

Remote-Reference-Strategien zur Rauschunterdrückung bei Messungen der Oberflächen- Nuklearmagnetischen Resonanz (SNMR)

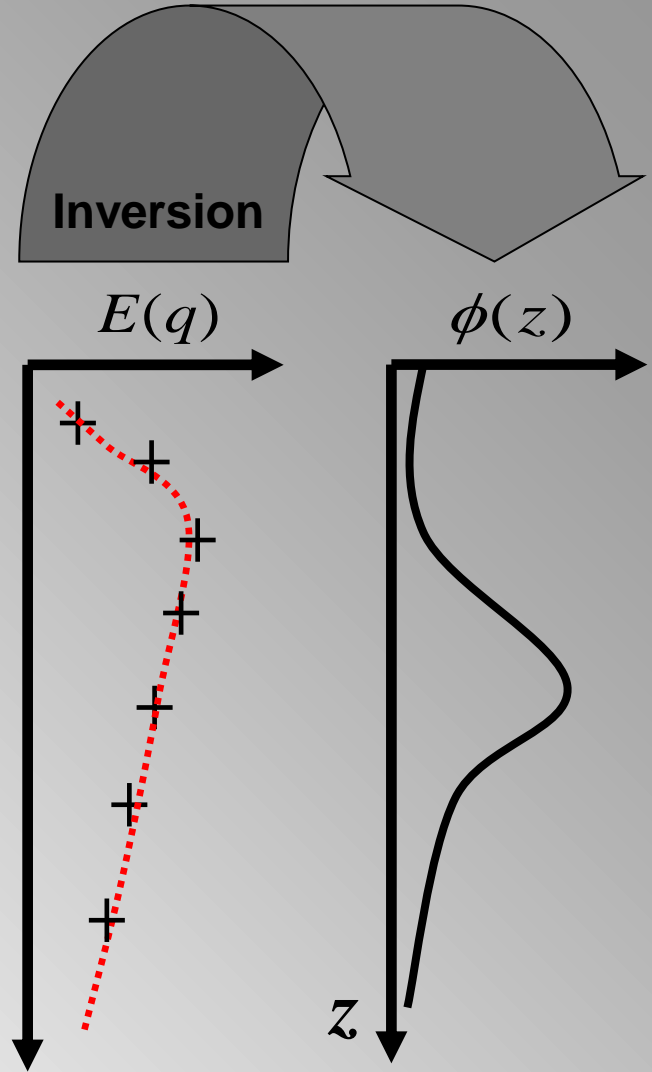
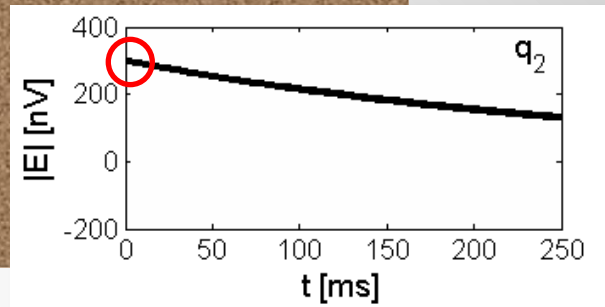
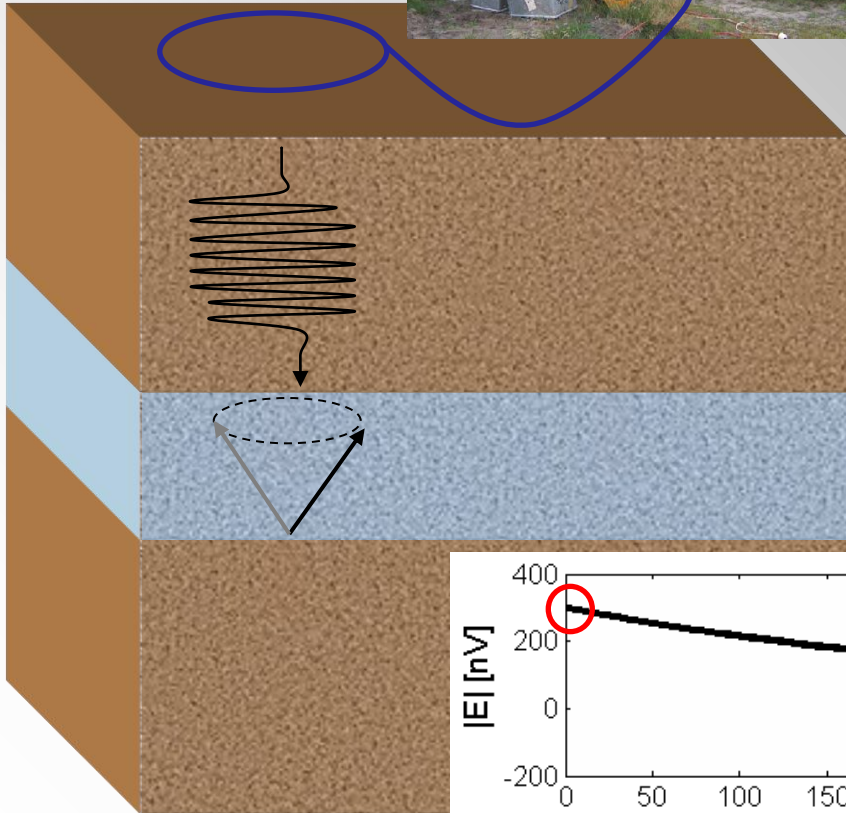
Stephan Costabel¹, Mike Müller-Petke²

¹Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,
Fachbereich Geophysikalische Erkundung – Ressourcen und Oberflächenprozesse

²Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Sektion Gesteinsphysik und Bohrlochgeophysik

