

# Long-term Monitoring of Geothermal Energy Reservoirs

Joseph Moerschell, Charles Praplan, Christian Cachelin,  
Steve Gallay, David Berthouzoz, Eric Mabillard

In cooperation with the CTI



**Energy**

Swiss Competence Centers for Energy Research



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Commission for Technology and Innovation CTI

September 4th, 2019

## WP3.1 Innovative Technologien

### E. Sensoren für schwierige Umgebungsbedingungen

- E1:* Überwachung der Seismizität tiefer Bohrungen**
- E2:* Messung von Felsbewegungen mittels 3D-Extensometrie**
- E3:* Kontinuierliche Messung der elektrischen Bodenimpedanz**
- E4:* 3D-Erfassung der Form und Änderung von Oberflächen**

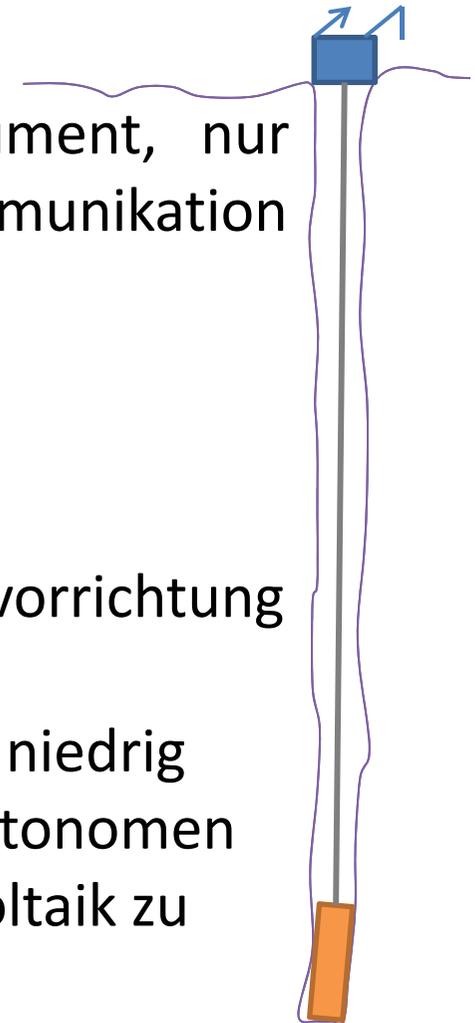
## Bohrlochseismometer

### Besondere Eigenschaften des Instruments:

- Elektronik zur Messwerterfassung im Bohrlochinstrument, nur Stromversorgung und Datenspeicherung sowie Kommunikation über Tage
- Grössere Flexibilität in der Auswahl der Sensoren
- Modularer Aufbau, der die Integration weiterer Messfunktionen gestattet

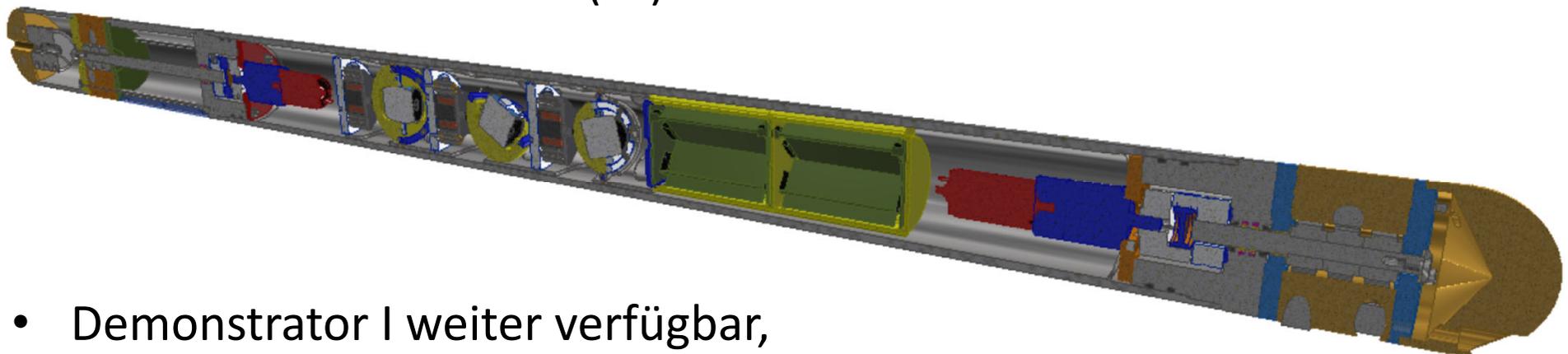


- Motorisierte Spannvorrichtung im Bohrloch
- Leistungsaufnahme niedrig genug, um einen autonomen Betrieb mit Photovoltaik zu erlauben



# Stand der Entwicklung des Bohrlochseismometers

- Ergebnis der ersten Phase: Demonstrator I während 20 Monaten (2/17 – 11/18) in Lavey-les-Bains installiert, 85m tiefe Bohrung in kristallinem Fels
- Performance-Verbesserungen im Frühling '17, und dann Ende '17
- Registrierung verschiedener Erdbeben und anderer Ereignisse, wie z. B. Bauarbeiten
- Demonstrator II hergestellt und montiert, Integration und Test im Gang
- Installation (Ende '19) vorgesehen in das 900m tiefe , 25° geneigte JAFE Bohrloch in Saillon (Vs)

