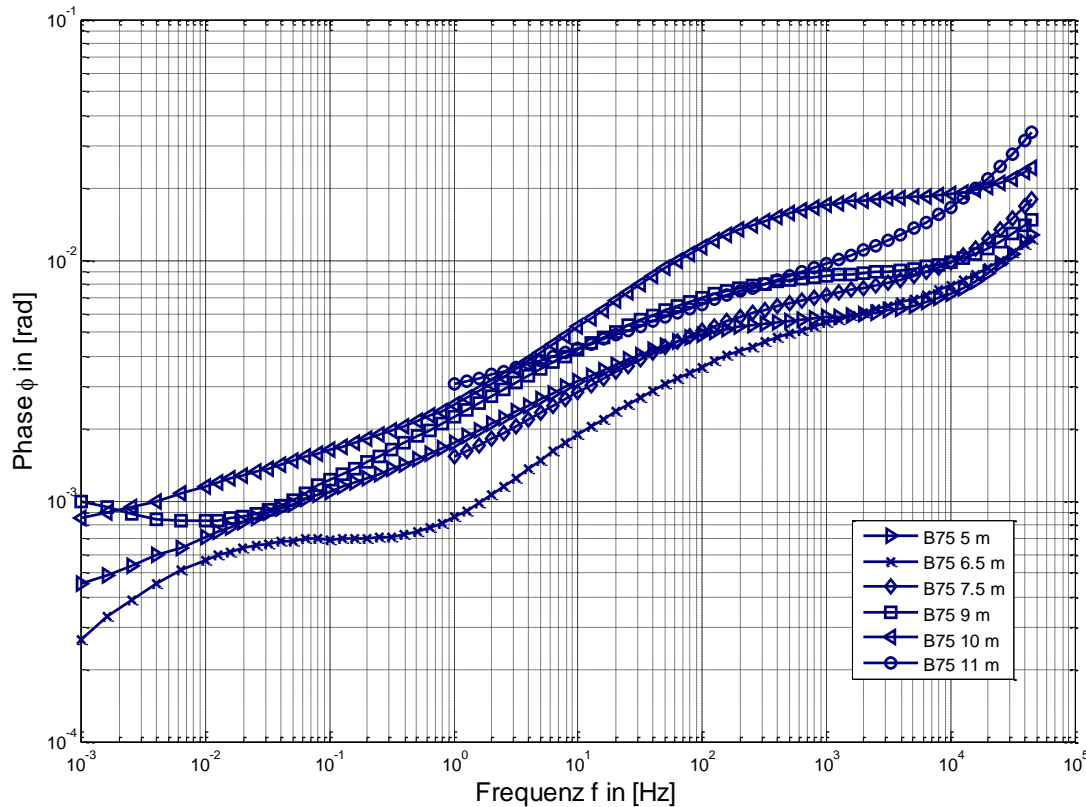
² Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3), Forschungszentrum Jülich GmbH