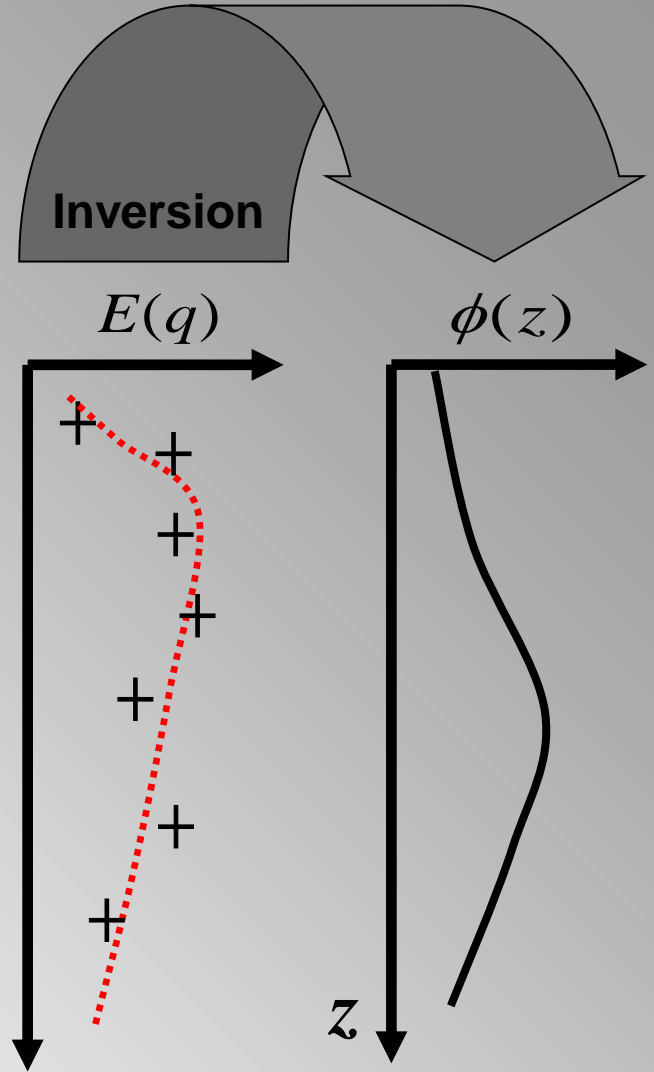
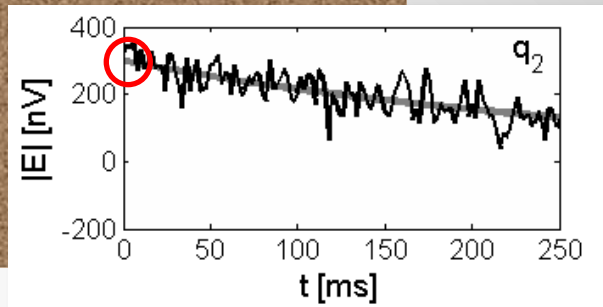
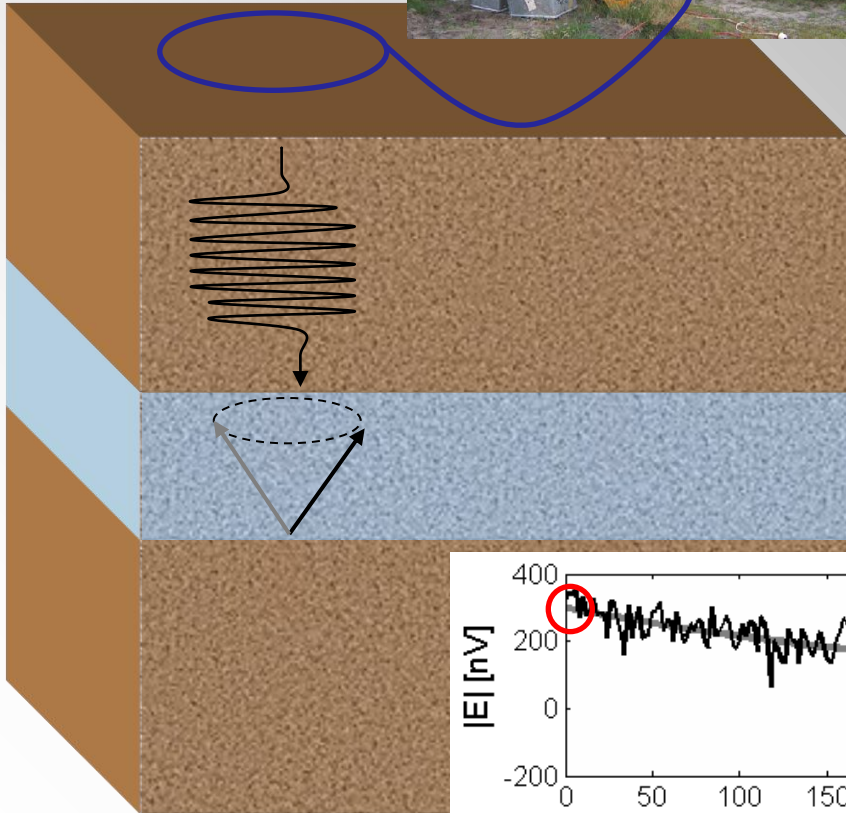
Grundlagen des Surface NMR Verfahrens