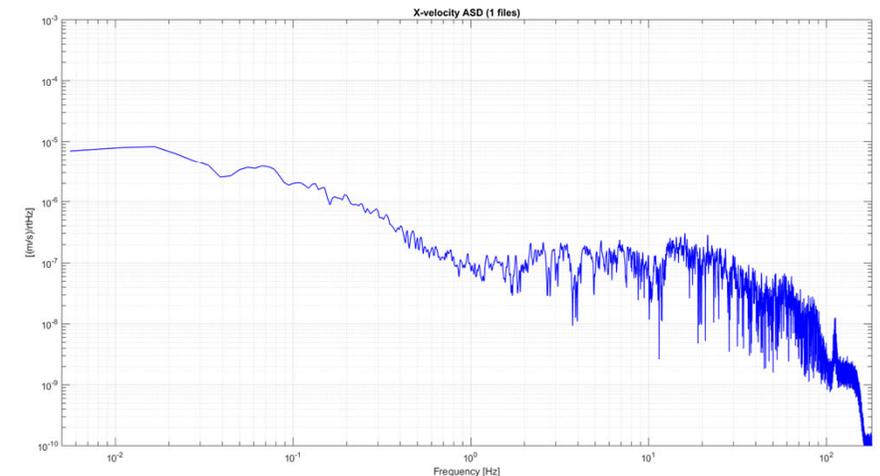
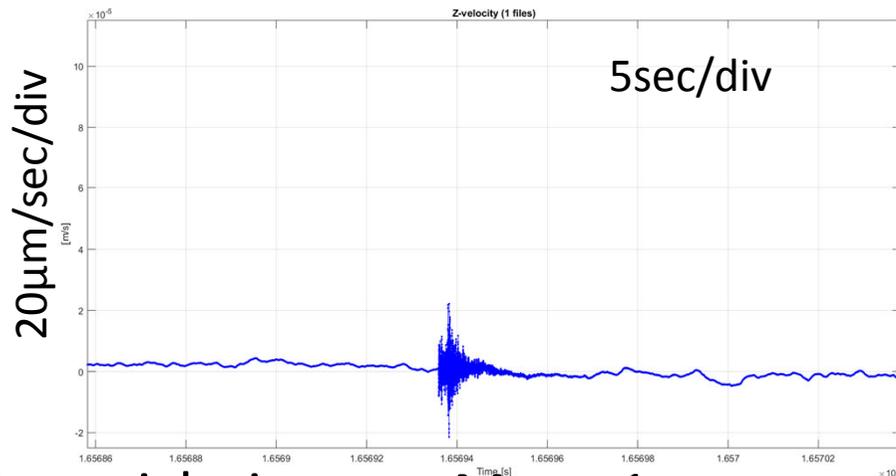
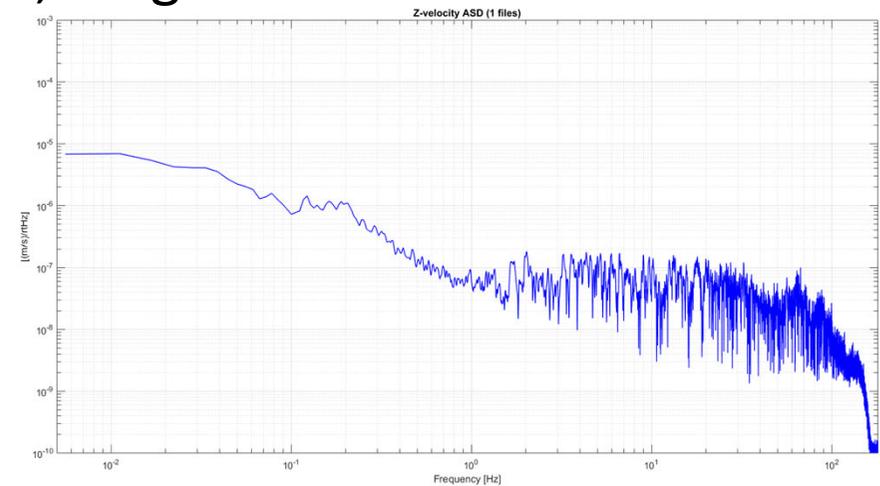
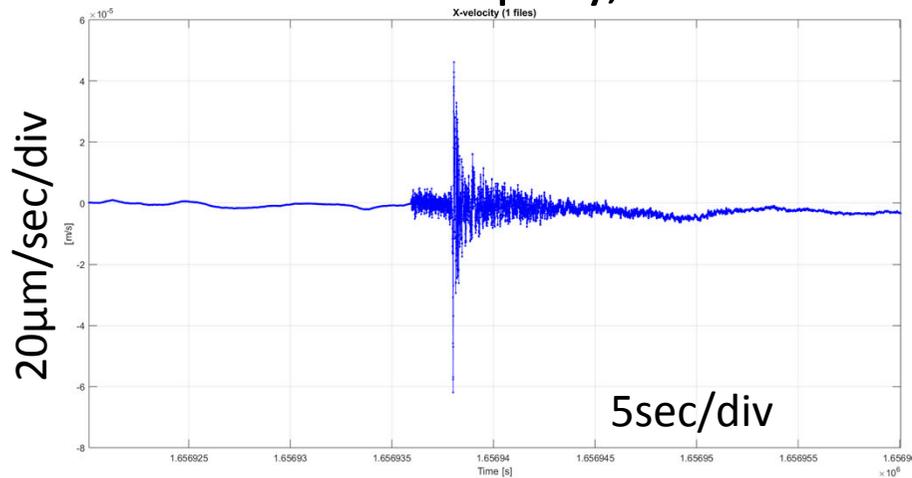


- Demonstrator I weiter verfügbar, könnte z. B. in Lavey-les-Bains bei AGEPP eingesetzt werden