³ 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

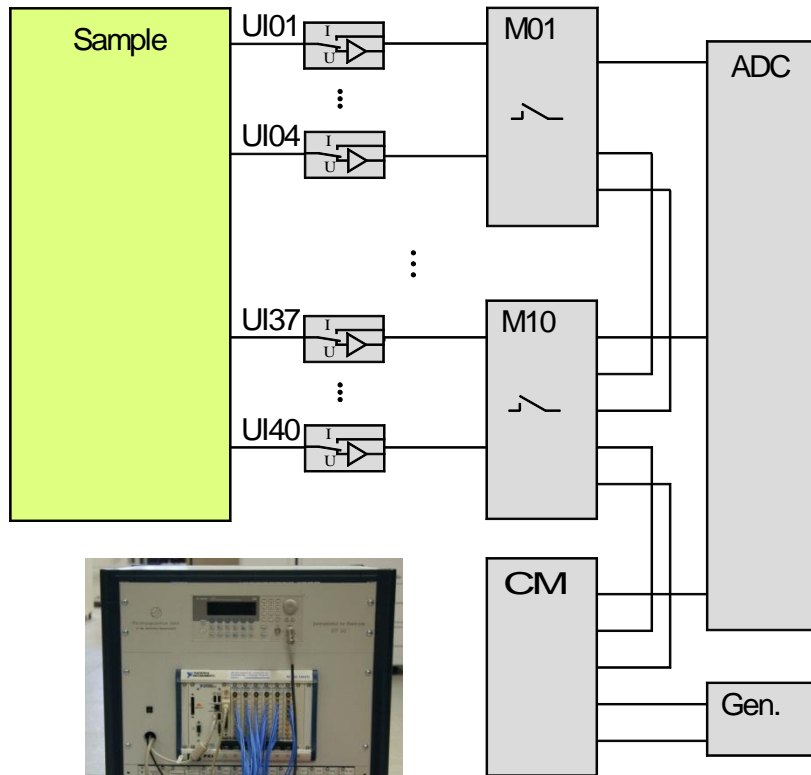


Gemessene Phasen der Bodenproben aus Krauthausen

- Ausgangssituation und Ziel

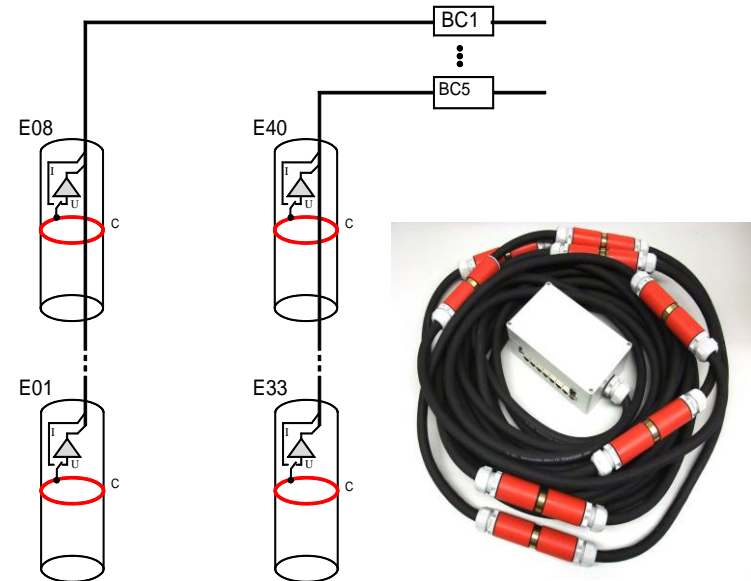
EIT40

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



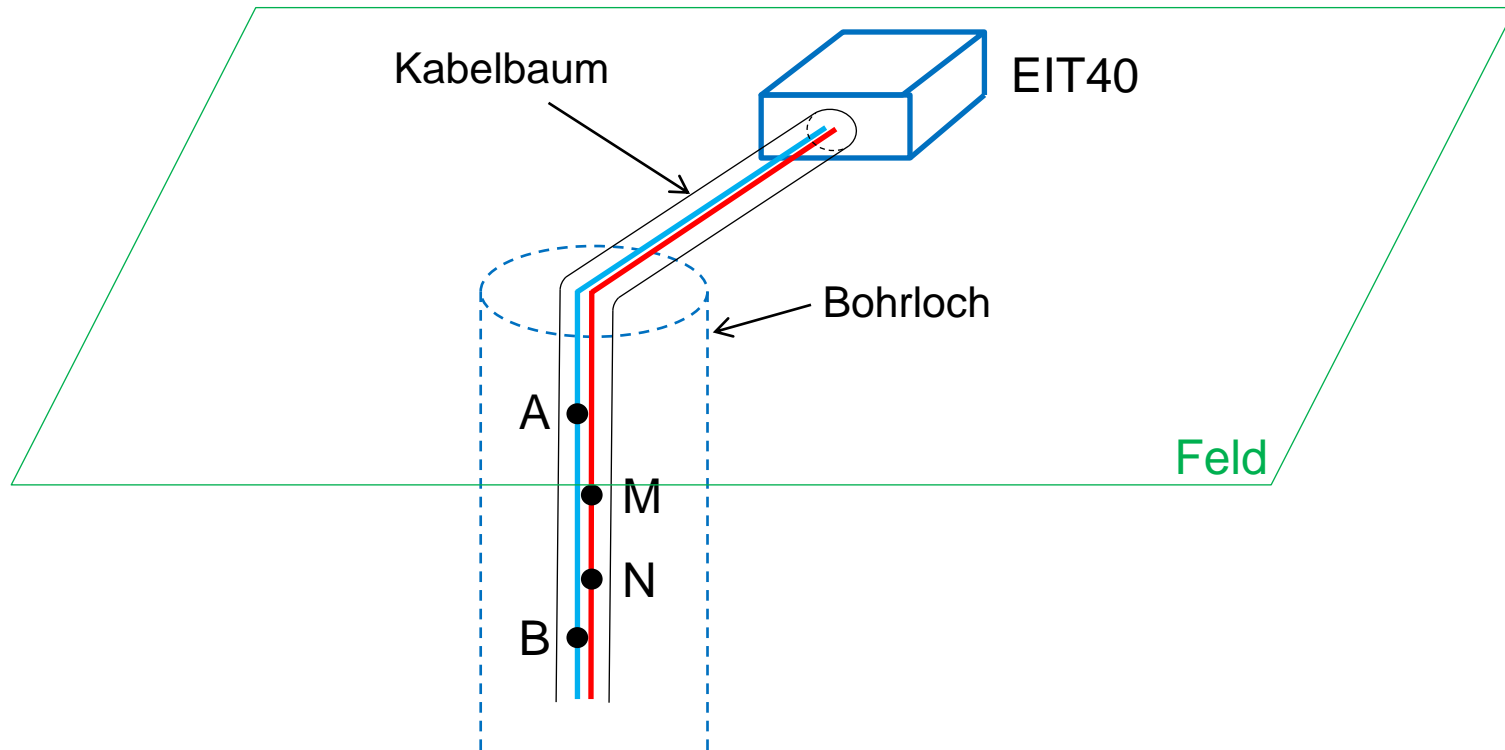
EIT40-Bohrlochmesssystem