Messspule



Grundlagen des Surface NMR Verfahrens

Messspule

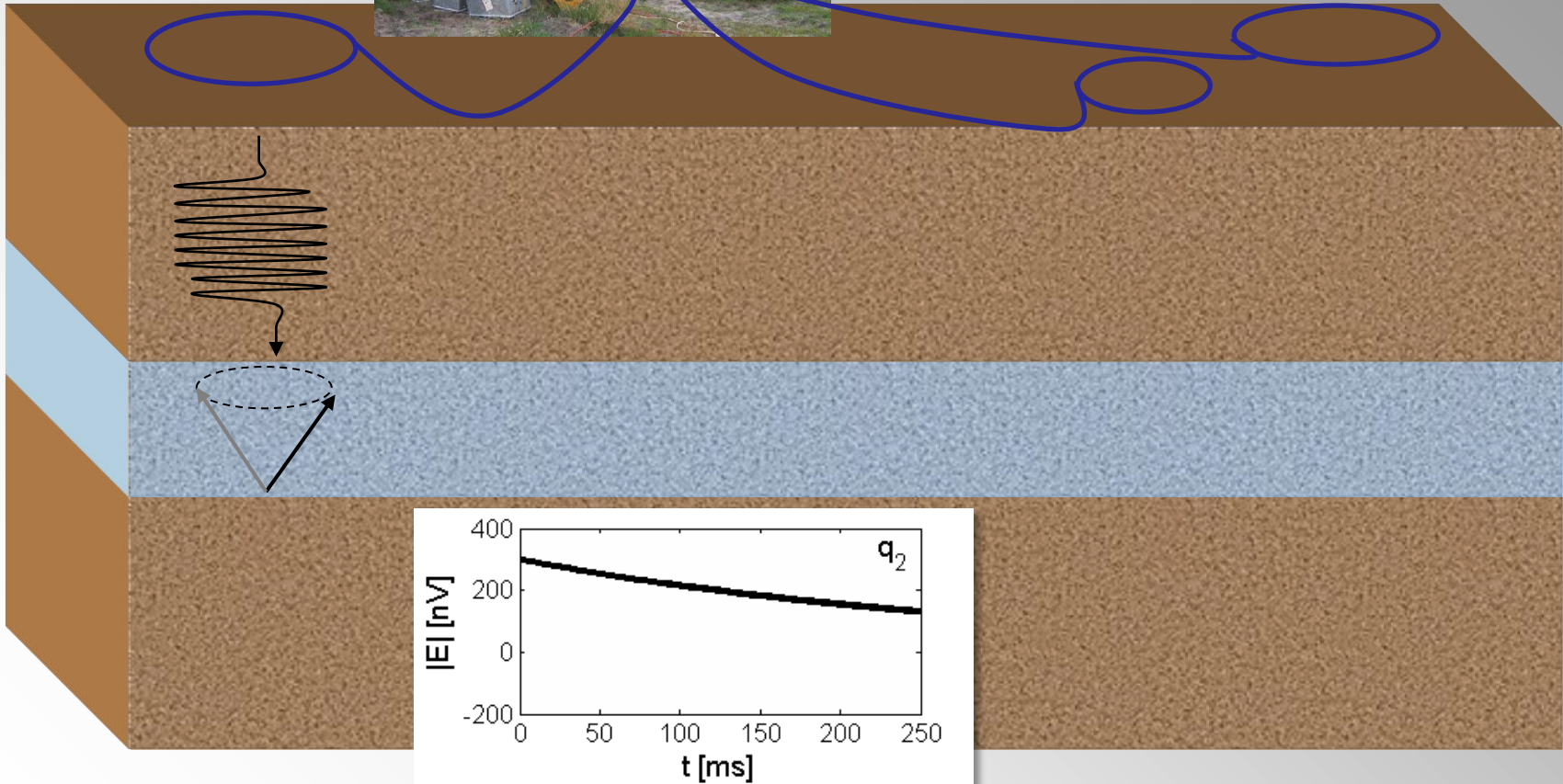


Grundlagen des Surface NMR Verfahrens


Messspule

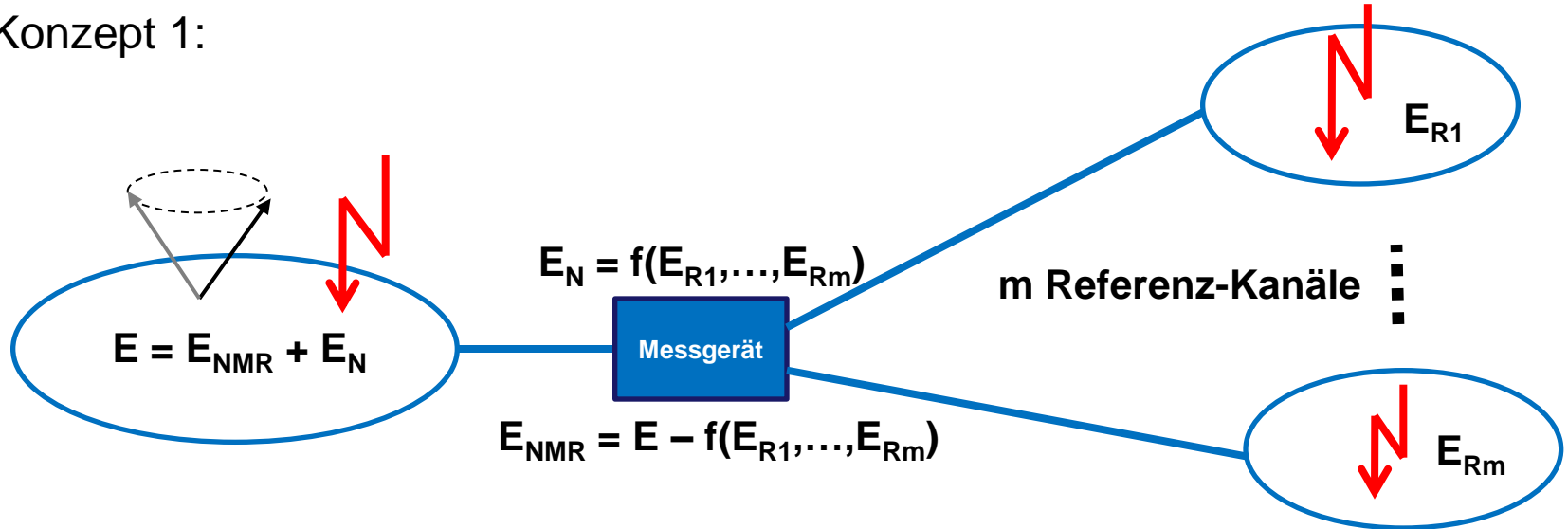



Referenzspulen

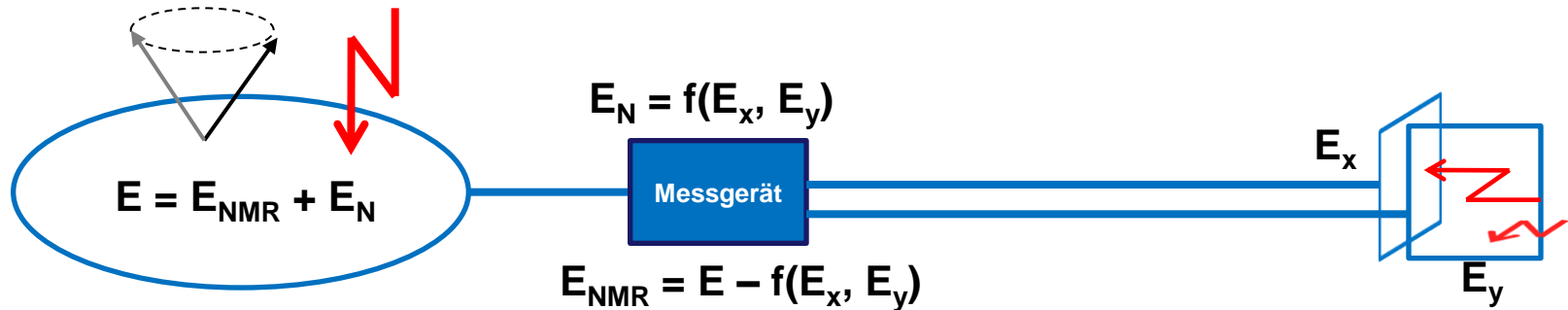


Grundlagen der Remote-Referenz Technik

- Konzept 1:



- Konzept 2:



Grundlagen der Remote-Referenz Technik

- Ansätze aus **MT** (Gamble et al., 1979, Goubau et al., 1984), **TEM** (Spies, 1988) und **Feld-SIP** (Radic, 2007)
- Formulierung im Zeitbereich:

$$e_N(t) = \sum_m e_{Rm}(t) * tf_{Rm}(t)$$

- Formulierung im Frequenzbereich:

$$E_N(\omega) = \sum_m E_{Rm}(\omega) \cdot T_{Rm}(\omega)$$

- Multiplikation mit E_k^* für $k=1, \dots, m$:

$$[E_N, E_k^*] = \sum_m [E_m, E_k^*] \cdot T_{Rm}$$

- Summation über n Wiederholungen, Skalarprodukt:

$$[E_i, E_j^*] = \sum_{l=1}^n E_i^l E_j^{l*}$$

„Cross-power spectrum“

$$|E_i|^2 = [E_i, E_i^*] = \sum_{l=1}^n E_i^l E_i^{l*}$$

„Auto-power spectrum“

Grundlagen der Remote-Referenz Technik

- Gl.-system:

$$\begin{bmatrix} [E, E_{R1}^*] \\ \vdots \\ [E, E_{Rk}^*] \\ \vdots \\ [E, E_{Rm}^*] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_{R1}|^2 & \dots & [E_{Rm}, E_{R1}^*] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [E_{R1}, E_{Rk}^*] & \dots & |E_{Rk}|^2 & \dots & [E_{Rm}, E_{Rk}^*] \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ [E_{R1}, E_{Rm}^*] & \dots & & & |E_{Rm}|^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{R1} \\ \vdots \\ T_{Rk} \\ \vdots \\ T_{Rm} \end{bmatrix}$$

