

# Partial Discharge Monitoring and Localization in Power Transformers and Reactors Using Fiber Optic-Based Acoustic Emission Sensors

---

Dr.Ir. S.J. Voeten

SGB-SMIT,

Royal SMIT Transformers

[stefanv@sgb-smit.group](mailto:stefanv@sgb-smit.group)

The Netherlands

Dr. N. Lebedev

Optics11

[Nikita.lebedev@optics11.com](mailto:Nikita.lebedev@optics11.com)

The Netherlands

Dr. A. Zadeh

Optics11

[Aydin.Zadeh@optics11.com](mailto:Aydin.Zadeh@optics11.com)

The Netherlands

## Zustand des Transformators – Werksabnahmetest

- Bauen Sie nach Spezifikationen
- Funktioniert wie vorgesehen
- Stellen Sie sicher, dass keine Produktionsfehler vorliegen
- Induzierter Spannungs-Teilentladungstest
- Was tun, wenn Teilentladungen festgestellt werden?
- Reduzieren Sie den Suchbereich basierend auf elektrischen Sensoren
- Ortung von PD mit Schallemissionssensoren

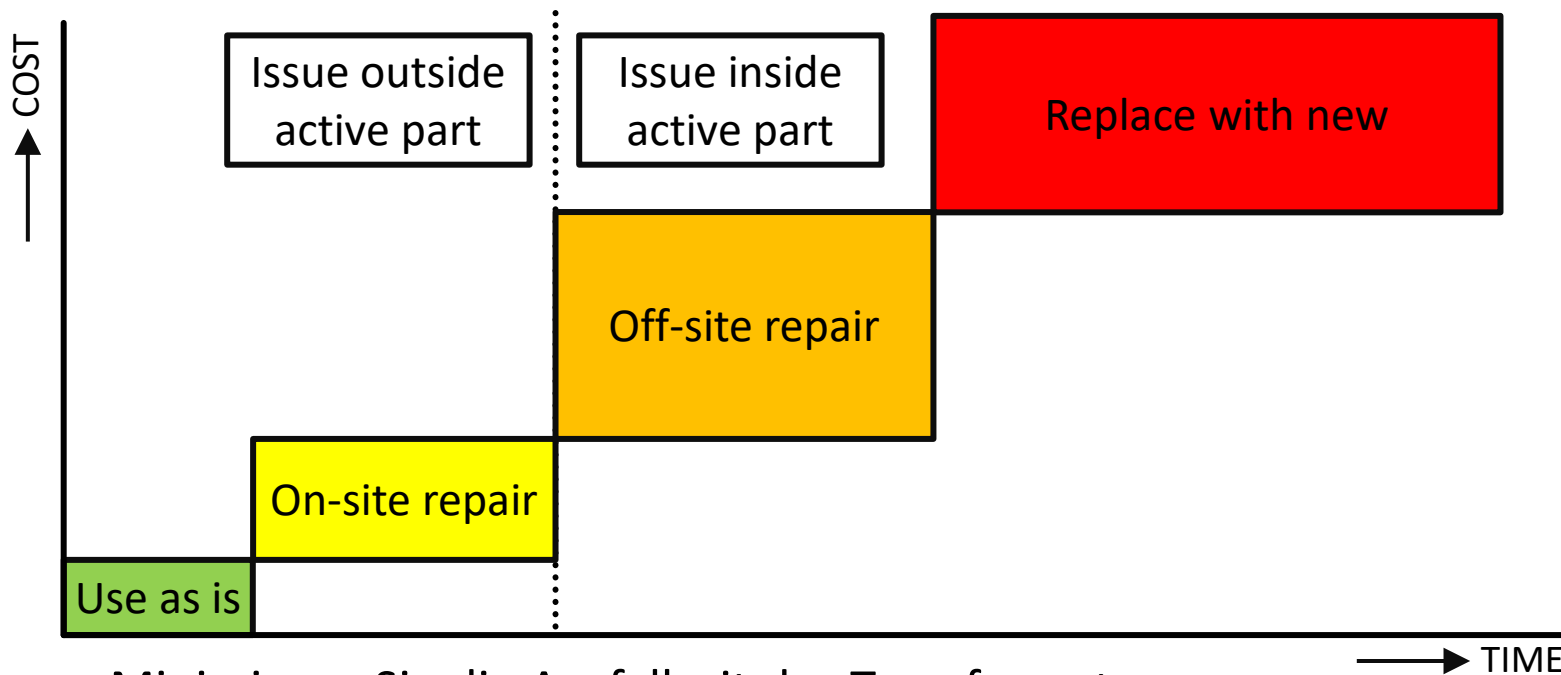
## Zustand des Transformators – Warum Interesse an einem neuartigen System?

- Teilentladungen schneller finden
- Finden Sie auch intermittierende Teilentladungen
- Erleichtern Sie die akustische Lokalisierung von Teilentladungen
- Ziel für den Einsatz im Hochspannungsprüflabor:

Finden Sie Teilentladungen innerhalb von 4 Stunden ohne den Einsatz eines Experten zur akustischen Lokalisierung von Teilentladungen

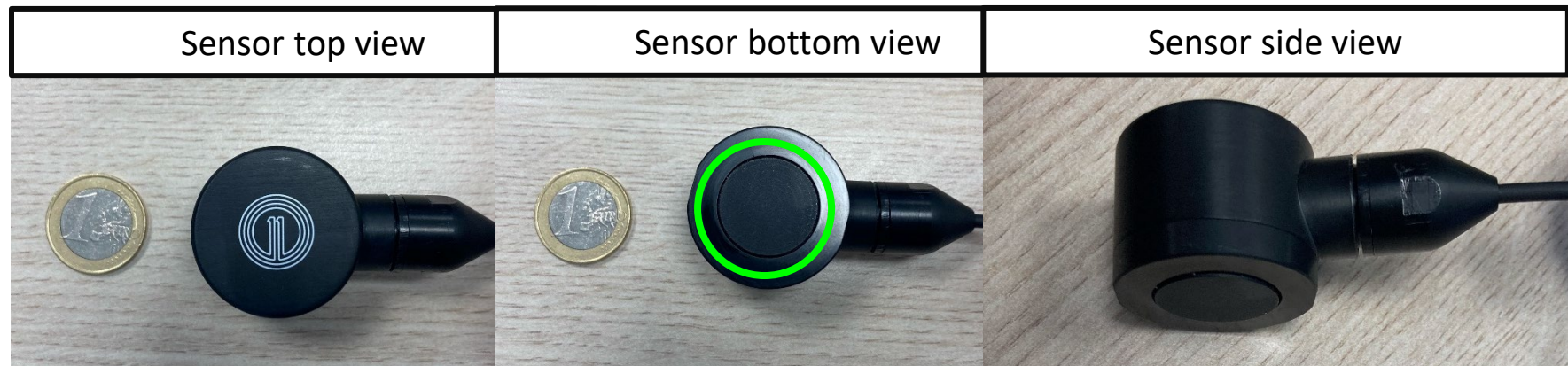
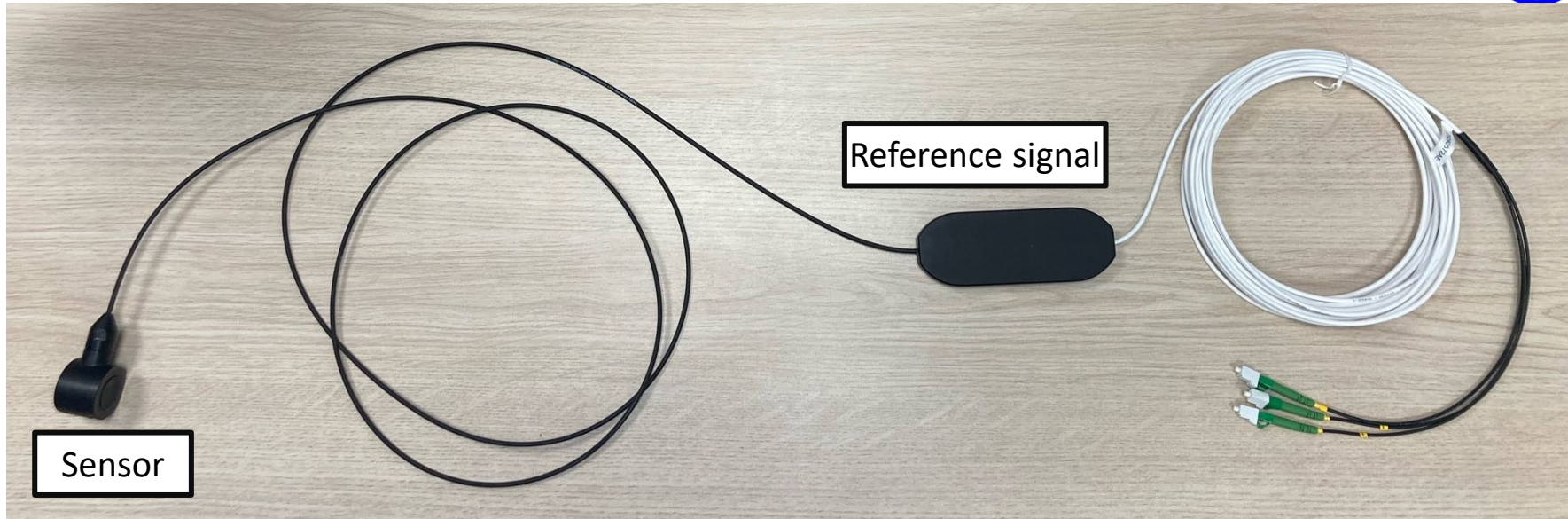
## Zustand des Transformators – In Betrieb

- Routinekontrollen wie zum Beispiel DGA
- Was tun, wenn Teilentladungen festgestellt werden?