- 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

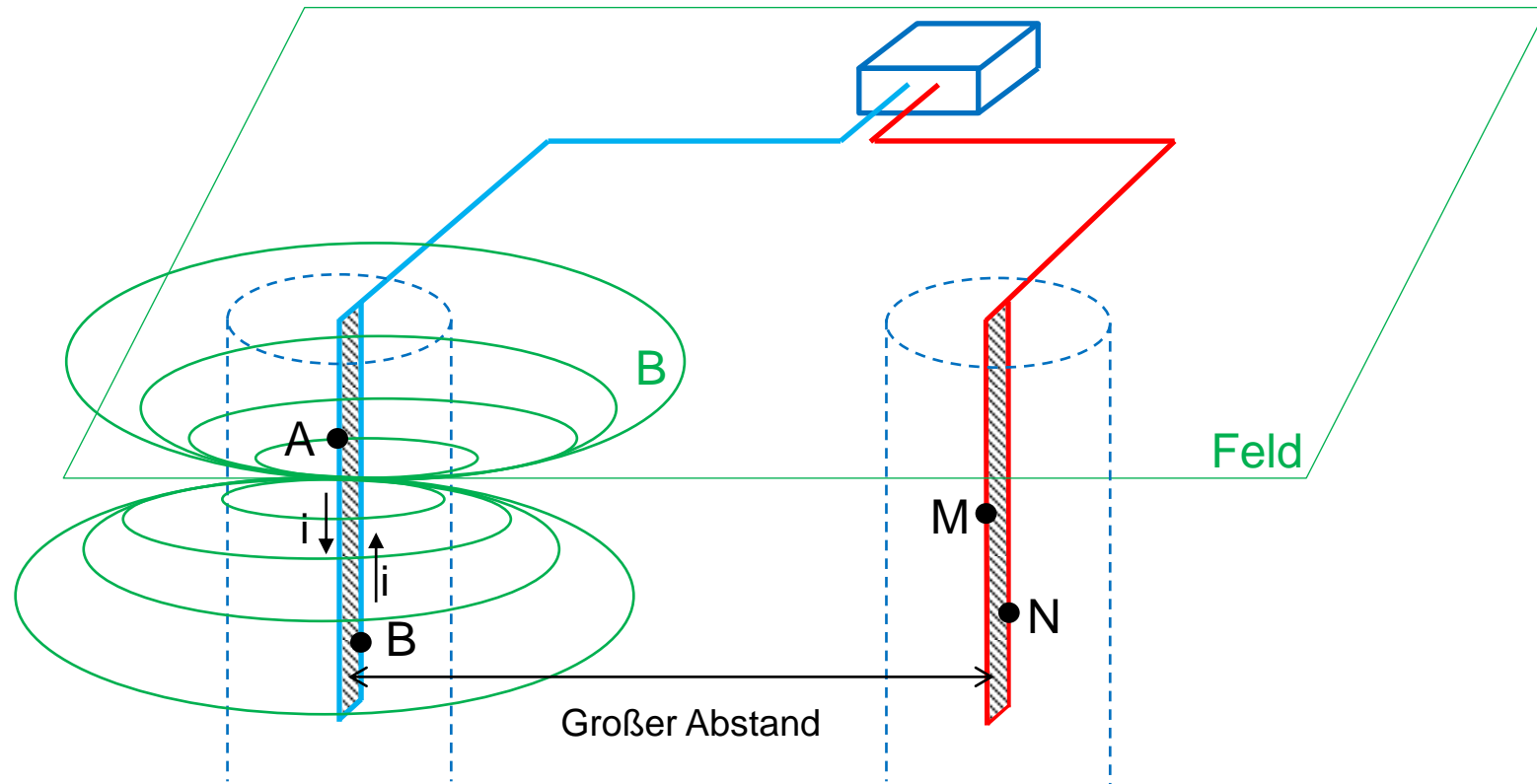
—: Doppelleitung für Stromeinspeisung

—: 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



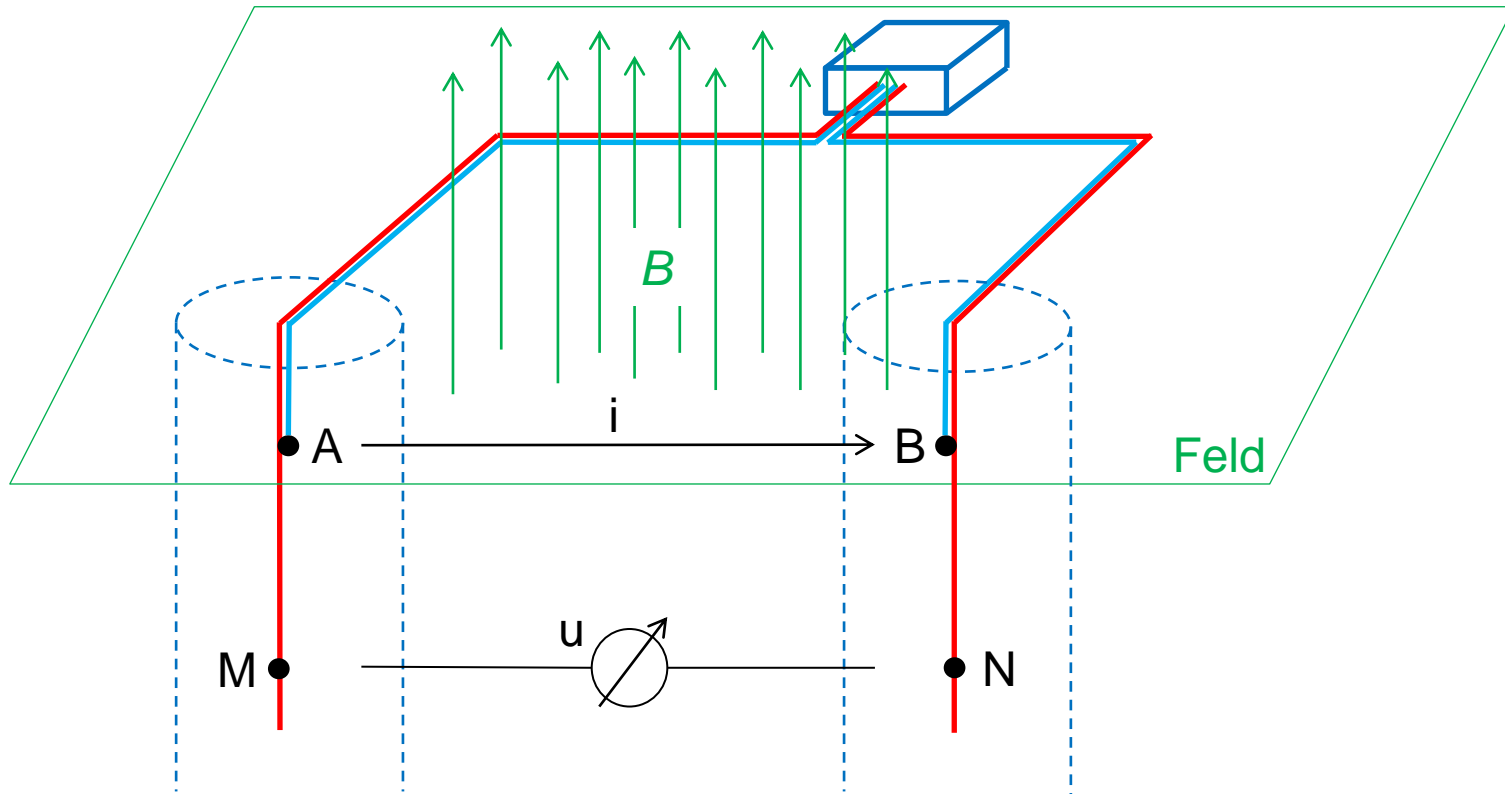
A, B: Stromelektrode
 M, N: Spannungselektrode

—: Doppelleitung für Stromeinspeisung
 —: 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