# E1. Überwachung der Seismizität tiefer Bohrungen

## Beispiel eines Ereignisses

Erdbeben von Champéry, 2. Januar 2018, Magnitude 2.7



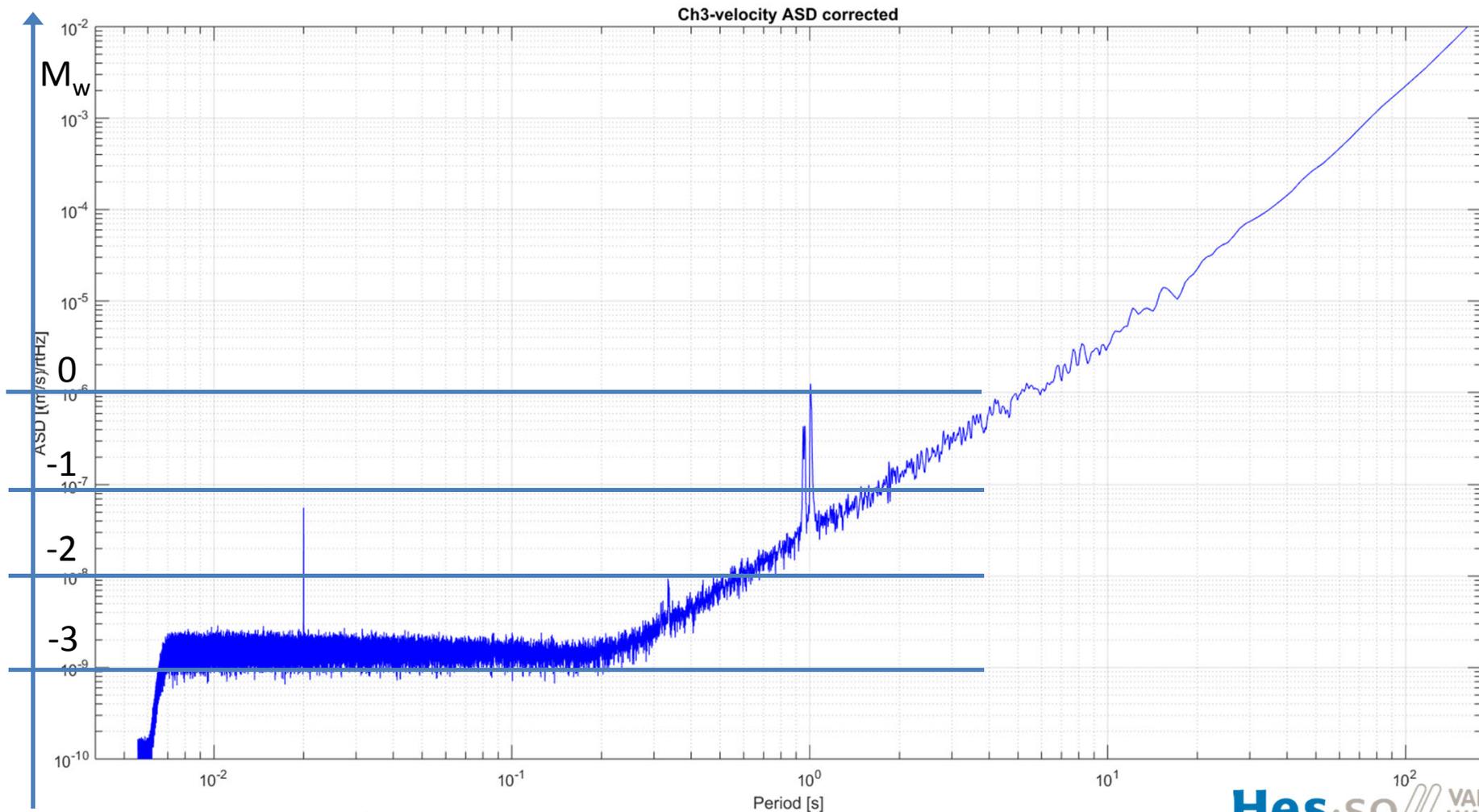
Entspricht in etwa  $M_w = -1$ ,

wenn das Ereignis nahe am Instrument stattgefunden hätte

# E1. Überwachung der Seismizität tiefer Bohrungen

## Performance-Analyse

Ausgehend von einem Schnellespektrum, ungefährender Massstab von  $M_w$  in der Nähe des Instruments



Schwelle der Empfindlichkeit des Menschen bei etwa  $M_w \approx -1...0$

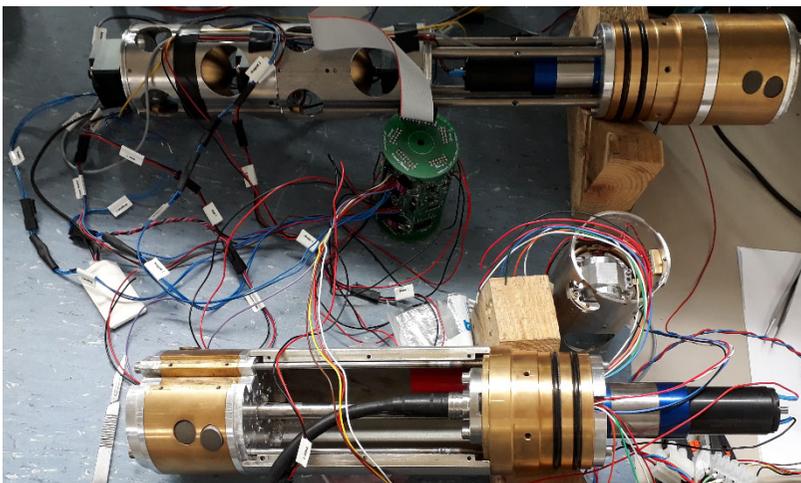
### Demonstrator II

Neue Eigenschaften:

- Kardanisch aufgehängte Sensoren, mit magnetisch lösbaren Bremsen
- Fähigkeit zur Installation in geneigten Bohrlöchern,  $\pm 90^\circ$  Drehbereich
- Zusätzliche Sensorausrüstung: Temperatur, Trübe, elektrische Leitfähigkeit, Hydrophon, Radonkonzentration.
- Aussendurchmesser des Instruments reduziert auf 88mm.

Zukünftige Weiterentwicklung:

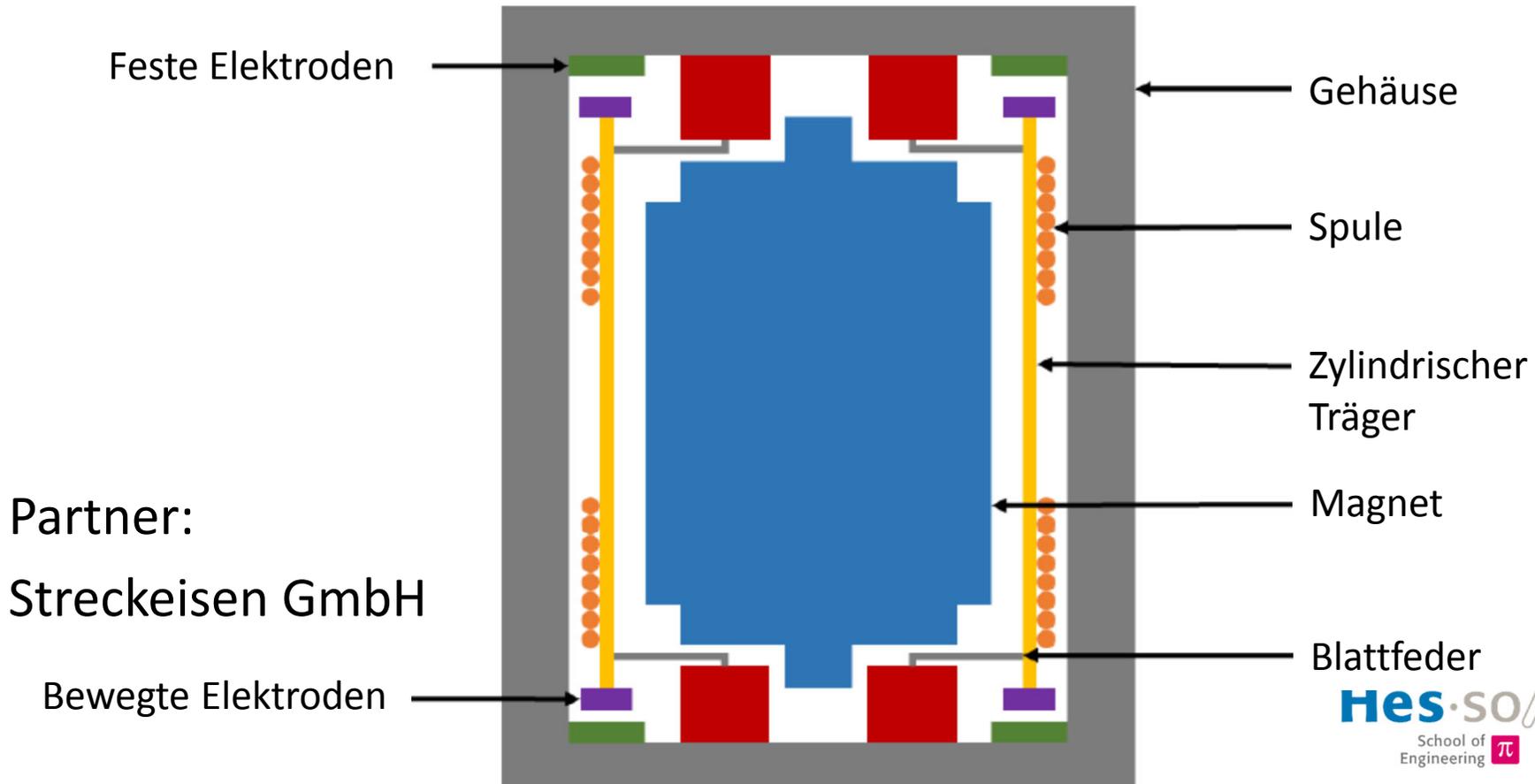
- Teleskopischer Autotraktor für die Installation
- Erhöhung der Abtastrate der Geophone