- Vereinfachungen, 1 Referenzkanal:

$$T_R = \frac{[E_N, E_R^*]}{|E_R|^2}$$

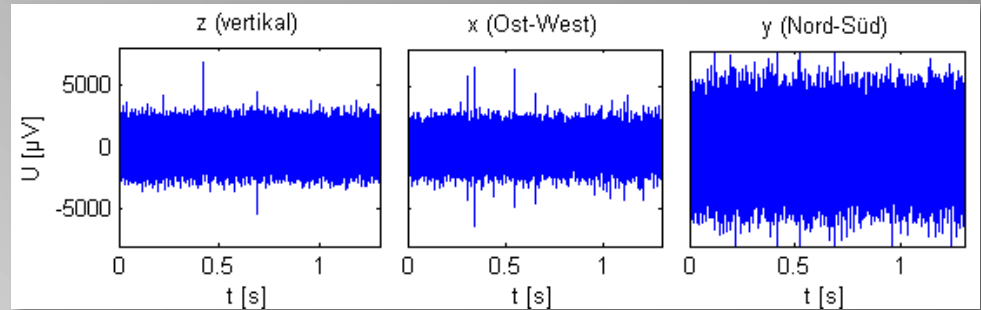
- 2 Referenzkanäle:

$$T_{R1} = \frac{[E_N, E_{R2}^*] \cdot [E_{R2}, E_{R1}^*] - [E_N, E_{R1}^*] \cdot |E_{R2}|^2}{[E_{R1}, E_{R2}^*] \cdot [E_{R2}, E_{R1}^*] - |E_{R1}|^2 \cdot |E_{R2}|^2}$$

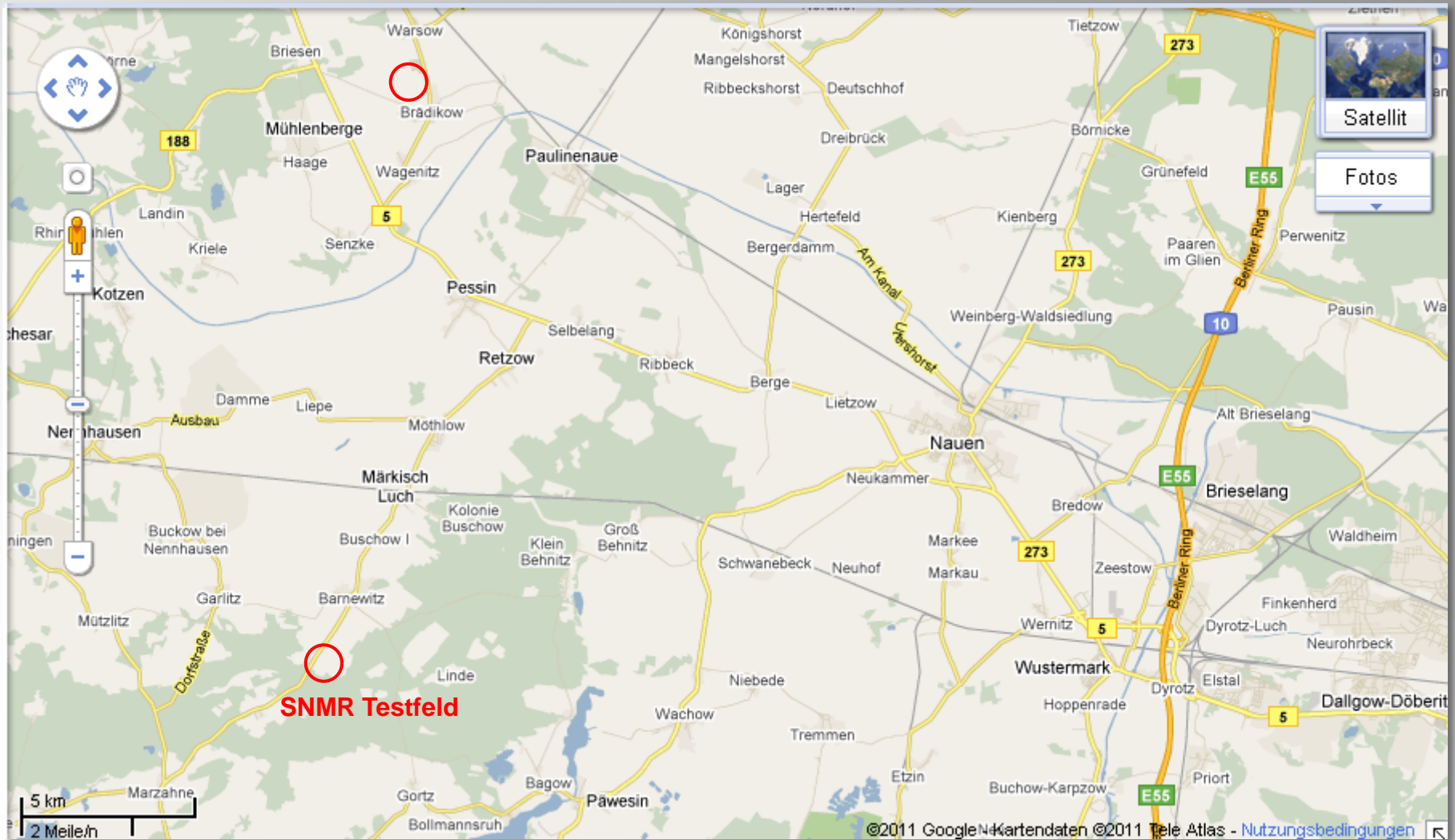
$$T_{R2} = \frac{[E_N, E_{R1}^*] \cdot [E_{R1}, E_{R2}^*] - [E_N, E_{R2}^*] \cdot |E_{R1}|^2}{[E_{R2}, E_{R1}^*] \cdot [E_{R1}, E_{R2}^*] - |E_{R1}|^2 \cdot |E_{R2}|^2}$$