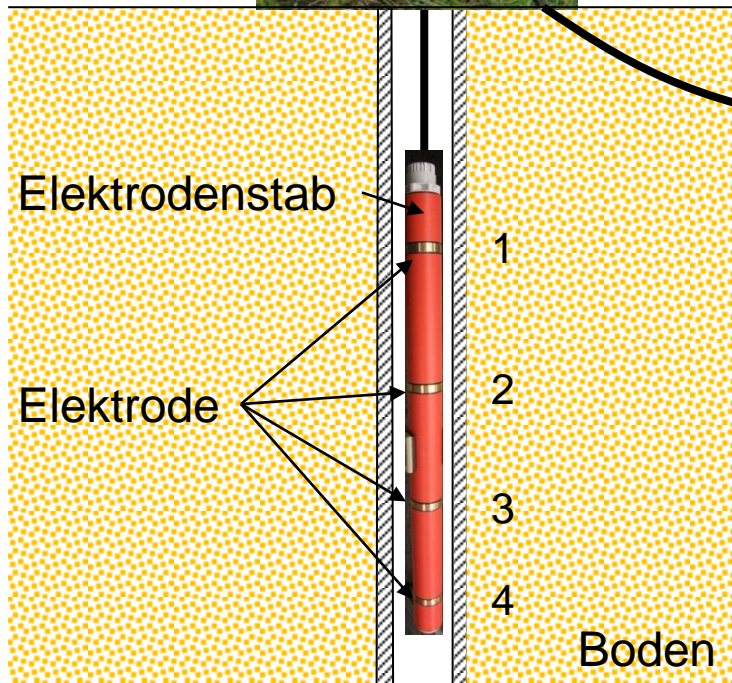
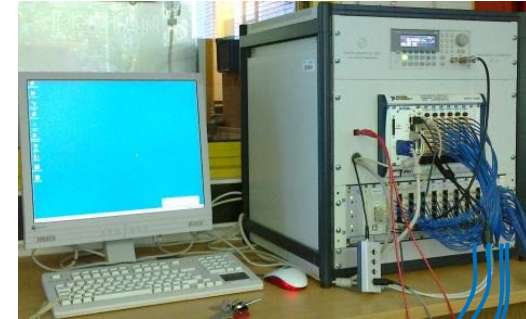
1. Induktive Kopplung (stark, zwei große überlagerte Schleifen)
2. Kapazitive Kopplung

- Erste Testphase mit Elektrodenstab (Fall 1)



Bohrloch in Krauthausen

EIT40



Multicore-Kabel

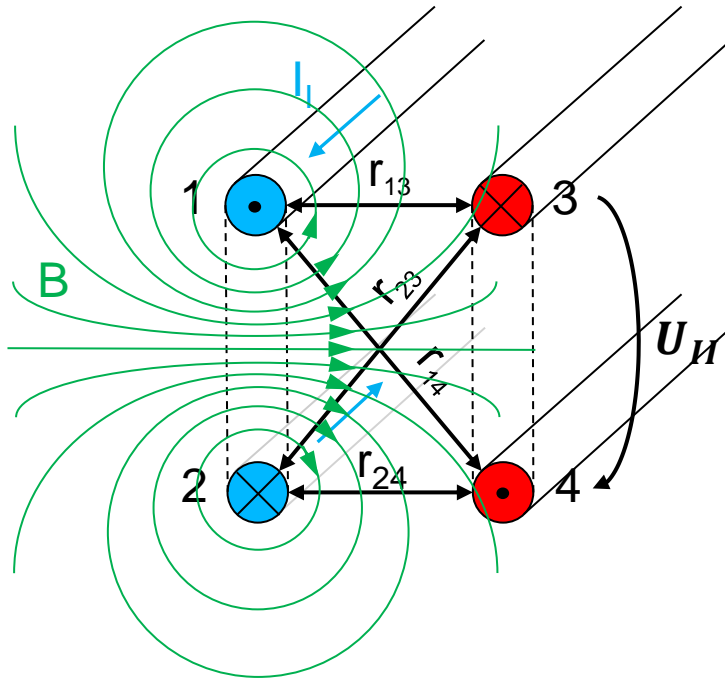
Adapterbox

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:

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

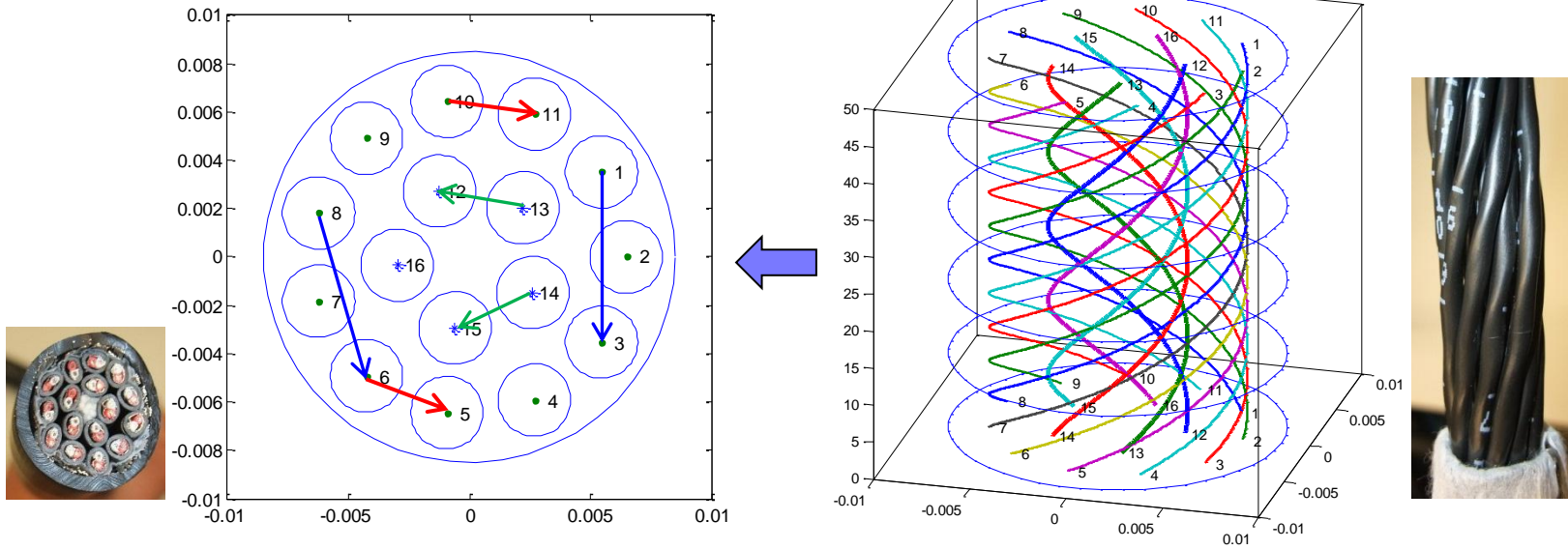
Berechnung der Spannungen:

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

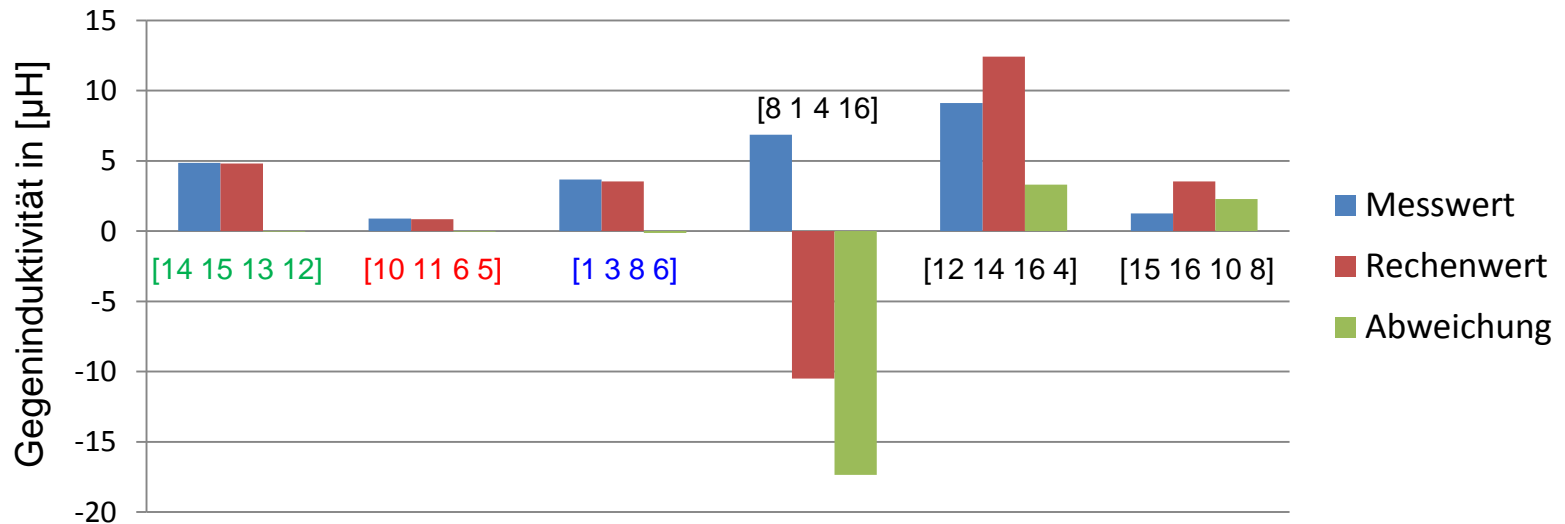
$$U_o(\omega) = Z_o(\omega) \cdot I_I(\omega)$$

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

- Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel



Querschnitt und 3D-Ansicht vom Kabel



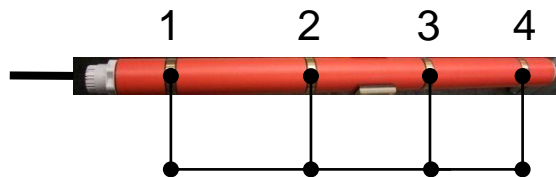
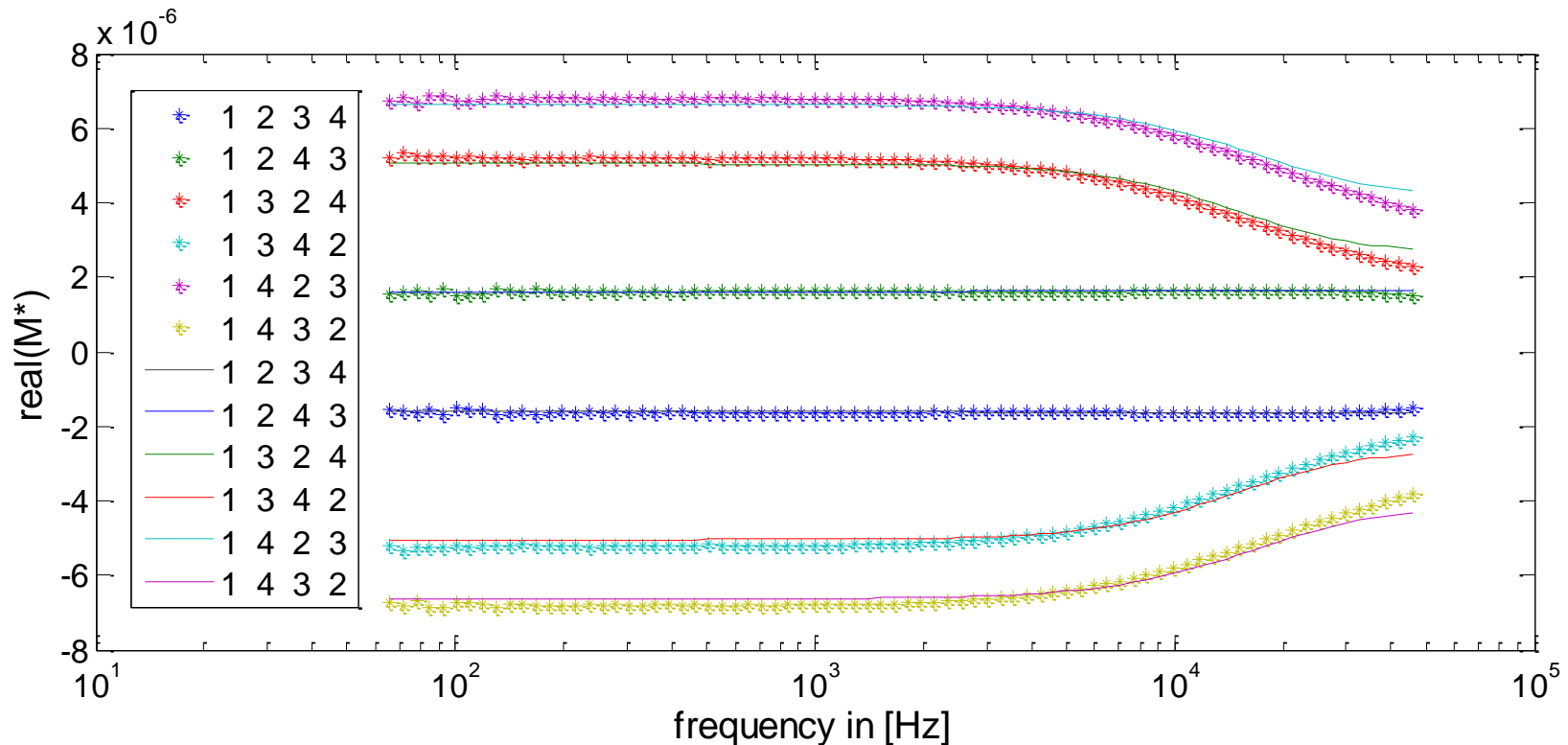
Vergleich der Labormessdaten ($f \leq 1$ kHz, 50 m Kabel) und Rechenwerte

- Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel

- Kurvenanpassung der Frequenzabhängigkeit mit Cole-Cole

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

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

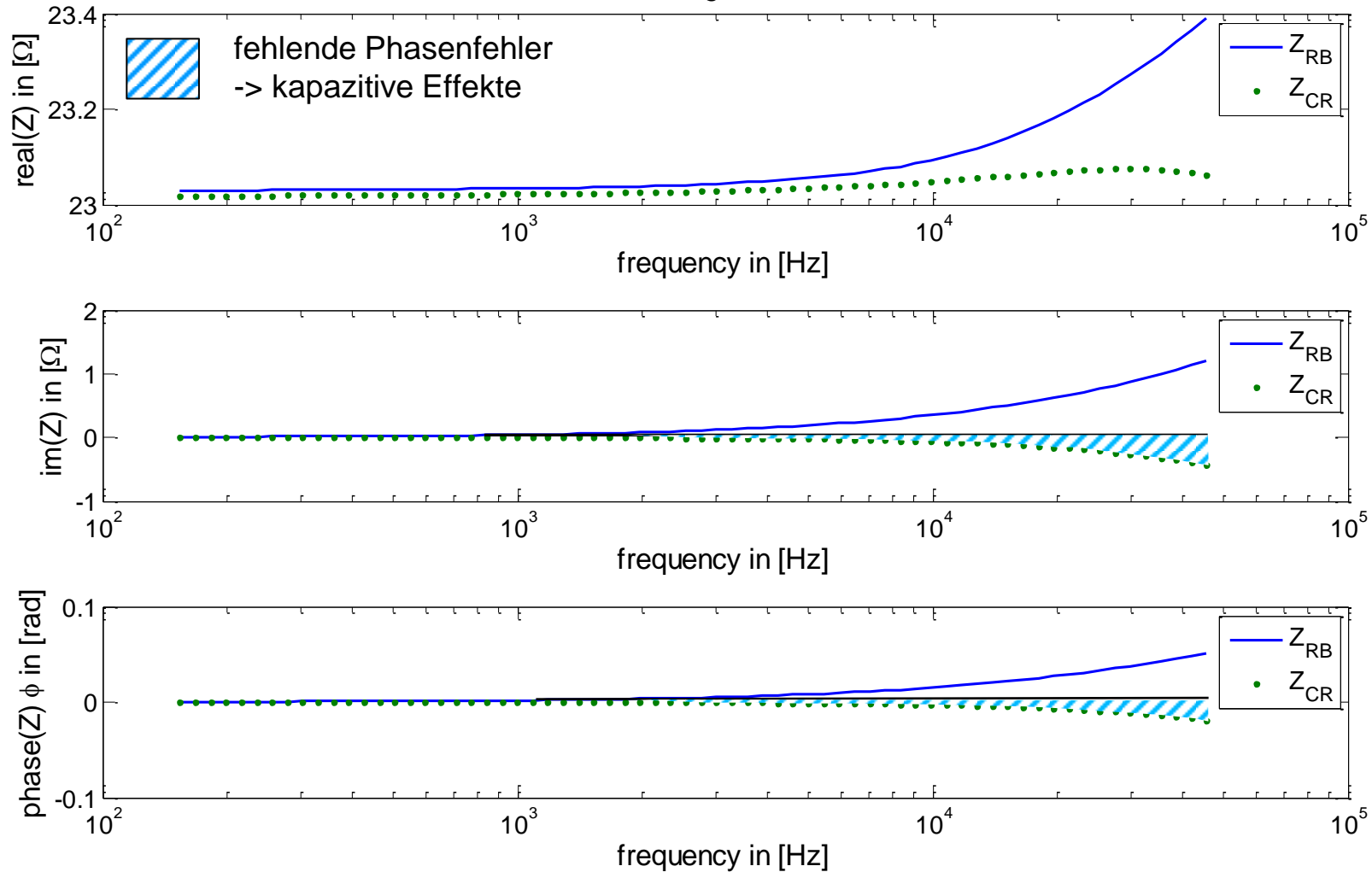


Kurzschlussmessung im Labor,
Elektrodenstab mit 25 m Kabel

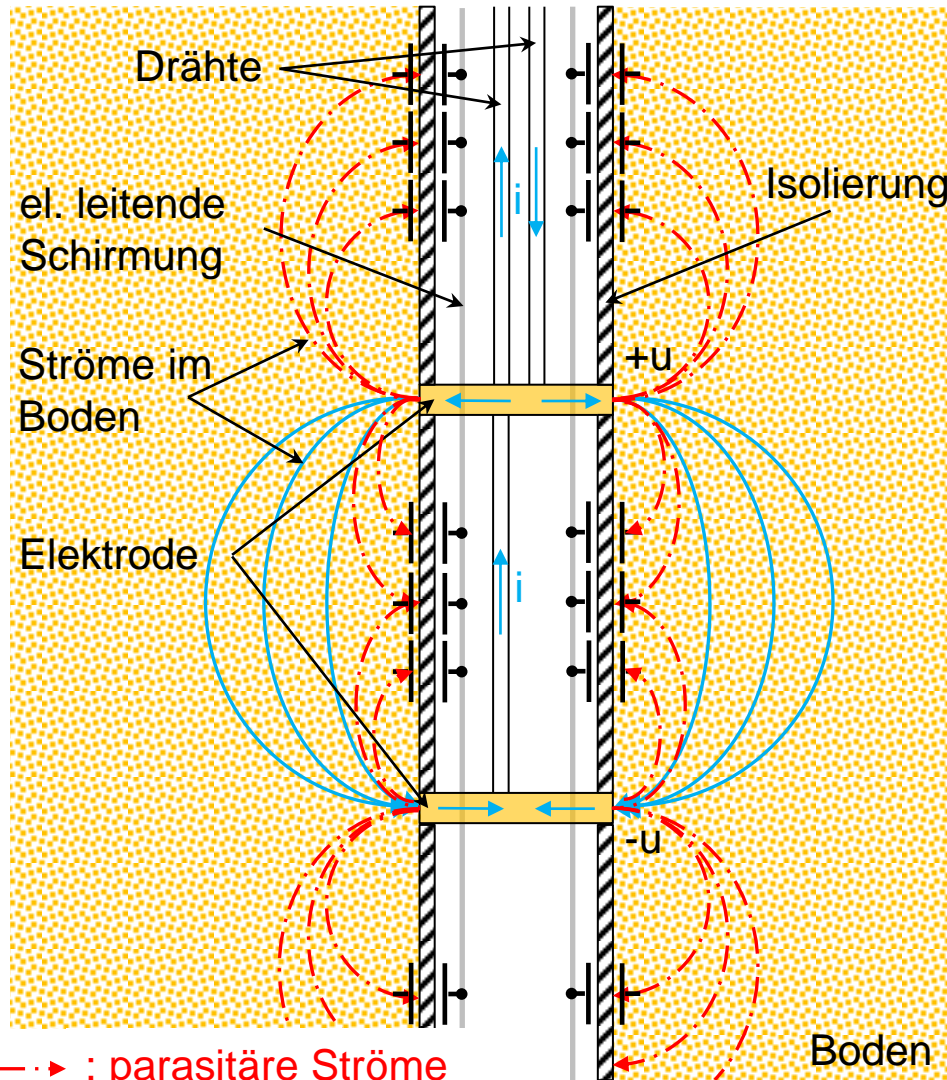