Gefäß für Druckversuche 7

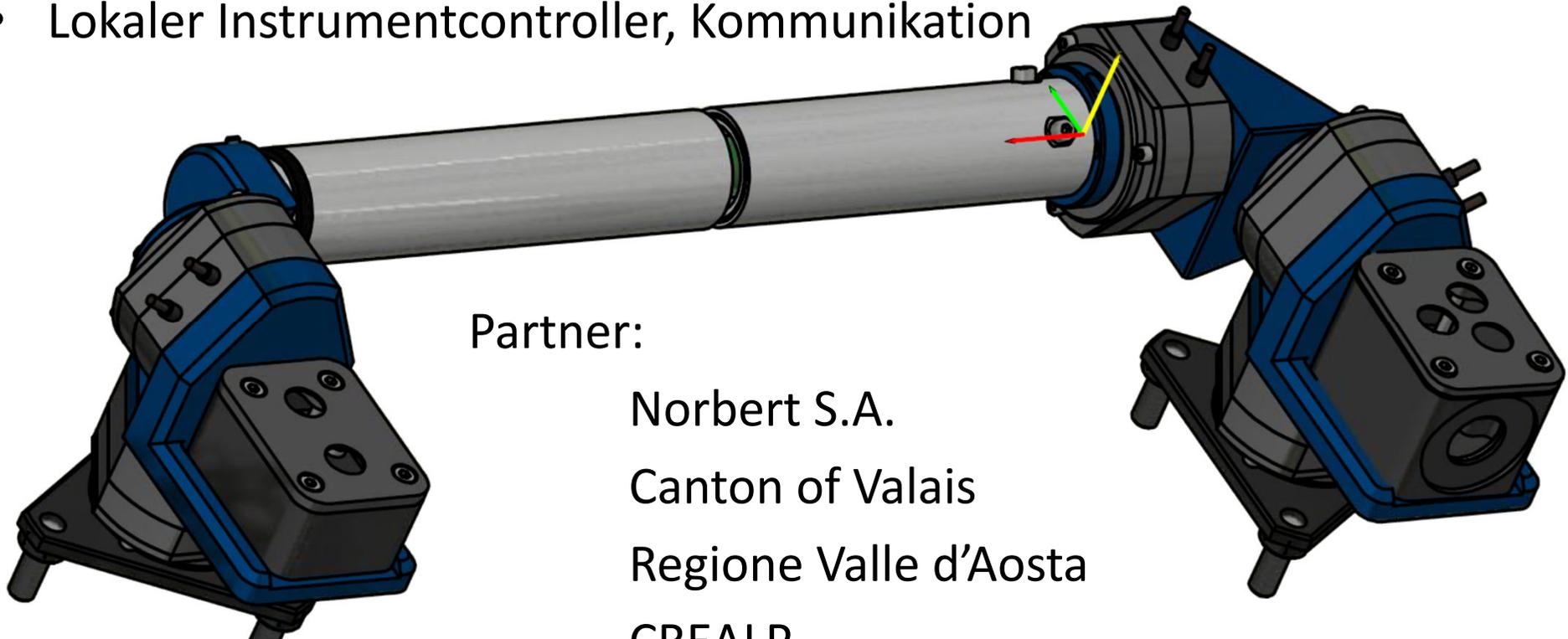
# Geophone mit Kraftkompensation

- Zusätzlicher kapazitiver Positionssensor im Geophon
- Implementierung einer Krafrückkopplung
- Ziel: Erhöhung der Empfindlichkeit des Sensors



## 3D Felswand-Extensometer

- Erfassung aller 6 Freiheitsgrade der Bewegung zwischen 2 Punkten in einer instabilen Felswand
- Sensordatenverarbeitung: Korrekturen, Koordinatentransformationen, Visualisierung
- Lokaler Instrumentcontroller, Kommunikation



Partner:

Norbert S.A.

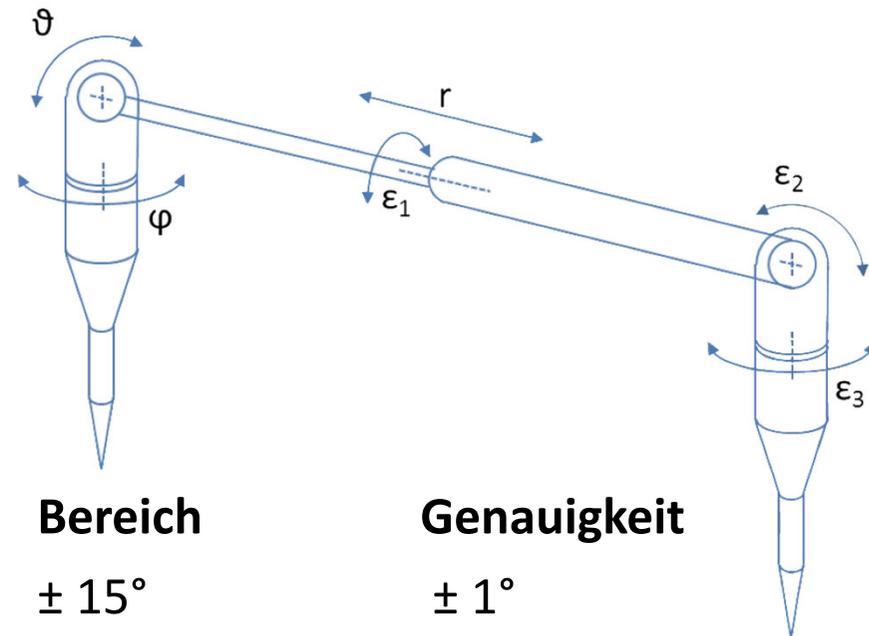
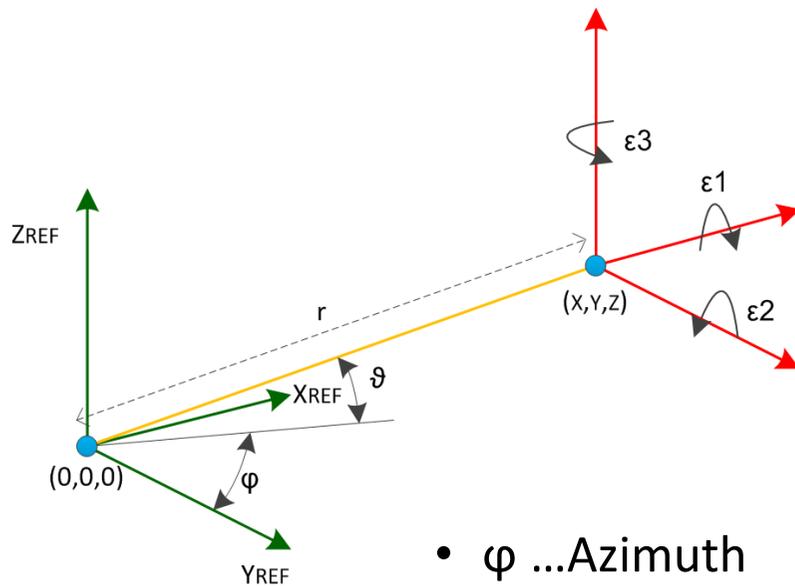
Canton of Valais