- Magnetotellurik: z-Komponente vollständig beschrieben mit R1=x, R2=y

EM-Noise-Charakteristik



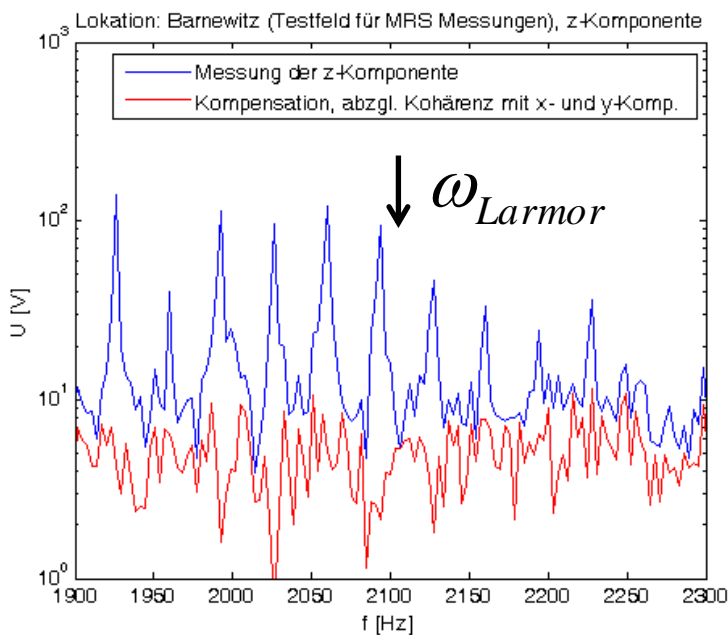
EM-Noise-Charakteristik



EM-Noise-Charakteristik

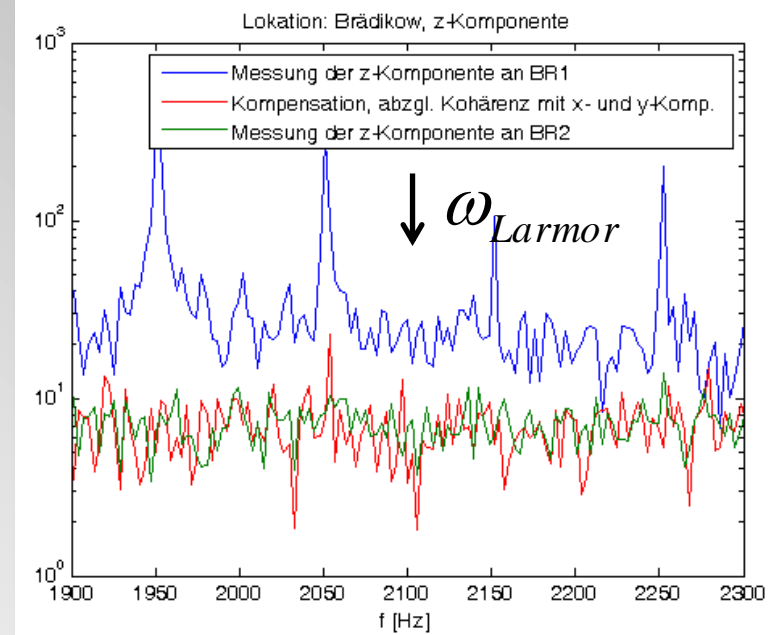
SNMR Testfeld Nauen/Barnewitz:

- Entfernung zur Hochspannungsleitung: 300m
- Entfernung zur ICE-Trasse Berlin-Hannover: 3.7 km
- Hauptstörquelle: ICE-Trasse (16-2/3-Hz - Multiple)



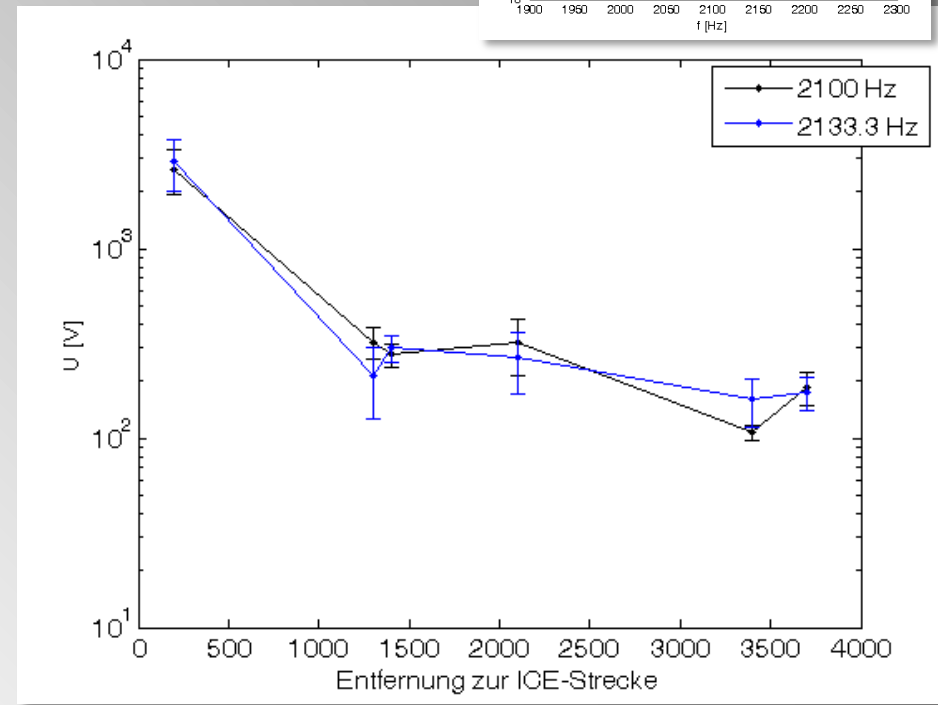
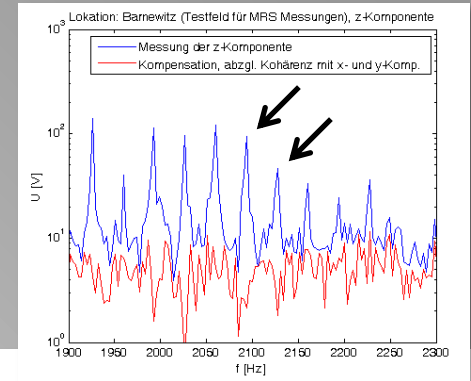
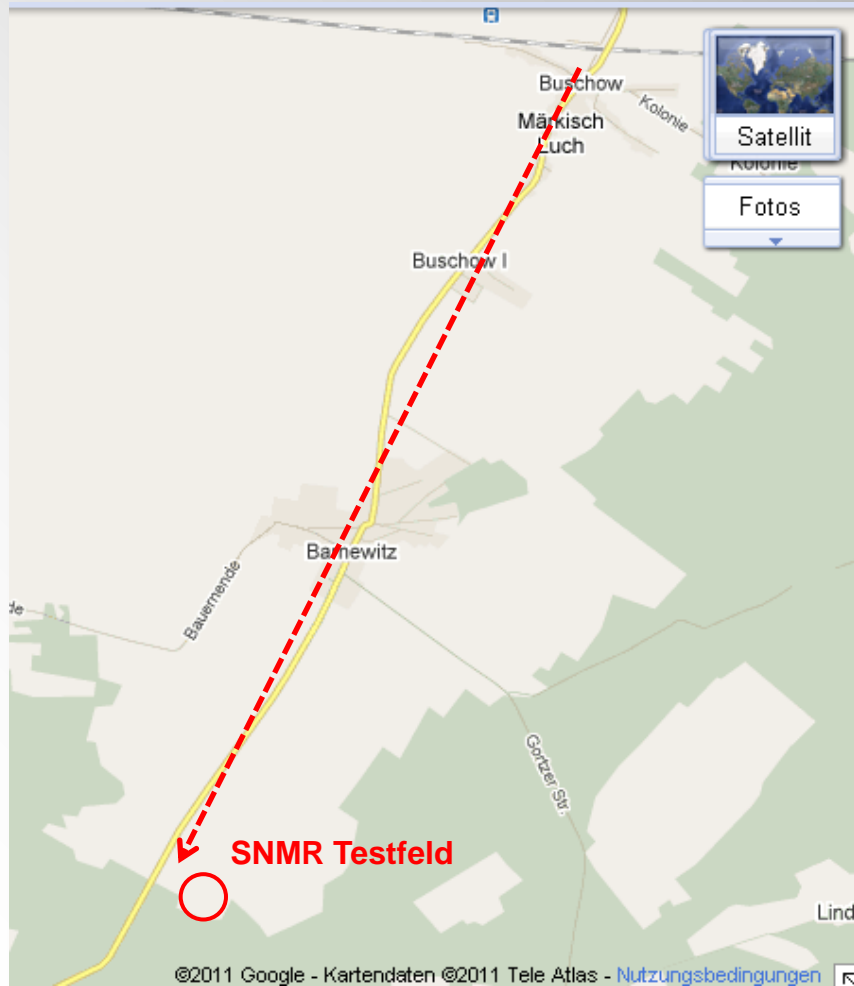
Umgebung Brädikow:

- Entfernung zur Siedlung: 200 m (BR1) und 800 m (BR2)
- Entfernung zur ICE-Trasse Berlin-Hamburg: 2 km
- Hauptstörquelle: Netzspannung (50-Hz - Multiple)



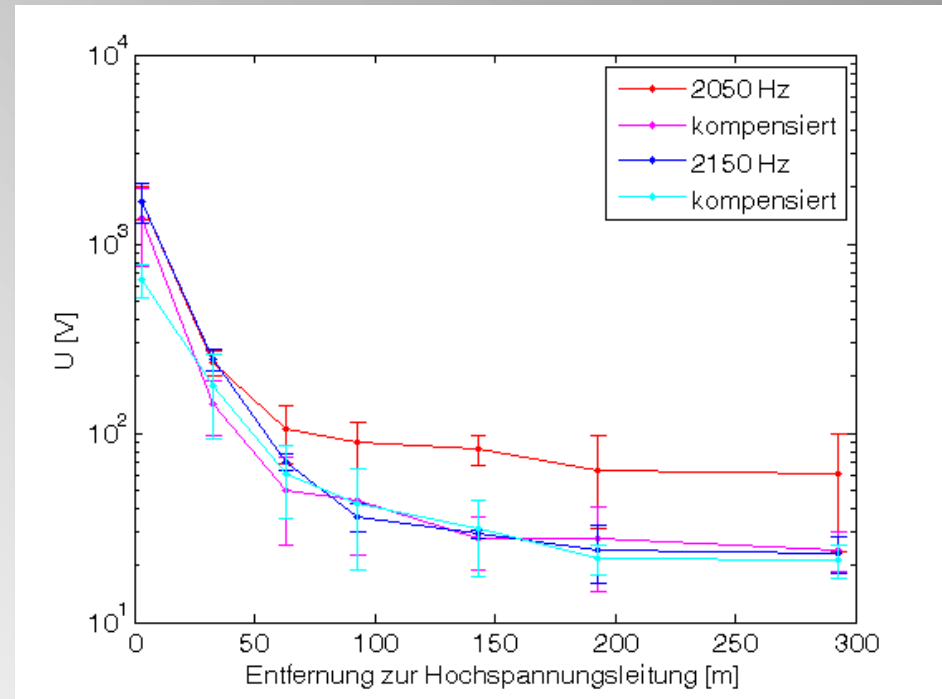
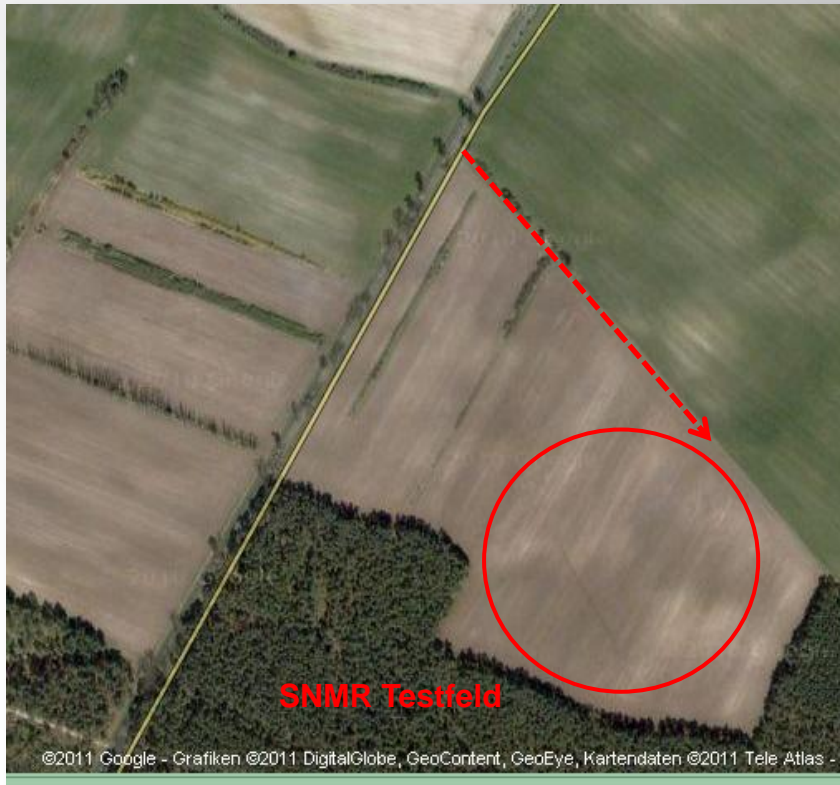
EM-Noise-Charakteristik

Entwicklung des EM-Signal von der ICE-Strecke



EM-Noise-Charakteristik

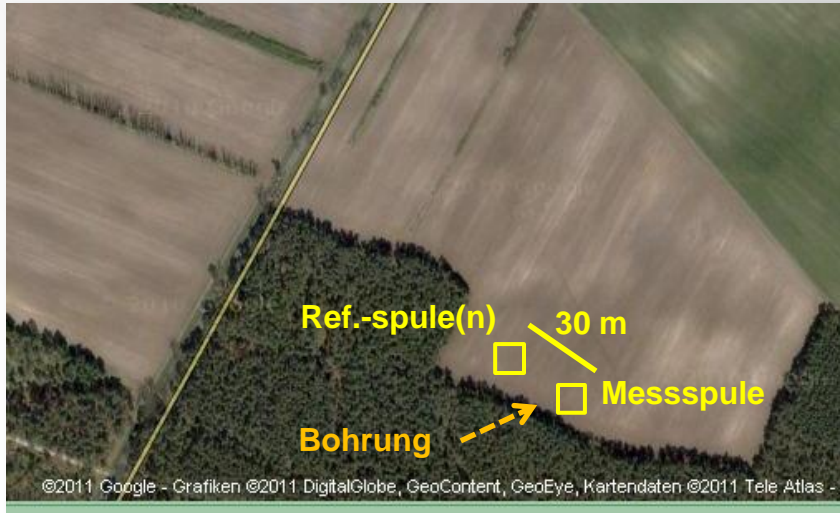
Entwicklung des EM-Signal von der Hochspannungsleitung