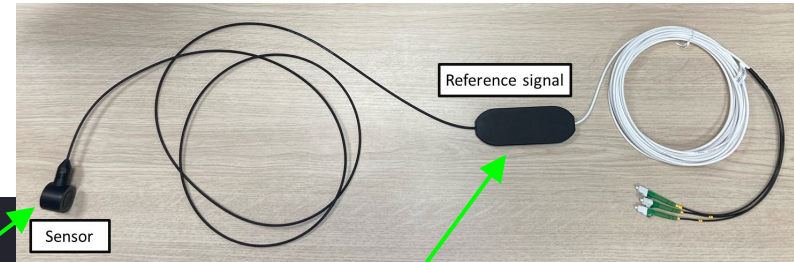
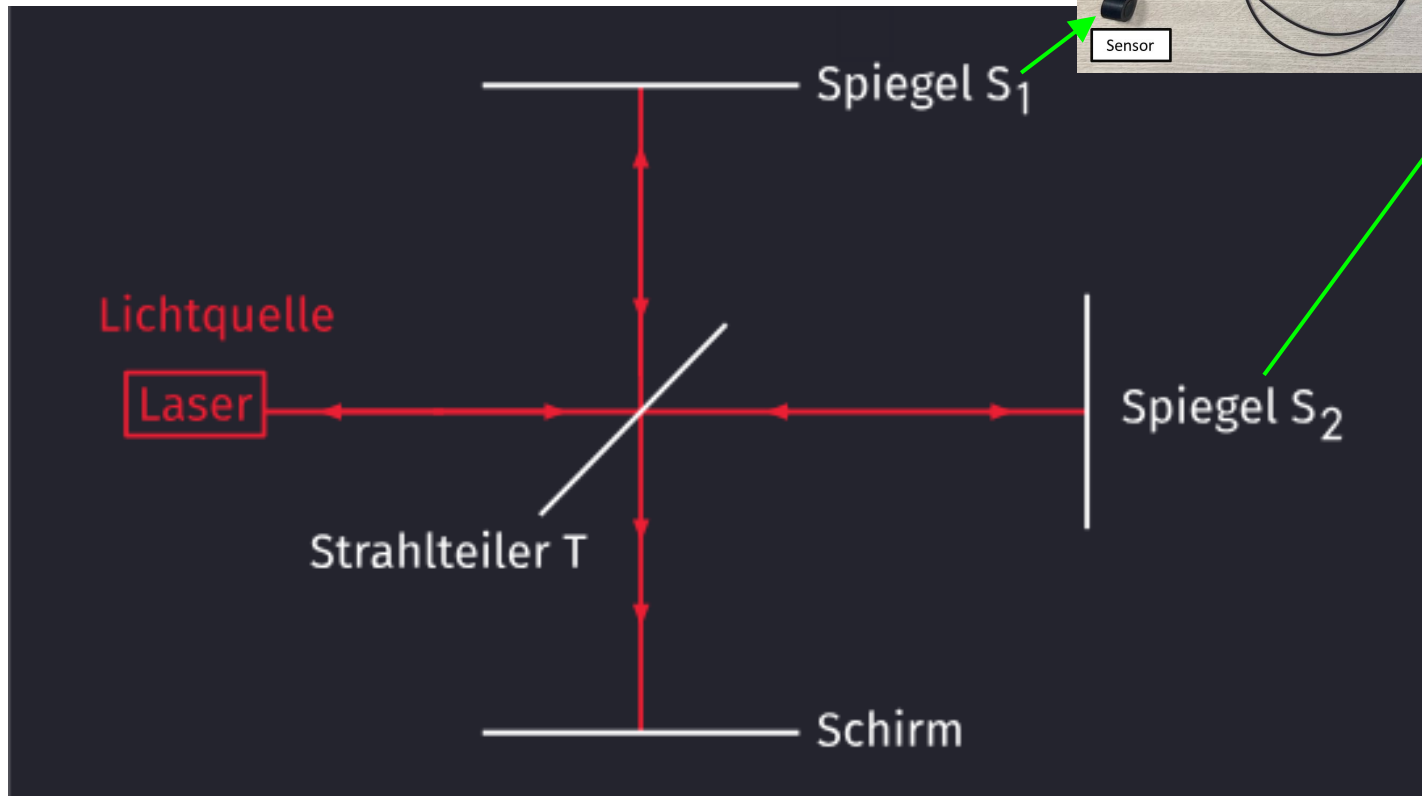
- Minimieren Sie die Ausfallzeit des Transformators
- Begrenzte Testmöglichkeiten
- Vibrationen im Transformator unter Last

# Neuartiger akustischer Sensor – vollständig faseroptisch

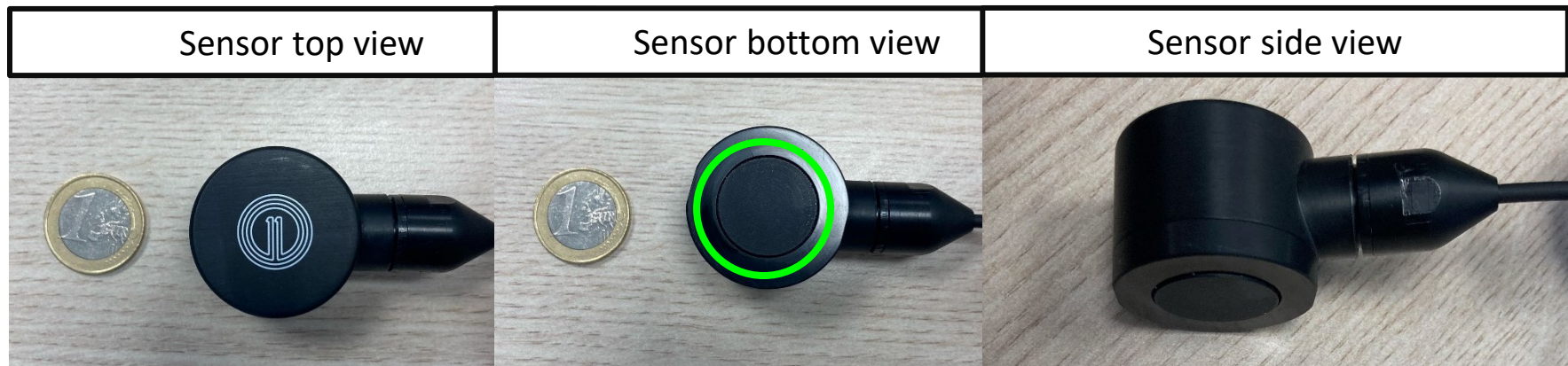
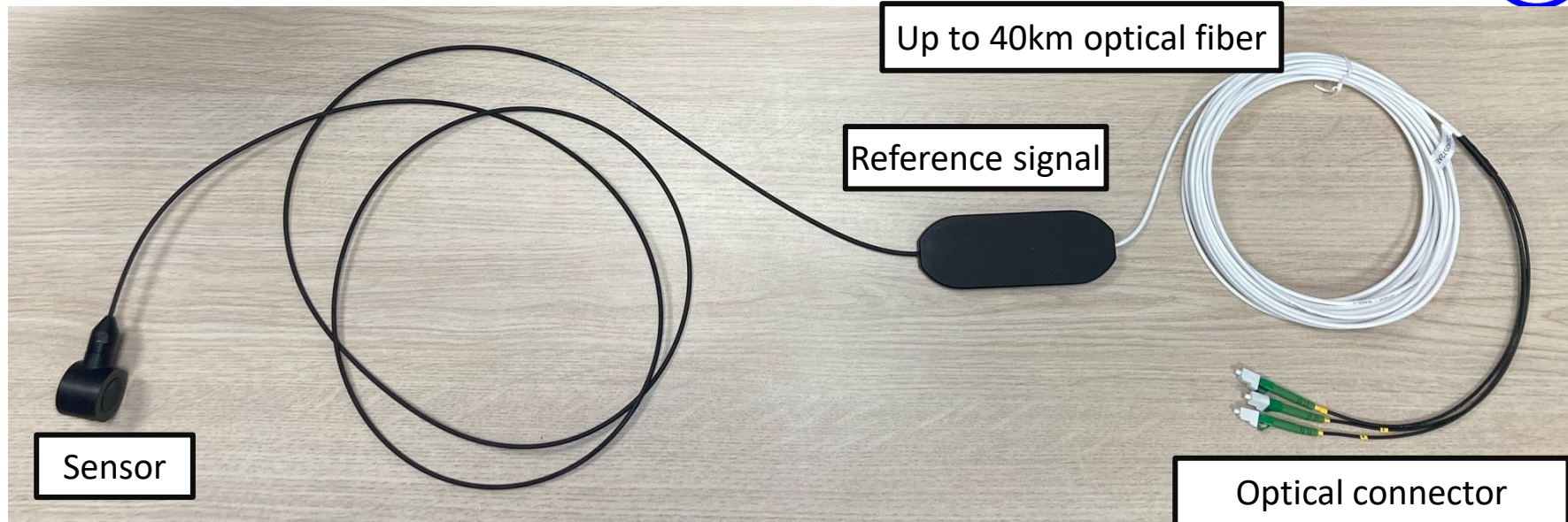