Regione Valle d'Aosta

CREALP

# Messung von 6 Freiheitsgraden zwischen 2 Ankerstellen

Koordinationsysteme und Spezifikationen



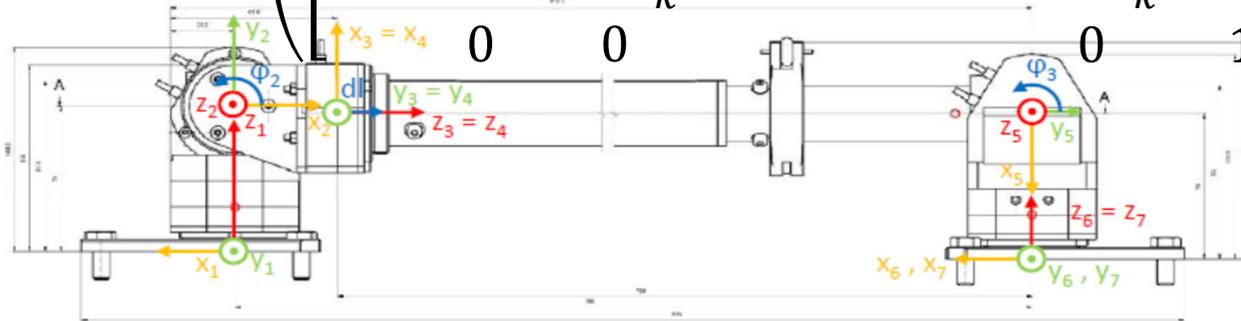
- |  | <b>Bereich</b> | <b>Genauigkeit</b> |
|--|----------------|--------------------|
| • $\varphi$ ...Azimuth   | $\pm 15^\circ$ | $\pm 1^\circ$      |
| • $\vartheta$ ...Elevation   | $\pm 15^\circ$ | $\pm 1^\circ$      |
| • $r$ ...Abstand   | 0...300 mm     | $\pm 1$ mm         |
| $\epsilon_{1,2,3}$ ...Orientierung der entfernten Ankerstelle,<br>Bereich und Präzision wie bei $\varphi, \vartheta$ |                |                    |

## E2. Messung von Felsbewegungen mittels 3D-Extensometrie

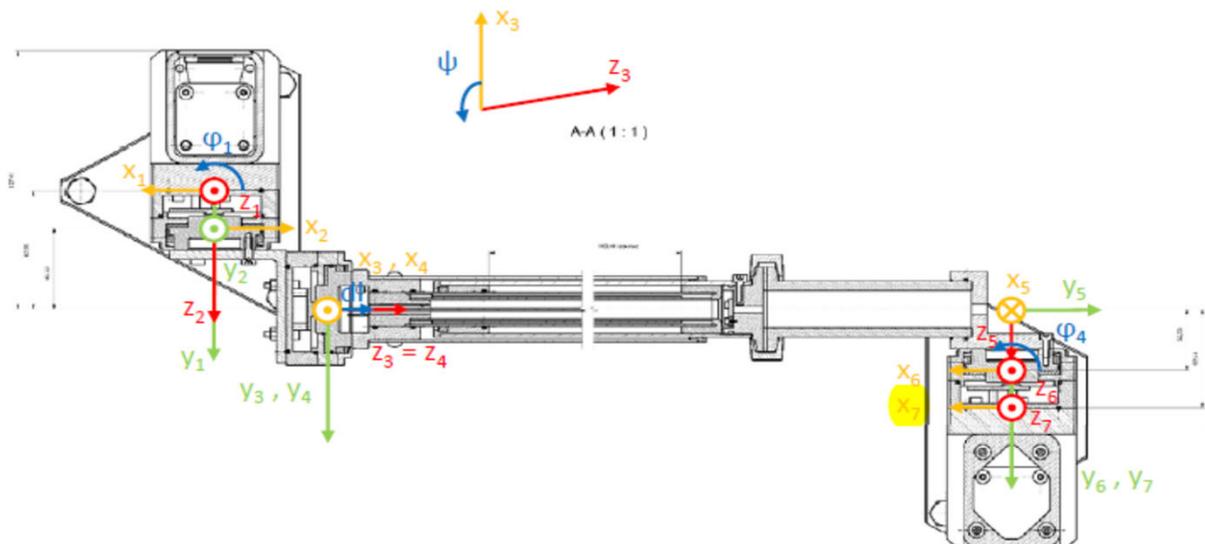
# Transformationen von Denavit-Hartenberg

Transformationsmatrizen  $T_k$  zwischen aufeinanderfolgenden Koordinatensystemen

$$T_k = \begin{pmatrix} \cos\theta_k & -\sin\theta_k \cos\alpha_k & \sin\theta_k \sin\alpha_k & a_k \cos\theta_k \\ \sin\theta_k & \cos\theta_k \cos\alpha_k & -\cos\theta_k \sin\alpha_k & a_k \sin\theta_k \\ 0 & \sin\alpha_k & \cos\alpha_k & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T = \prod_{k=1}^7 T_k$$