Effektivität der Remote Referenz Technik

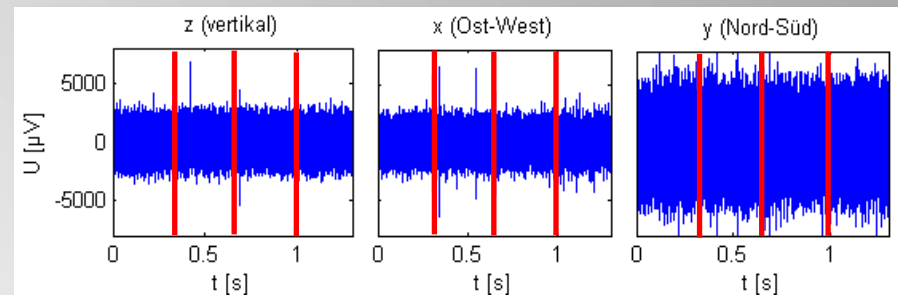
SNMR-Messung mit MRS MIDI (Radic Research):

- Messspule: 10 m (Quadrat), 12 Windungen
- Ref.-spulen:
 - 1m und 10m (Konzept 1, z-Komp.)
 - 1m (Konzept 2, x- und y-Komp.)
- Stacking: 32
- Pulsmoment: ca. 500 mAs, gesättigte Zone
- Sampling Frequenz: 50000 Hz (ca. 1,3 s)



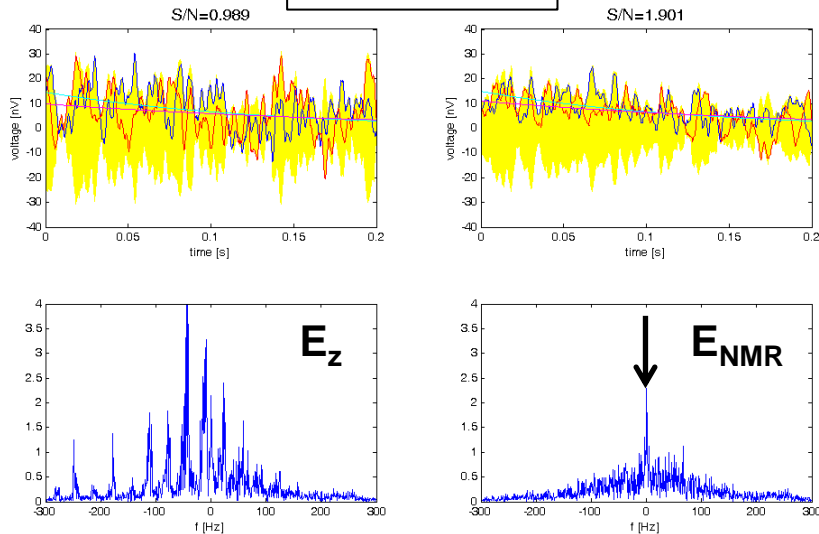
Processing:

- 1) Noise Kompensation:
 - Noisemessung vor jeder SNMR Messung
 - Aufteilung der Zeitreihen in 4 Teil-Zeitreihen
 - Individuelle TF für jedes Einzelsignal
 - ⇒Auflösung im Frequenzbereich: ca. 3.1 Hz
- 2) Bandpass filter (Butterworth mit 100 Hz)
- 3) Stacking
- 4) Hilbert Transformation
- 5) Fitting der komplexen Enveloppe
- 6) Vergleich: Signal-Rausch-Verhältnis