- Modellierung der induktiven Kopplungseffekte im Kabel

- Abziehen der induktiven Effekte

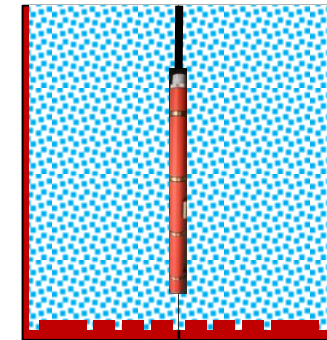
- $Z_{cr} = Z_M - j\omega M^*$ (Z_M : Messdaten aus der Regentonnenmessung)
- Ein Beispiel für die Konfiguration ABMN = 1 4 2 3



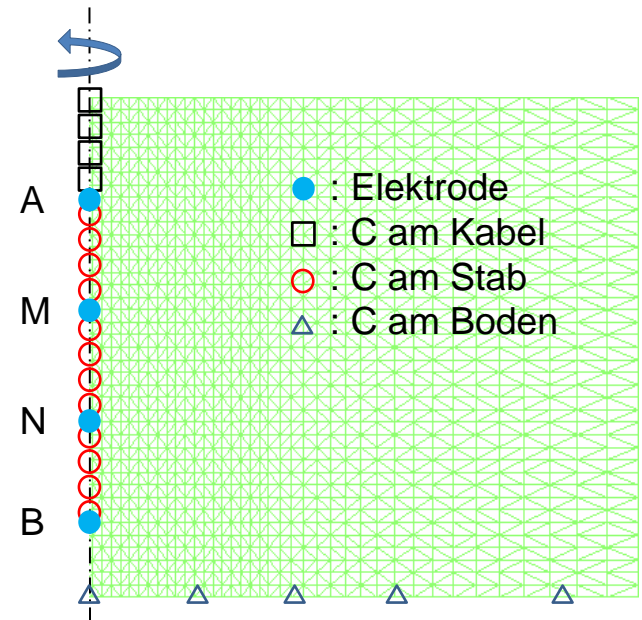
- Modellierung der kapazitiven Effekte mit FEM