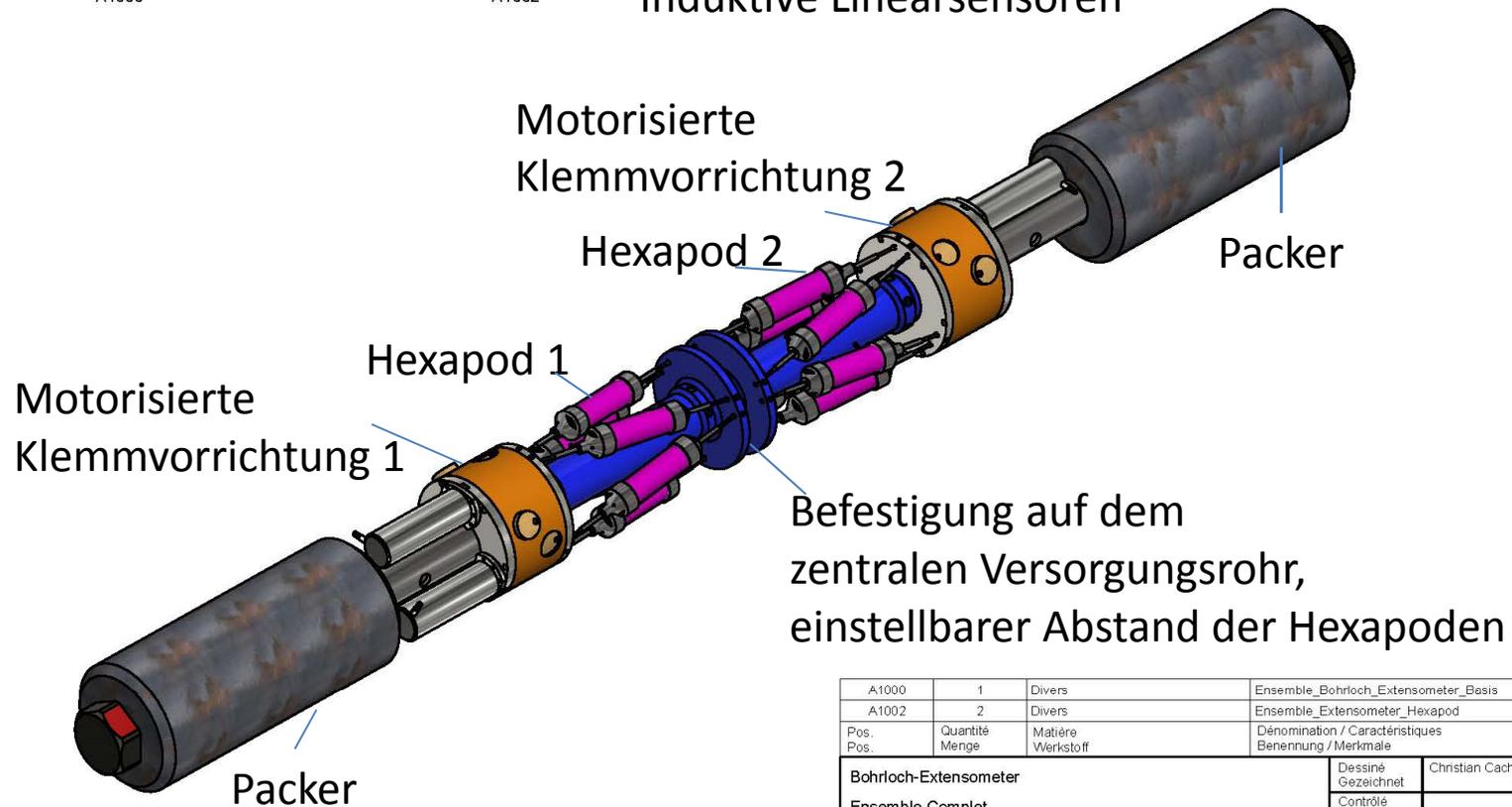
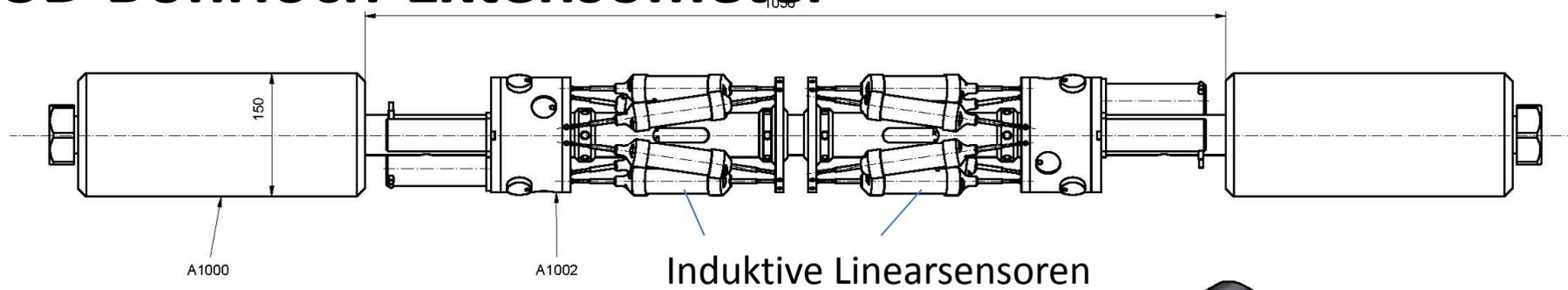


mit 4 Kennwerten  
 $\theta_k, \alpha_k, a_k, d_k,$   
 für jedes  
 Bezugssystem,  
 $k = 1 \dots 7.$



## E2. Messung von Felsbewegungen mittels 3D-Extensometrie

# 3D Bohrloch-Extensometer



A1000	1	Divers	Ensemble_Bohrloch_Extensometer_Basis		
A1002	2	Divers	Ensemble_Extensometer_Hexapod		
Pos.	Quantité	Matière	Dénomination / Caractéristiques		
Pos.	Menge	Werkstoff	Benennung / Merkmale		
Bohrloch-Extensometer			Dessiné	Christian Cachelin	26.04.2019
Ensemble Complet			Gezeichnet		Echelle
			Contrôle		Massestab
			Geprüft		1:5
Fichier					
Datei					

# Elektrische Impedanz-Tomographie

Die elektrische Bodenimpedanz-Tomographie ist heute ein Instrument für Spezialisten, die es für Messkampagnen einsetzen:

- Hohe Masse und Leistungsaufnahme
- Hohe Spannungen an den Elektroden.
- Hoher Preis der Ausrüstung.