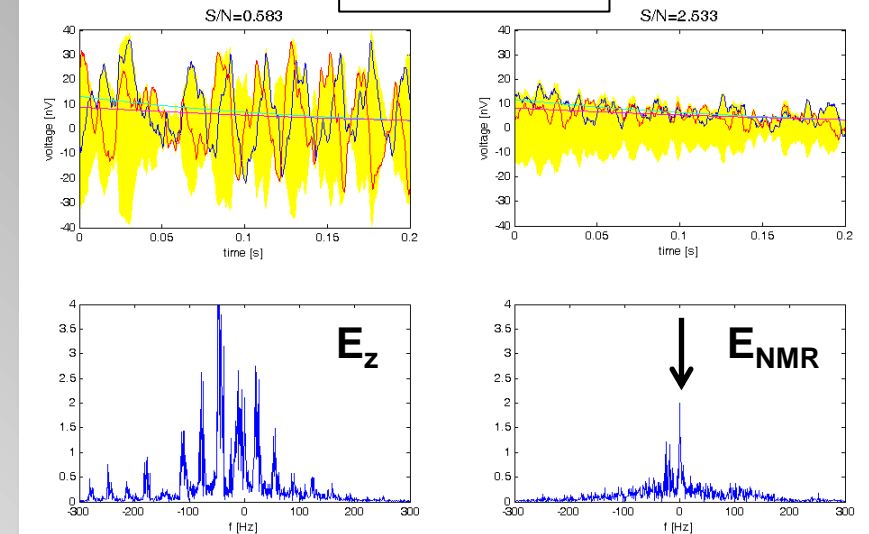


Effektivität der Remote Referenz Technik

Konzept 1



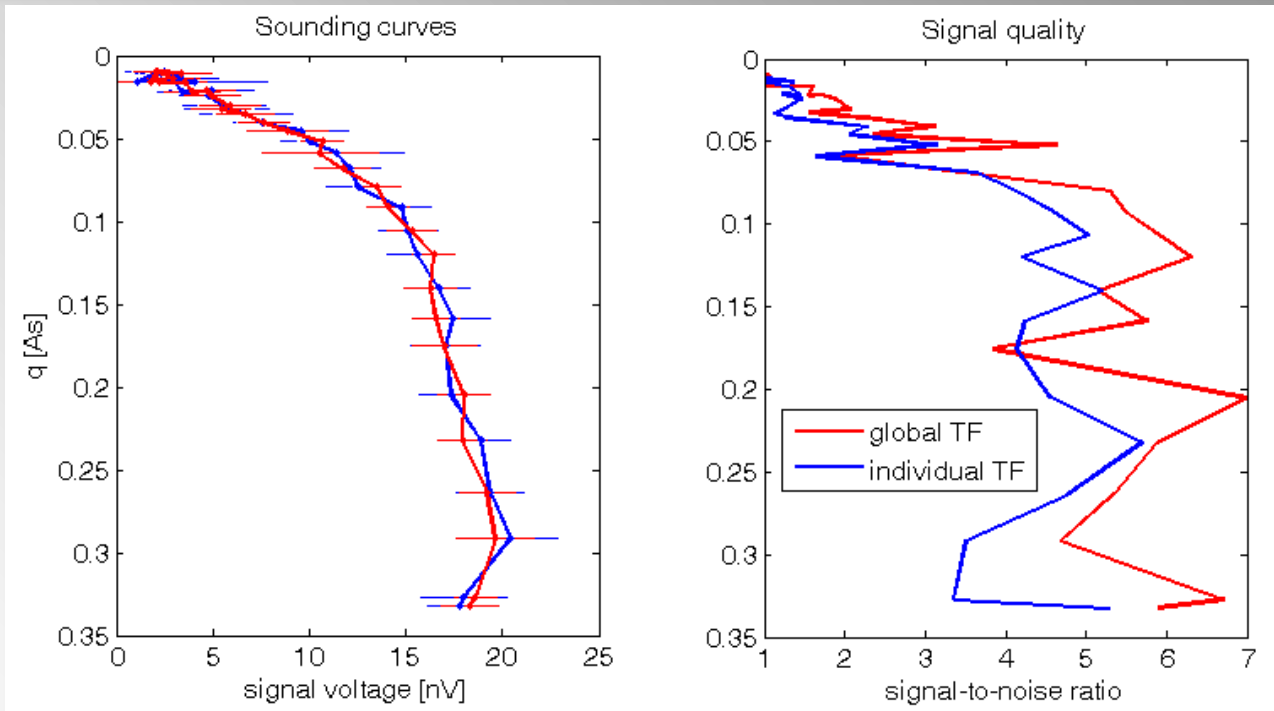
Konzept 2



Signalverbesserung:

- um bis zu 500 % mit Konzept 2 (Berücksichtigung der x- und y- Komponente)
- bis zu 200% mit Konzept 1 (z-Komponente, flachliegende Ref.-spule mit 1m Seitenlänge)
- gleichgroße Ref.-spule: 130%
- Kombination aus 2 flachliegenden Ref.-spulen (10 m und 1m): 160%

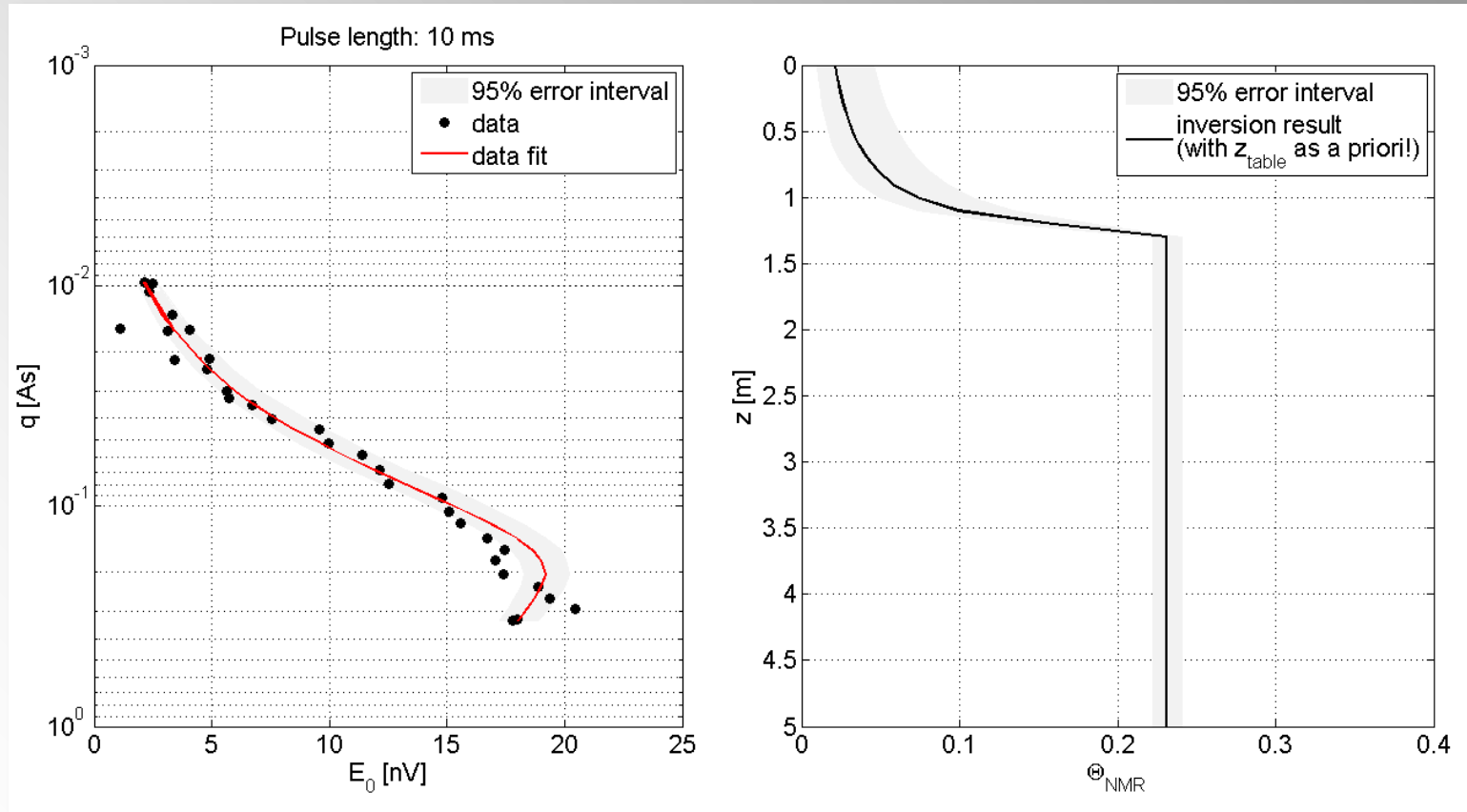
Effektivität der Remote Referenz Technik



Postprocessing-Ansatz:

- TF berechnen aus allen verfügbaren Noise-Spuren einer Sondierung (Voraussetzung: TF zeitlich invariant)
- Anwendung der TF global für alle Einzelmessungen der Sondierung
- Bsp.-sondierung mit 31 pulsmomente und 32 stacks: 992 Wiederholungsmessungen
- Auflösung im Frequenzbereich: $< 1\text{Hz}$ (bei Signallänge über 1 s und sampl. Freq. 50k)
- \Rightarrow Signal-Rausch Verbesserung um 120 -130 %

SNMR-Erkundung der vadosen Zone



Zusammenfassung / Ausblick

- Effektive Rauschunterdrückung durch Remote-Referenz (bis zu 500%) bei 50-Hz- und 16-2/3Hz-Multiplen
- Beste Ergebnisse durch Messung der Horizontal-Komponenten des EM-Störsignals (Messung von NMR-Signalen unterhalb von 10 nV)
- Entwicklung von Postprocessing Strategien für „schwierigere“ Störsignale (Windkraftwerke, Funksignale, spiky noise)
- Weitere Untersuchungen in anderen Gebieten
- EM-Noise Vorerkundung zur Abschätzung der zu erwartenden Signalqualität bei geplanten SNMR Messungen