# Neuartiger akustischer Sensor – vollständig faseroptisch

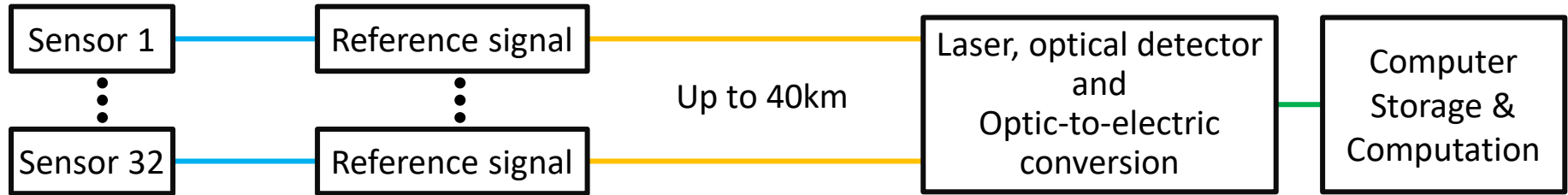
- Michelson interferometer



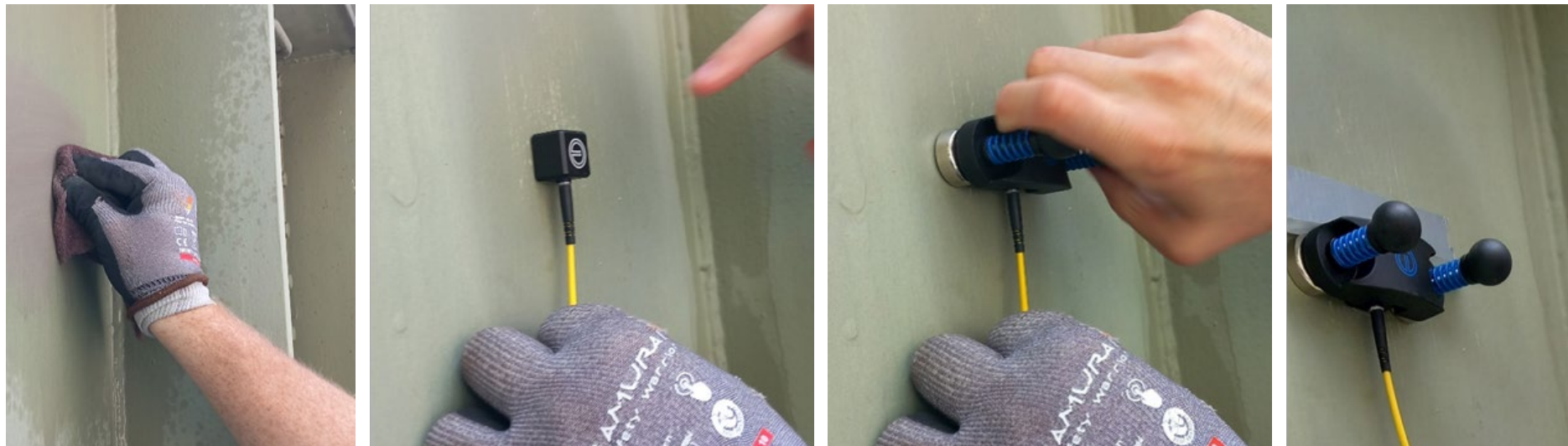
# Neuartiger akustischer Sensor – vollständig faseroptisch



# Neuartiger akustischer Sensor – vollständig faseroptisch



# Neuartiger akustischer Sensor – vollständig faseroptisch



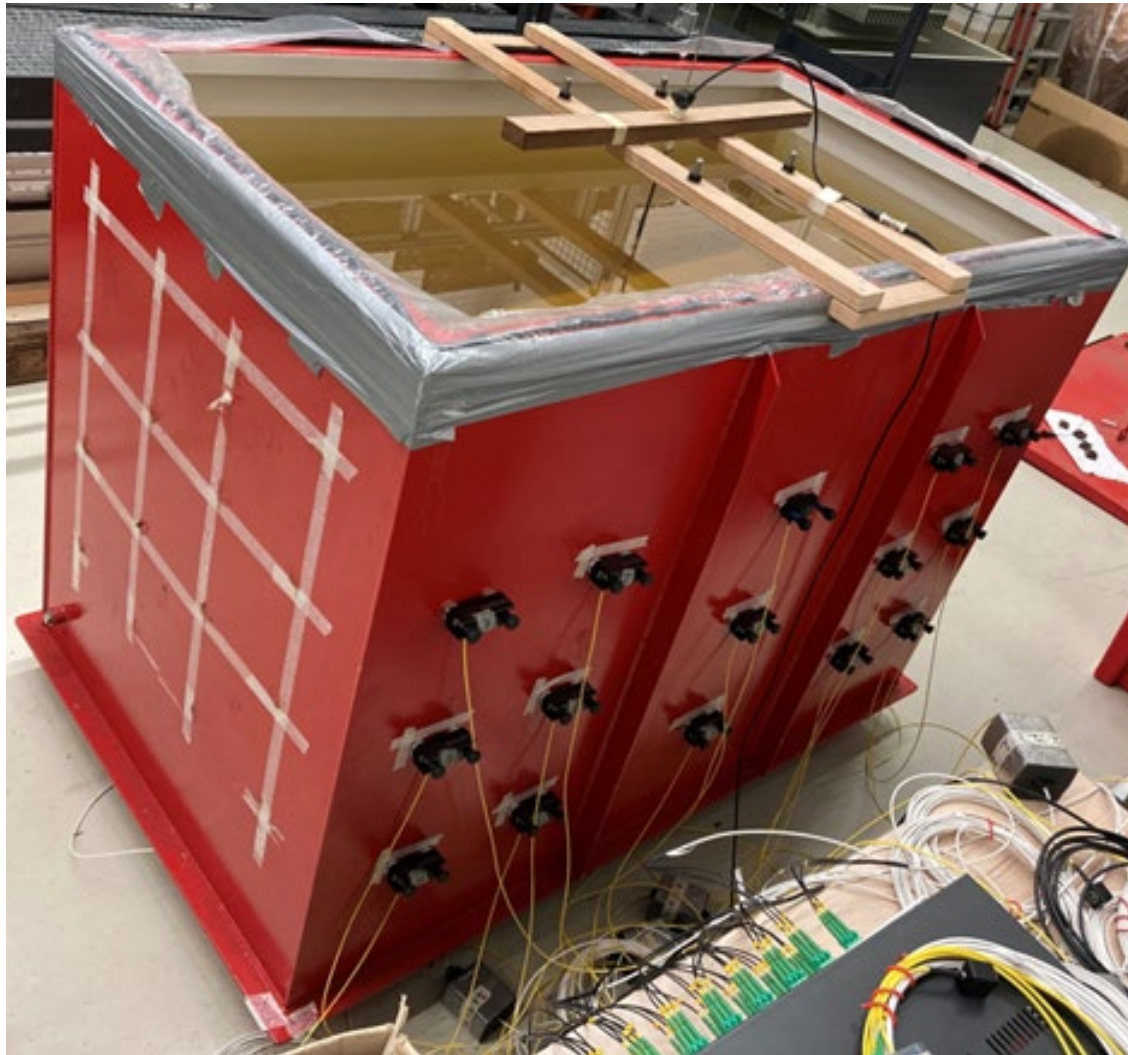
## Neuartiger akustischer Sensor – vollständig faseroptisch