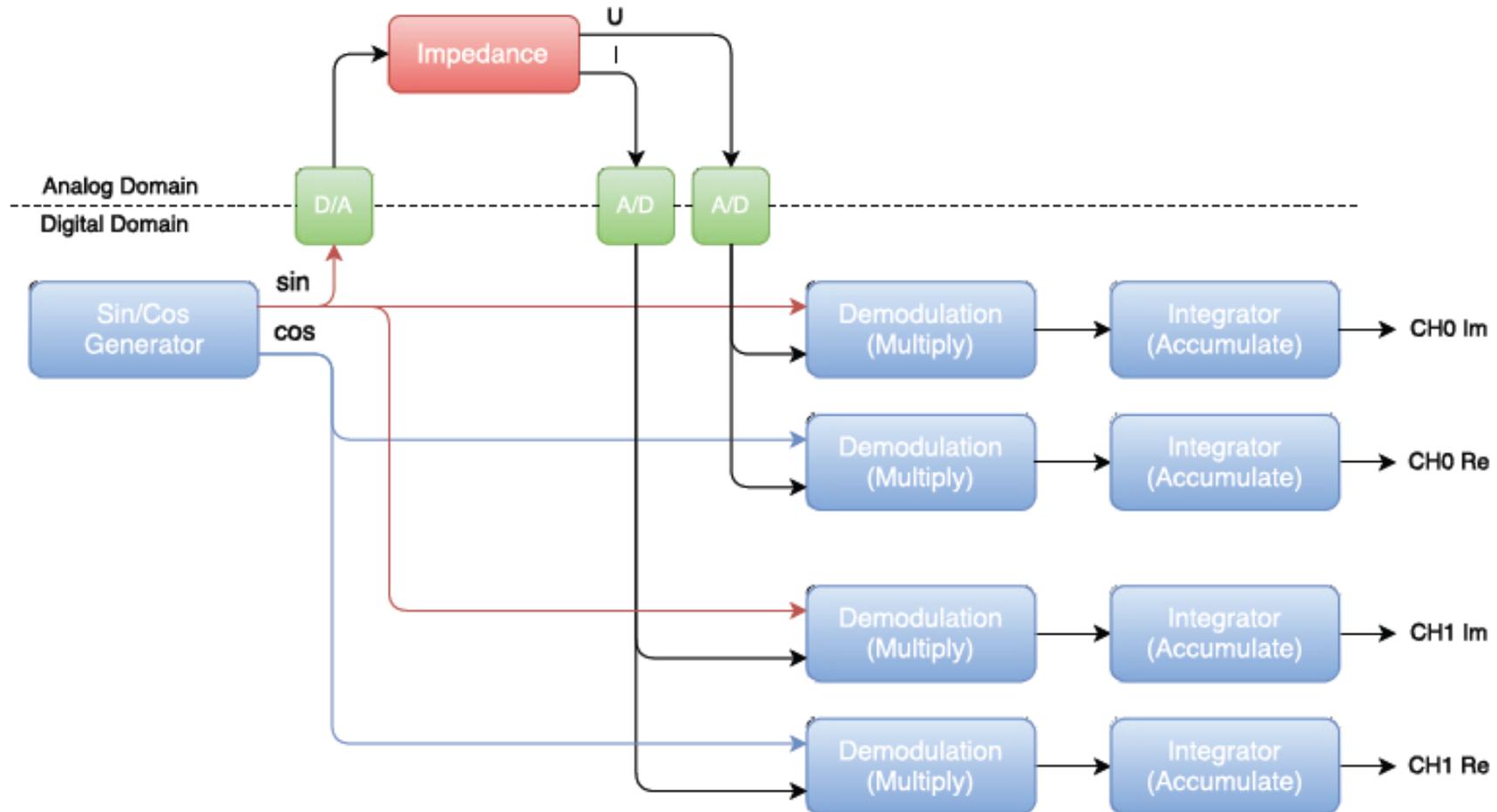
**Vorgeschlagene Innovation** : die Bodenimpedanz mit einer Dauermessstation überwachen, welche autonom mit Energie versorgt wird, und drahtlos kommuniziert:

- Verfolgung der Impedanz in Abhängigkeit von den Jahreszeiten
- Verwendung eines homodynem Messverfahrens, welches den Signal-zu-Rauschabstand erhöht, um mit Spannungsniveaus arbeiten zu können welche weder Menschen noch Tiere gefährden.
- Drahtlose Kommunikation über das GSM-Netz zur Acquisition der Daten auf einem entfernten Server.

### E3. Kontinuierliche Messung der elektrischen Bodenimpedanz

## Impedanzmessung mit Synchrondemodulation

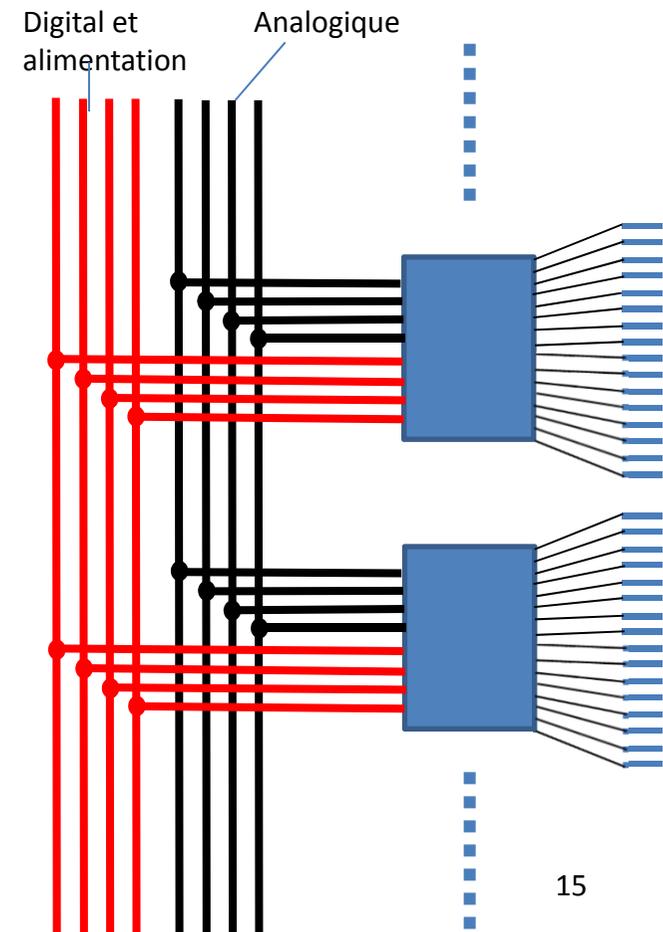
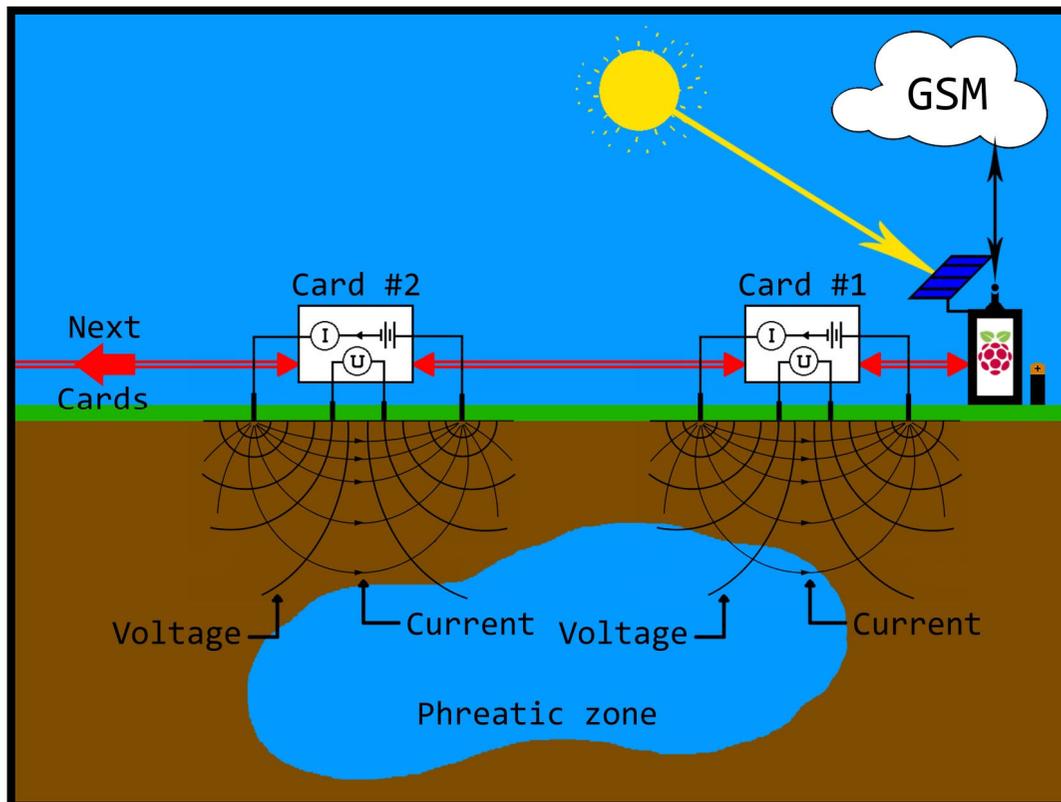
Das Modulations- und Demodulationsschema ist digital implementiert, in spezieller H/W. Impedanzspektren werden gewonnen, indem die Frequenz des Erregersignals variiert wird.