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



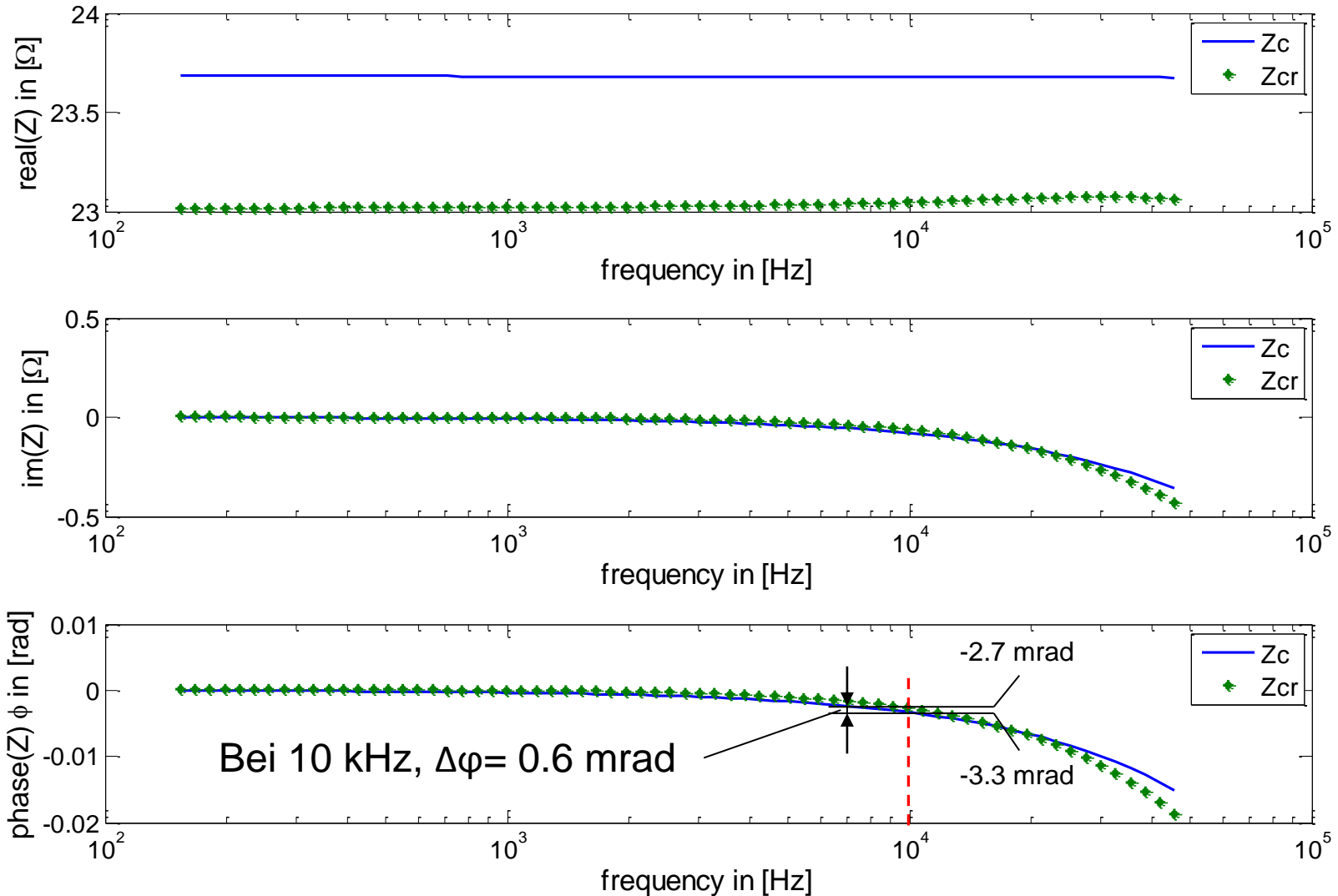
- Testmessung in der Regentonne
- $\rho_{\text{Leitungswasser}} = 30 \Omega\text{m}$



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
08.03.2012, Hamburg

Vorgehensweise und Fortschritte

Modellierung der kapazitiven Effekte

- Integration der Kapazität im FEM-Netz

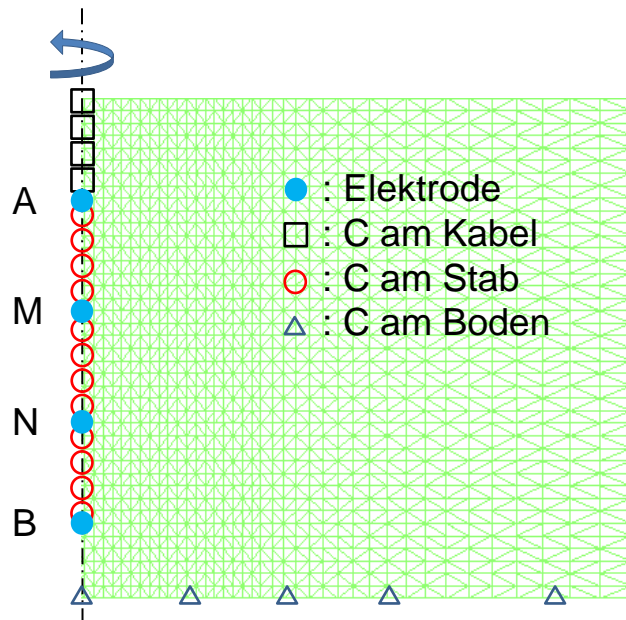
Für jeden Knoten wird Y mit C* berechnet: $Y_{C_{n,n}} = j\omega C_{n,n}^*$

Y_C : Admittanzmatrix

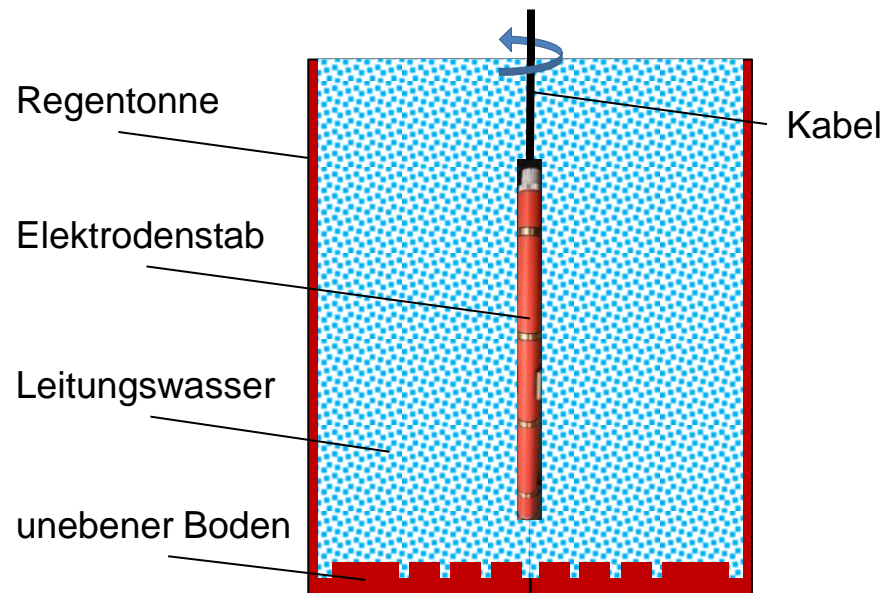
$$[Y_{C_{n,n}}] = \begin{bmatrix} Y_{C_{1,1}} & \cdots & 0 \\ \vdots & Y_{C_{x,x}} & \vdots \\ 0 & \cdots & Y_{C_{n,n}} \end{bmatrix}$$

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