- Alle akustischen Sensordaten können zur späteren Überprüfung gespeichert werden
- Kann eigenständig betrieben werden
- Ermöglicht auch die Erfassung intermittierender PD
- Externer Trigger ist möglich:
  - Trigger-Versorgungsspannung: PRPD-Muster
  - Trigger auf PD-Ereignis: Mittelung, Signal-Rausch-Verhältnis erhöhen
- EMI ist kein Problem

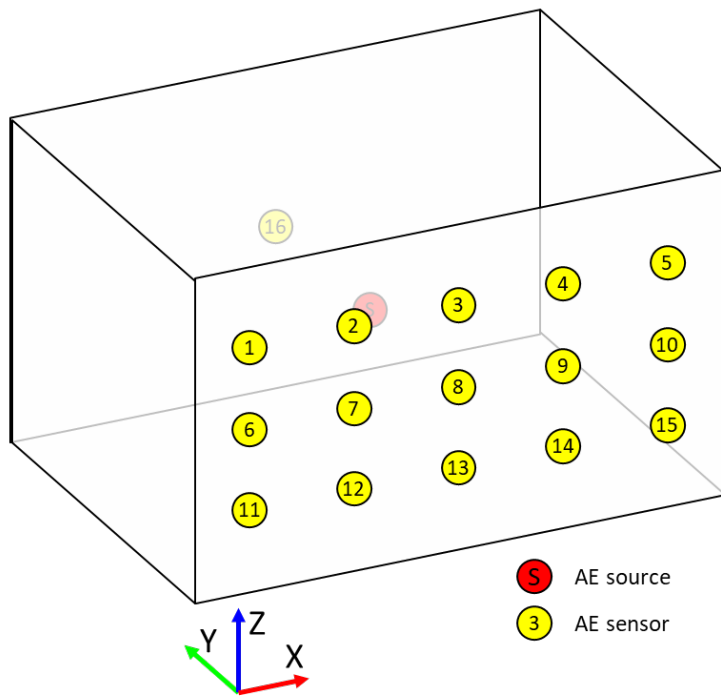
## Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

- Akustische Lokalisierung basierend auf „Time Of Arrival“
- Eigenschaften des empfangenen Signals?
- Akustische Signalgeschwindigkeit in Öl:
- $1400 \text{ m/s} \rightarrow 14 \text{ cm/100 us}$
- Wie genau kann TOA bestimmt werden?
- Wie sieht ein „ideales“ akustisches Signal aus?

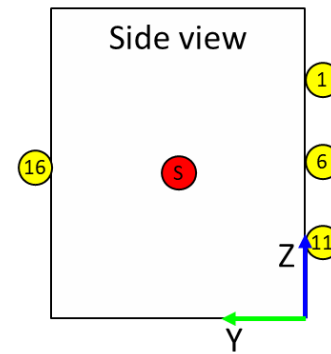
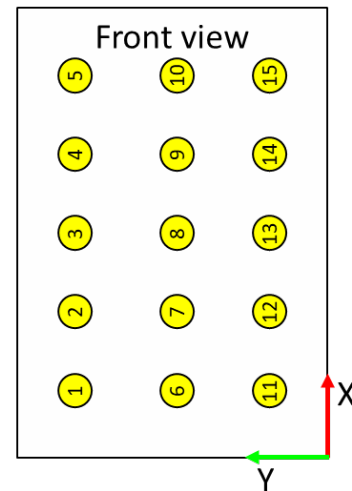
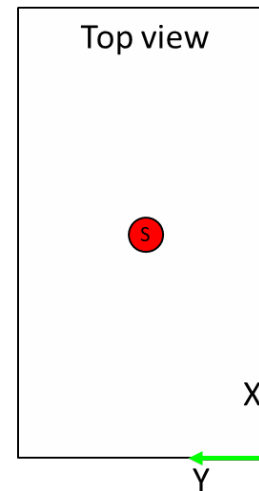
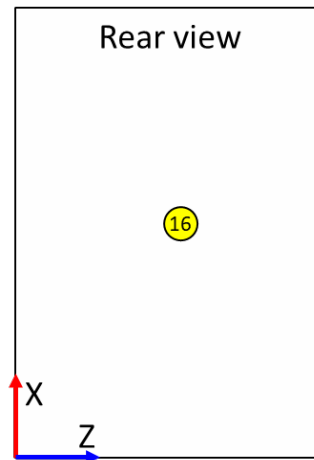
## Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau



# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

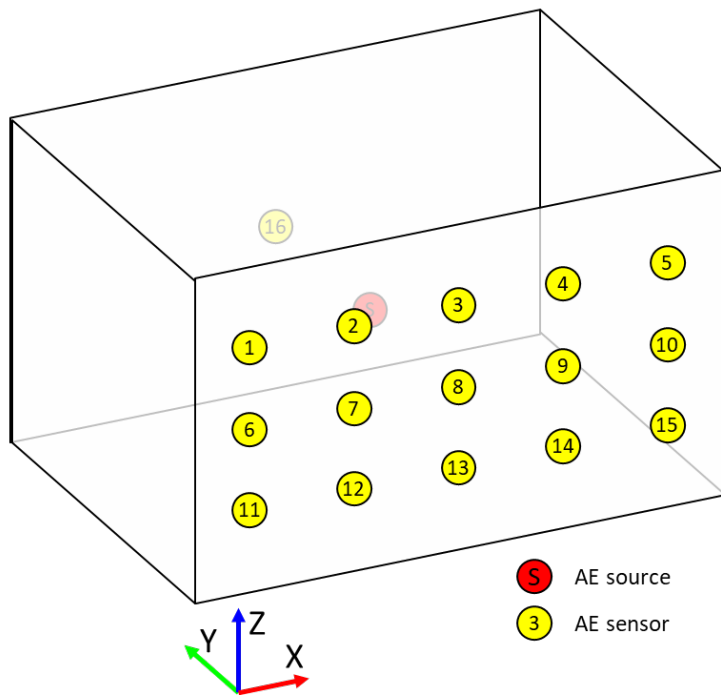


**S** AE source  
**3** AE sensor

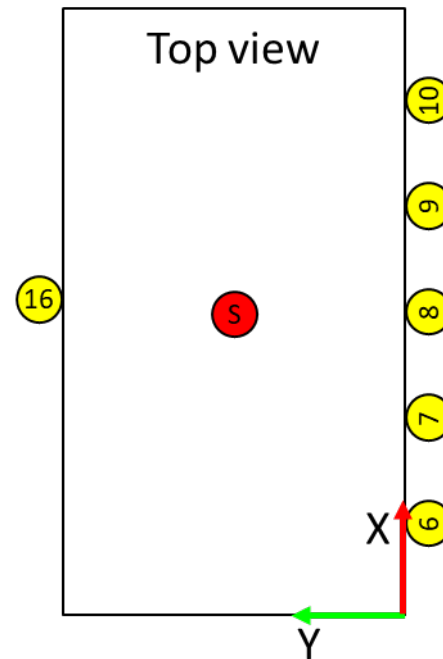


**S** AE source  
**3** AE sensor

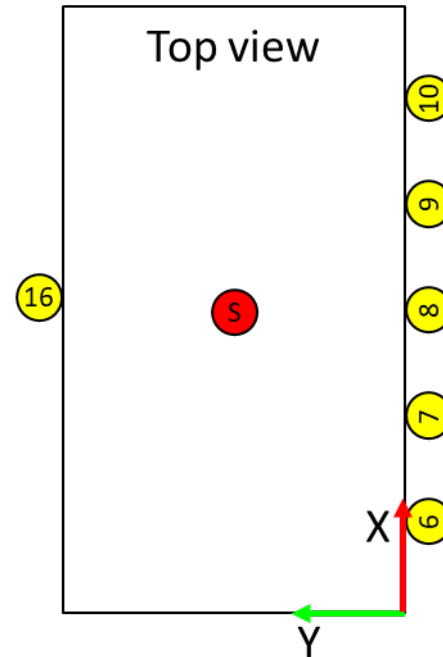
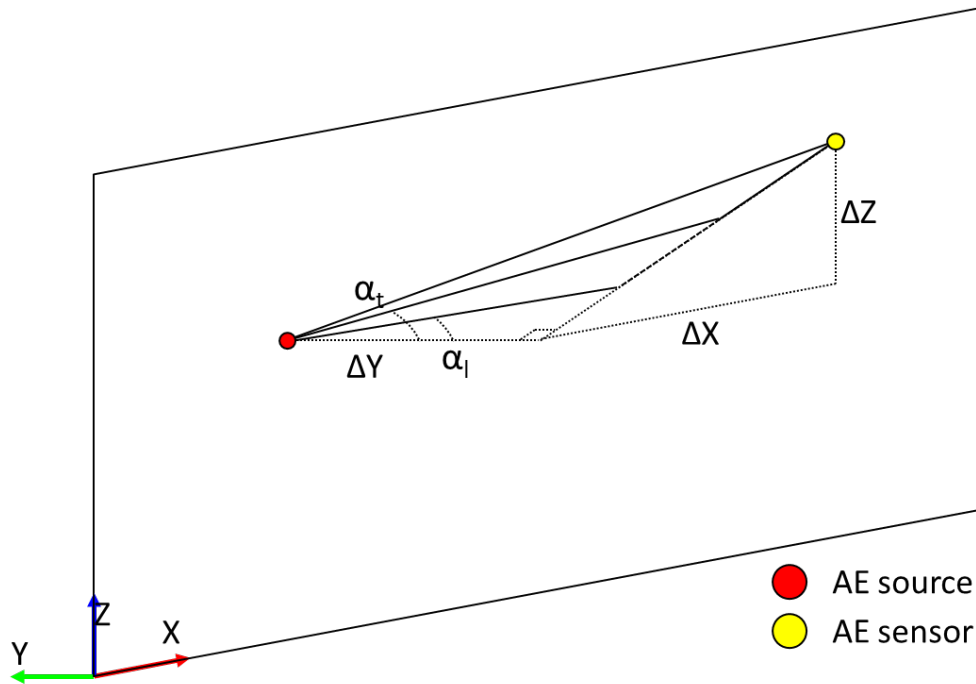
# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau



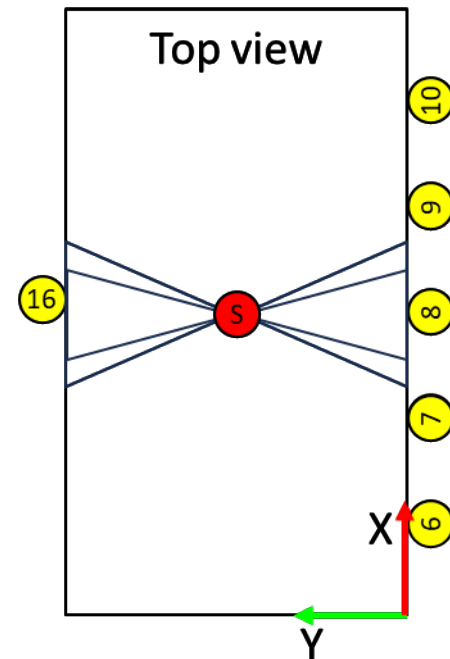
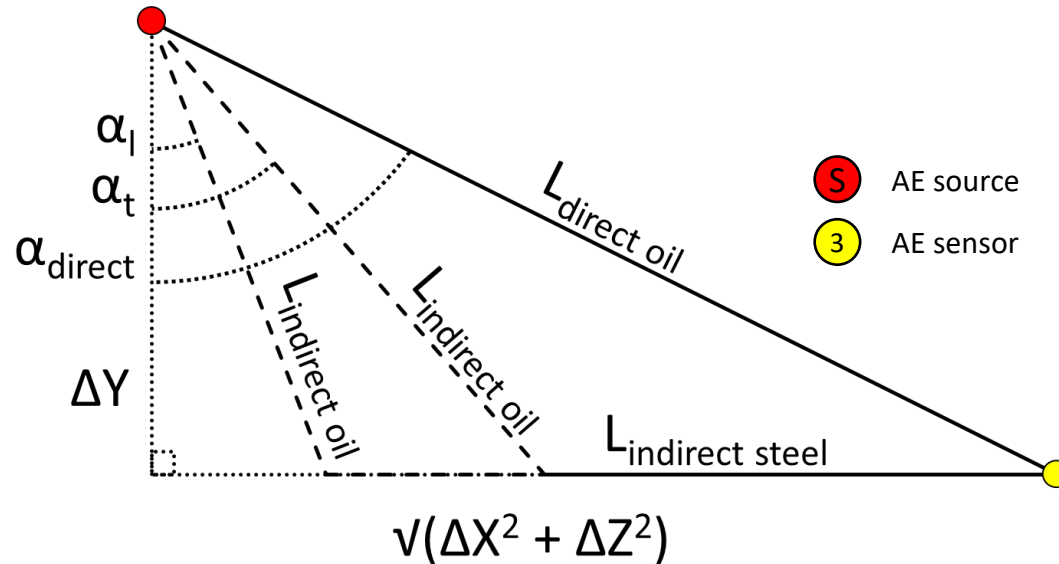
**S** AE source  
**3** AE sensor



# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau



# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

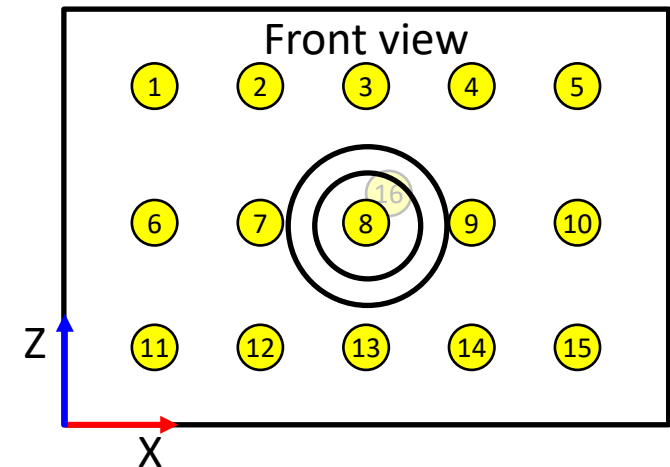
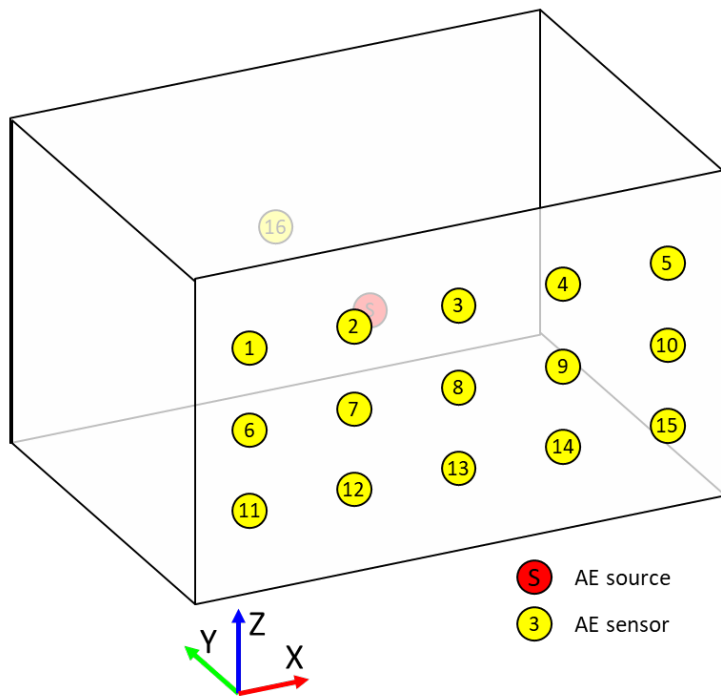


$$\alpha_t = \arcsin\left(\frac{v_{\text{oil}}}{v_{\text{transversal}}}\right) = \arcsin\left(\frac{1400 \text{ m/s}}{3500 \text{ m/s}}\right) = 23.6^\circ$$

$$\alpha_l = \arcsin\left(\frac{v_{\text{oil}}}{v_{\text{longitudinal}}}\right) = \arcsin\left(\frac{1400 \text{ m/s}}{5800 \text{ m/s}}\right) = 14.0^\circ$$