## E3. Kontinuierliche Messung der elektrischen Bodenimpedanz

# Messsystem mit Analog- und Digitalbus

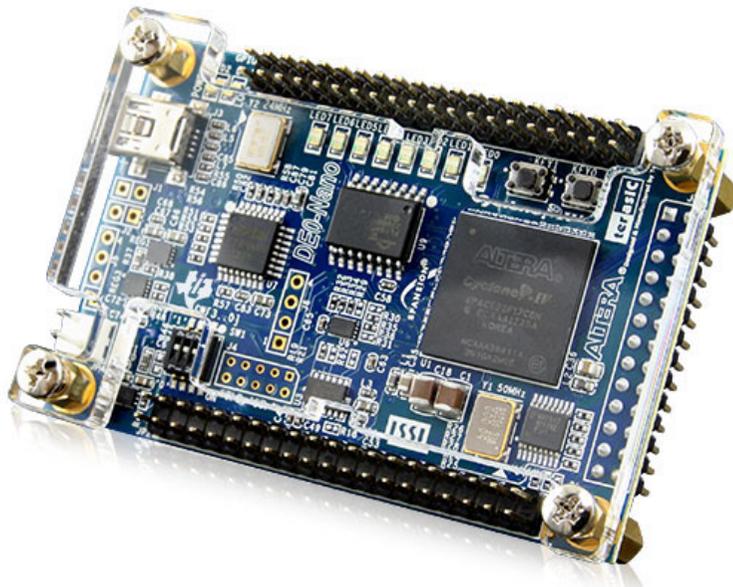
- 4-Leiter Impedanzmessung, sinusförmige Erregung.
- Modulares System mit 16 Knoten à 16 Elektroden.
- Digitale Kommunikation zwischen Knoten zur Konfiguration der Datenerfassung.
- Bis zu 1km lange Linie mit 256 Elektroden.



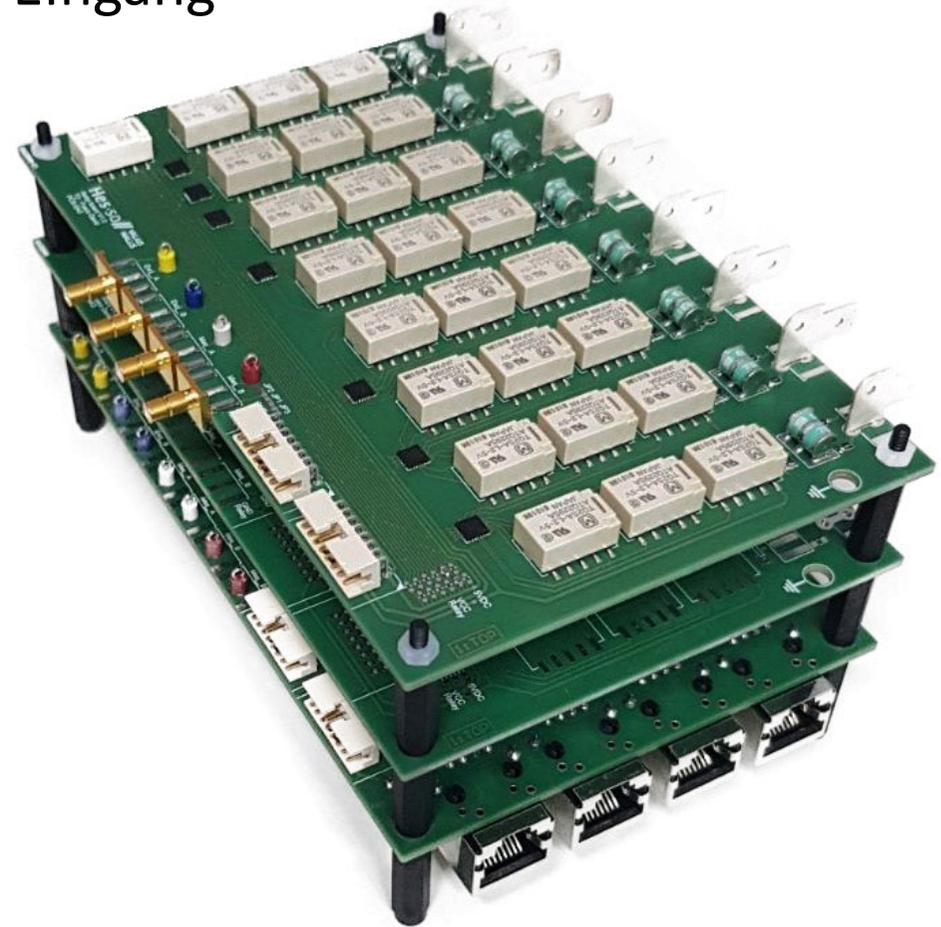
## E3. Kontinuierliche Messung der elektrischen Bodenimpedanz

# Demonstrator mit grosser Elektrodenzahl

- Messknoten mit FPGA-Karte, A/D und D/A
- Schutz gegen Überspannungen am Eingang
- Versorgung durch ins Gehäuse integrierte Solarzellen.
- Erregerfrequenz 10mHz bis 10kHz.
- Konfigurierbarer Erdanschluss.



FPGA-Karte

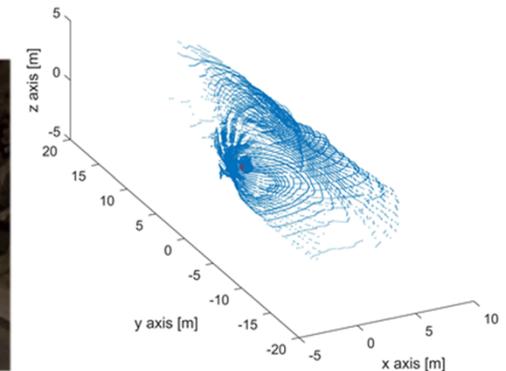


Erreger- und Messknoten

## E4. 3D-Erfassung der Form und Änderung von Oberflächen

# LIDAR-Scanner

- LIDAR mit niedrigem Energieverbrauch, aus dem Automobilsektor
- Für Anwendungen mit beschränkter Reichweite, z. B. die Modellierung von Tunneln, Baugruben, Gletscherzungen usw.
- Auflösung 1 cm, Genauigkeit 5cm
- Wurde für eine Aussenanwendung vorbereitet
- Übergang zu einem selbstentworfenen LIDAR
- GSM-Verbindung



Partner:

in-Terra Sàrl