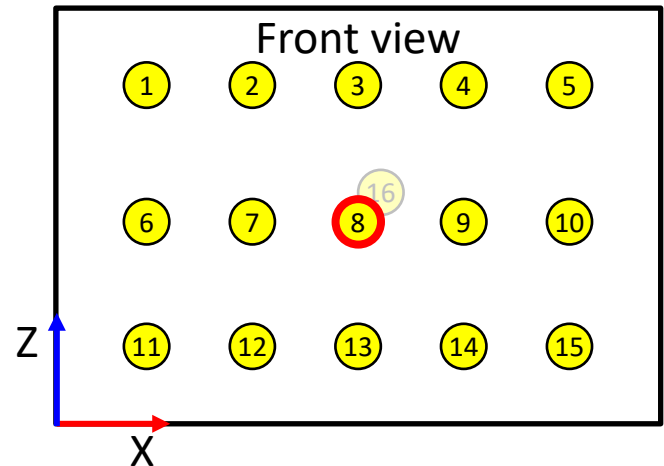
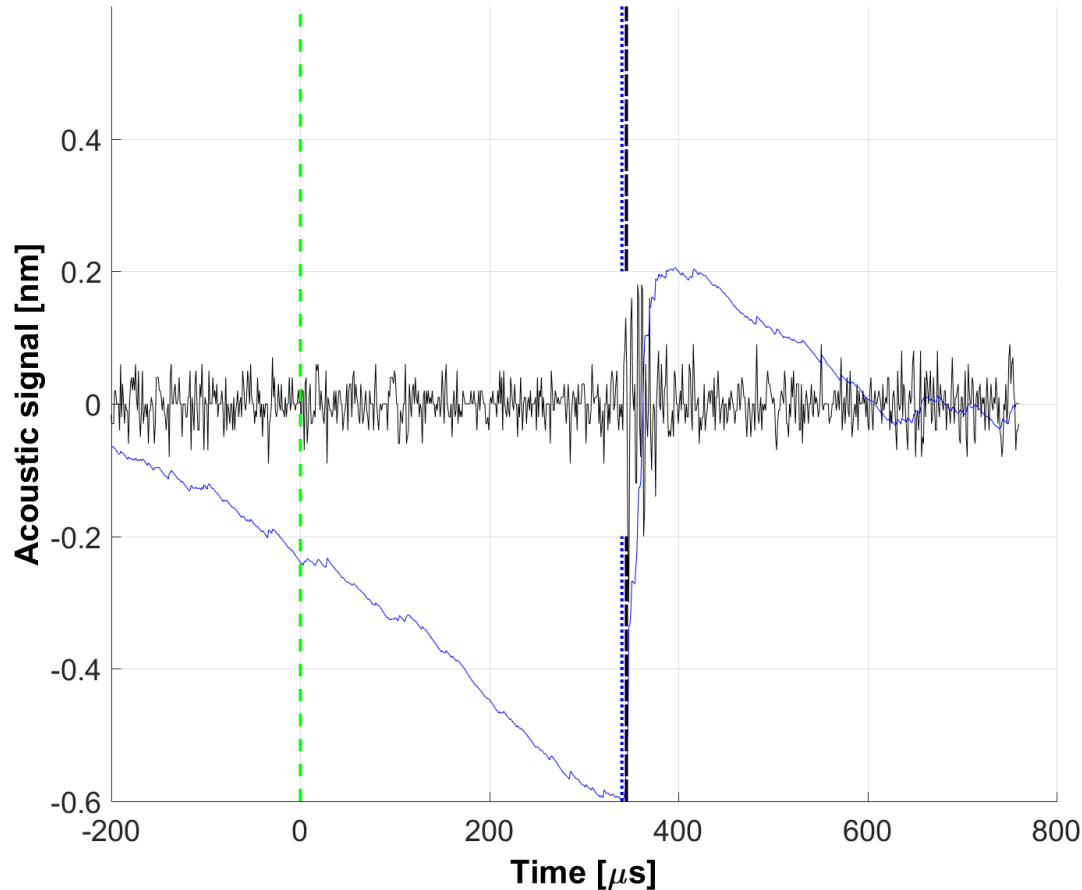
# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

- Alle Entfernungen sind bekannt
- Es werden sowohl die TOA über den direkten als auch über den indirekten Pfad berechnet



# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

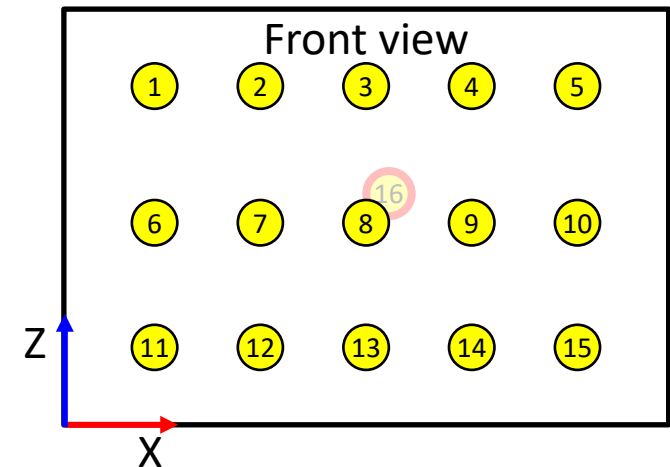
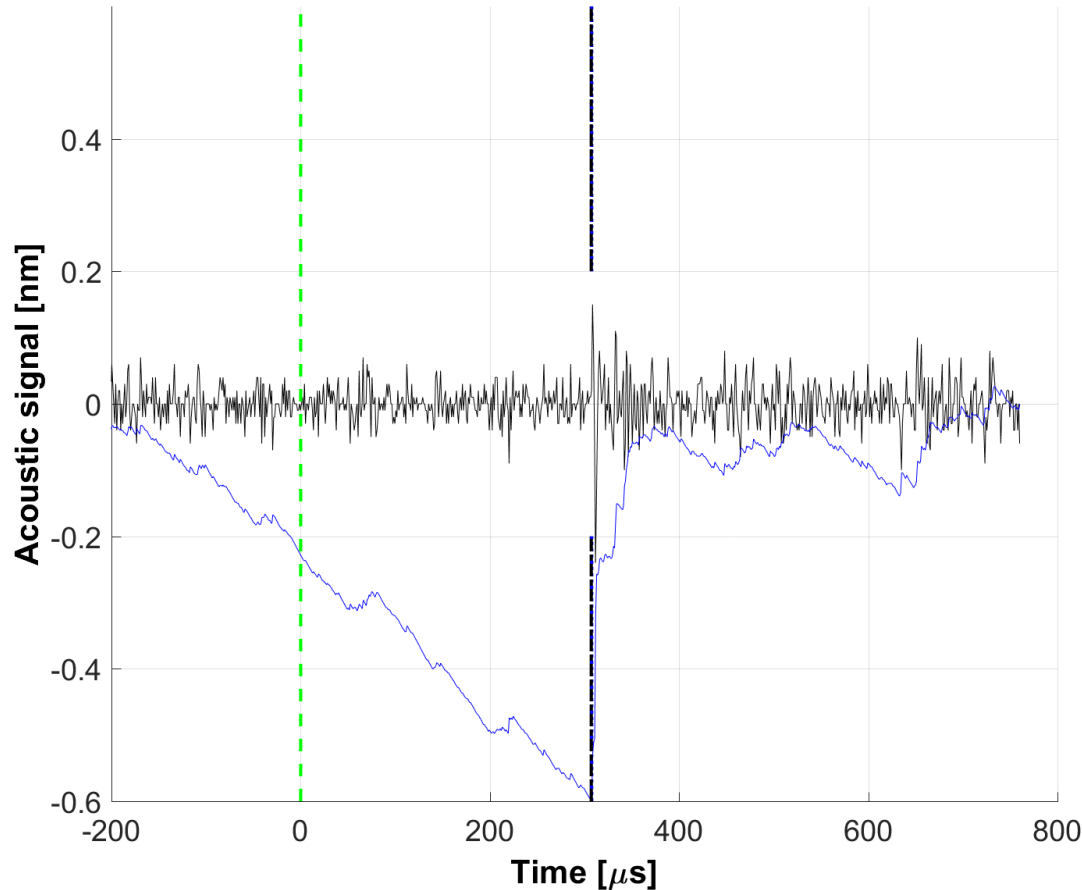
Sensor nr.:8



- - - Direkter TOA-Pfad
- ..... TOA Energiebasiert
- ..... TOA indirekte Transversalwelle
- . . . TOA indirekte Longitudinalwelle

# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

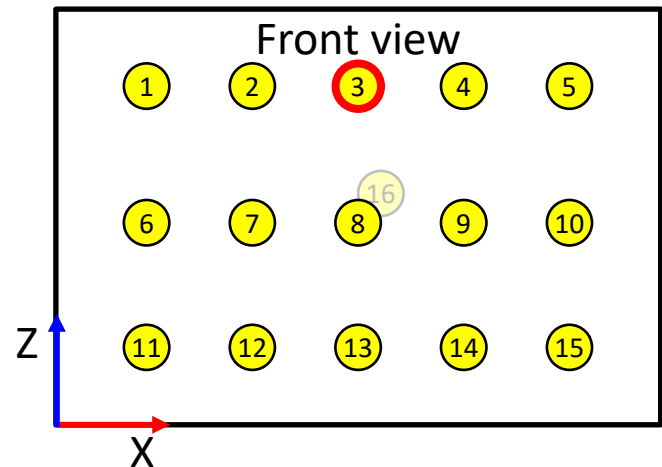
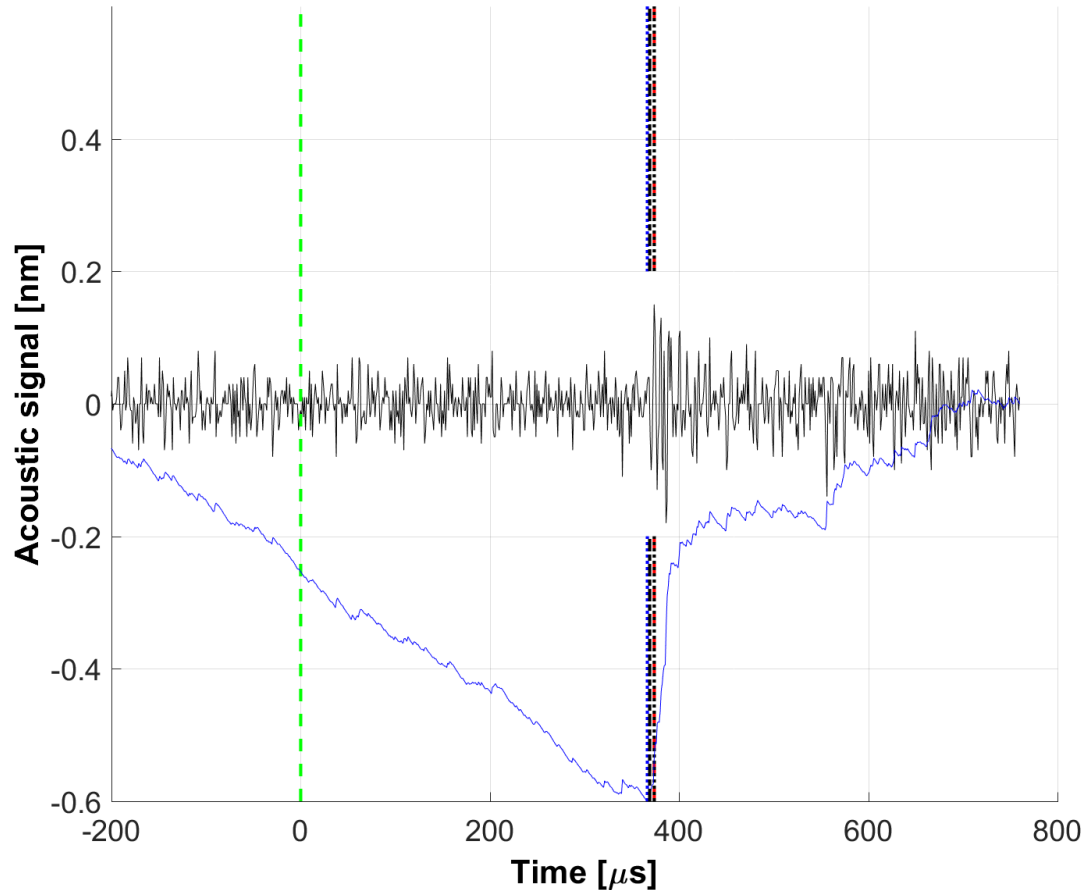
**Sensor nr.:16**



- - - - - Direkter TOA-Pfad
- ..... TOA Energiebasiert
- ..... TOA indirekte Transversalwelle
- . . . . TOA indirekte Longitudinalwelle

# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

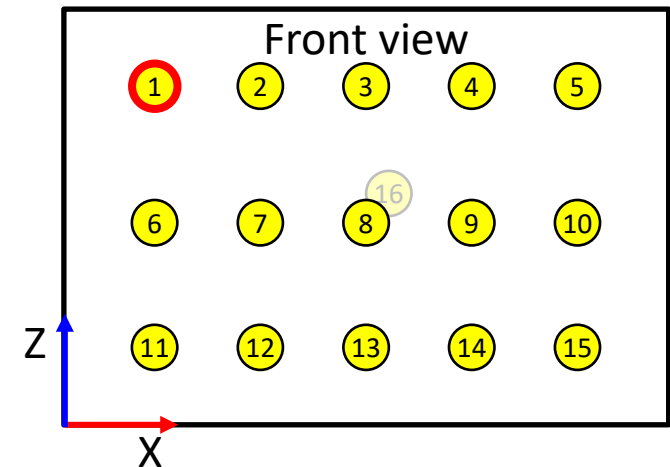
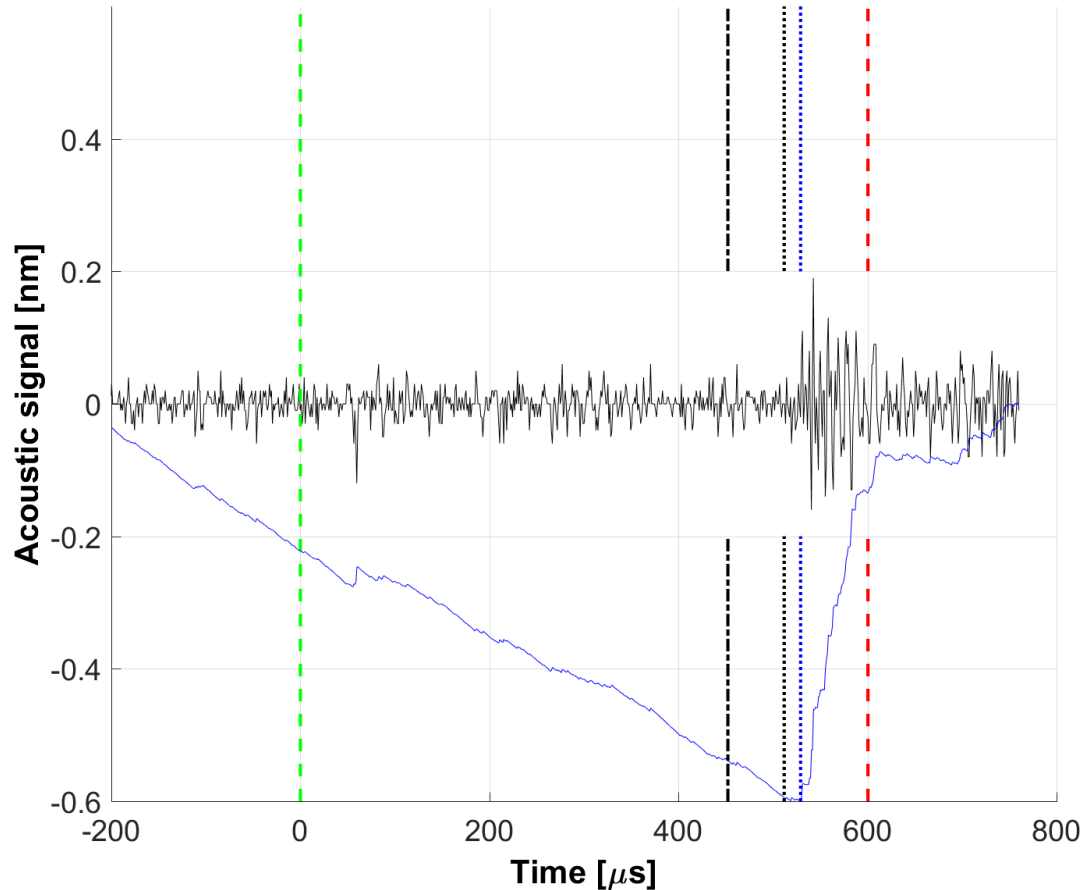
Sensor nr.:3



- - - - - Direkter TOA-Pfad
- ..... TOA Energiebasiert
- ..... TOA indirekte Transversalwelle
- . . . . TOA indirekte Longitudinalwelle

# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

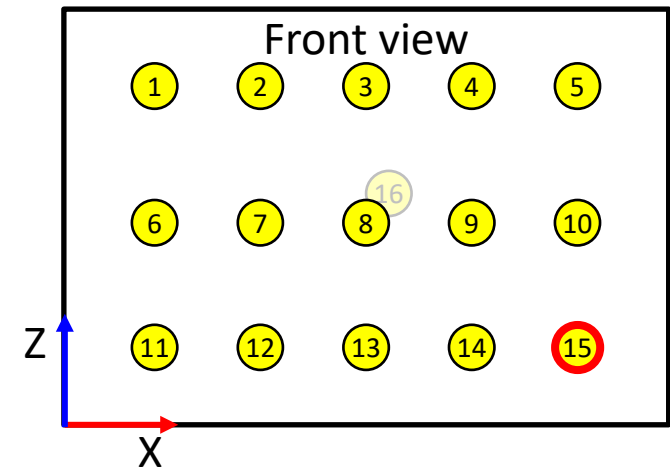
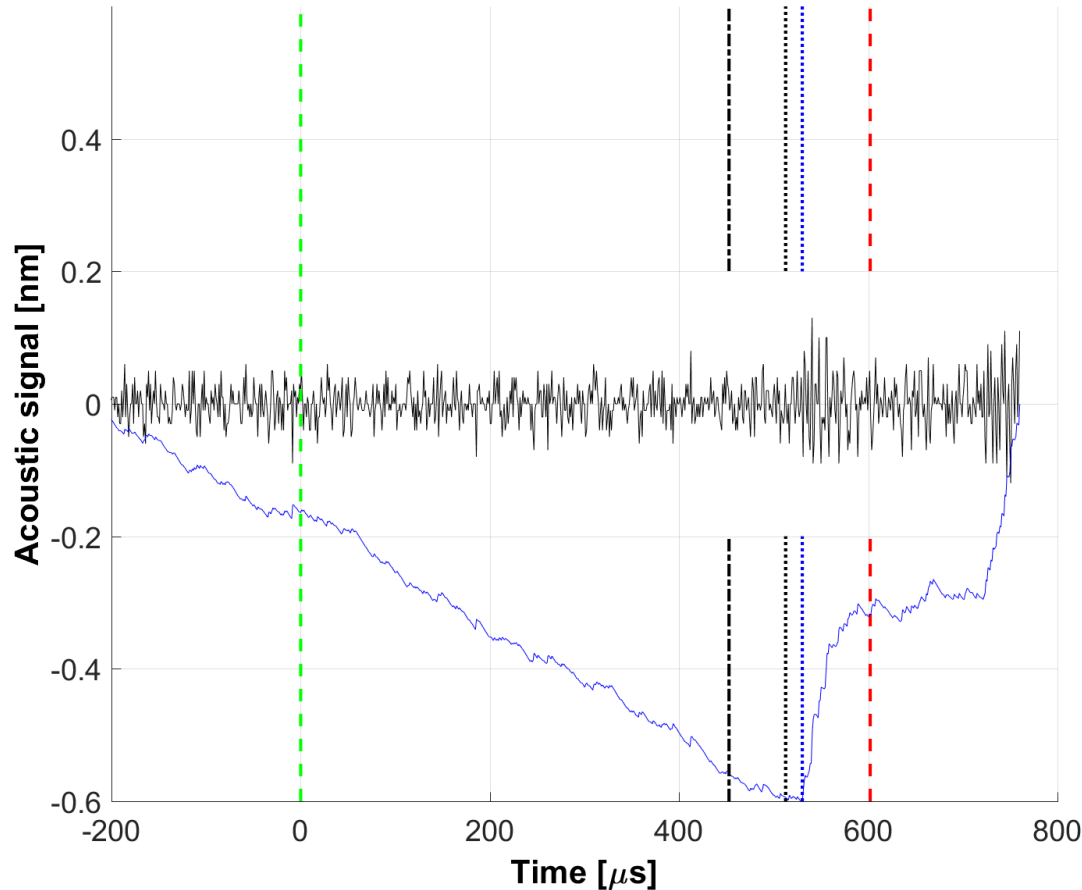
Sensor nr.:1



- Direkter TOA-Pfad
- TOA Energiebasiert
- TOA indirekte Transversalwelle
- TOA indirekte Longitudinalwelle

# Neuartiger akustischer Sensor – Spezieller Testaufbau

**Sensor nr.:15**



- Direkter TOA-Pfad
- ..... TOA Energiebasiert
- ..... TOA indirekte Transversalwelle
- TOA indirekte Longitudinalwelle

## Neuartiger akustischer Sensor – Schlussfolgerungen

- Längswelle im Stahl wird nicht erkannt
- Für eine korrekte TOA-Bestimmung: Sensor innerhalb des „Kegels“, bestimmt durch

$$\alpha_{transversal} = \arcsin\left(\frac{v_{oil}}{v_{transversal}}\right) = \arcsin\left(\frac{1400m/s}{3500m/s}\right) = 23.6^\circ$$

- Wenn außerhalb dieses Kegels: TOA-Fehler wird aufgrund des indirekten Pfads eingeführt
- Wie finde ich PD?

## PD-Lokalisierung – Anwendungsfälle

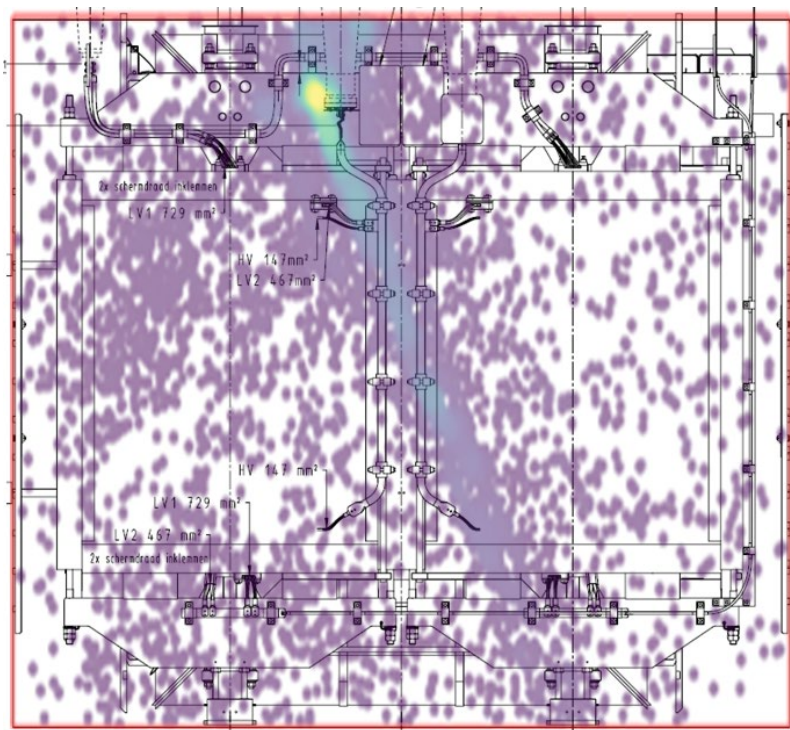
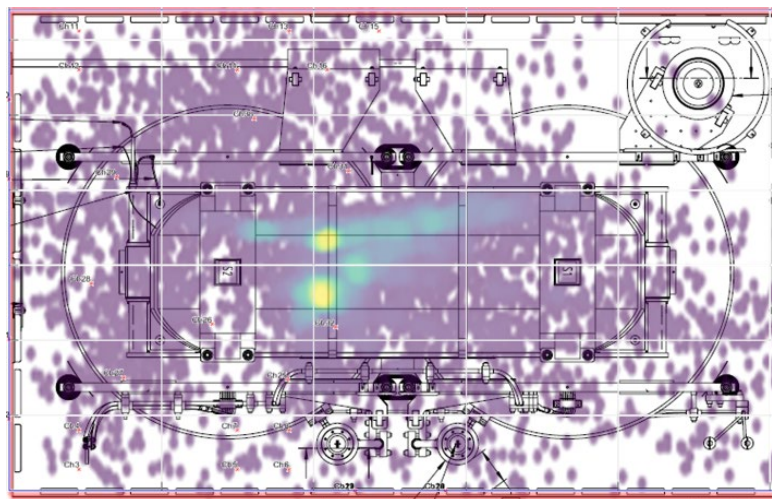
- Zur Standortbestimmung sind mindestens 4 akustische Signale erforderlich
- Mit 16 oder 32 Sensoren, viele Kombinationen von 4 Sensoren
- Viele Lokalisierungsberechnungen pro aufgezeichnetem TE-Signal
- Es werden ausschließlich akustische Signale verwendet

## Anwendungsfall – Single phase, 480MVA, 500/230kV, <300pC

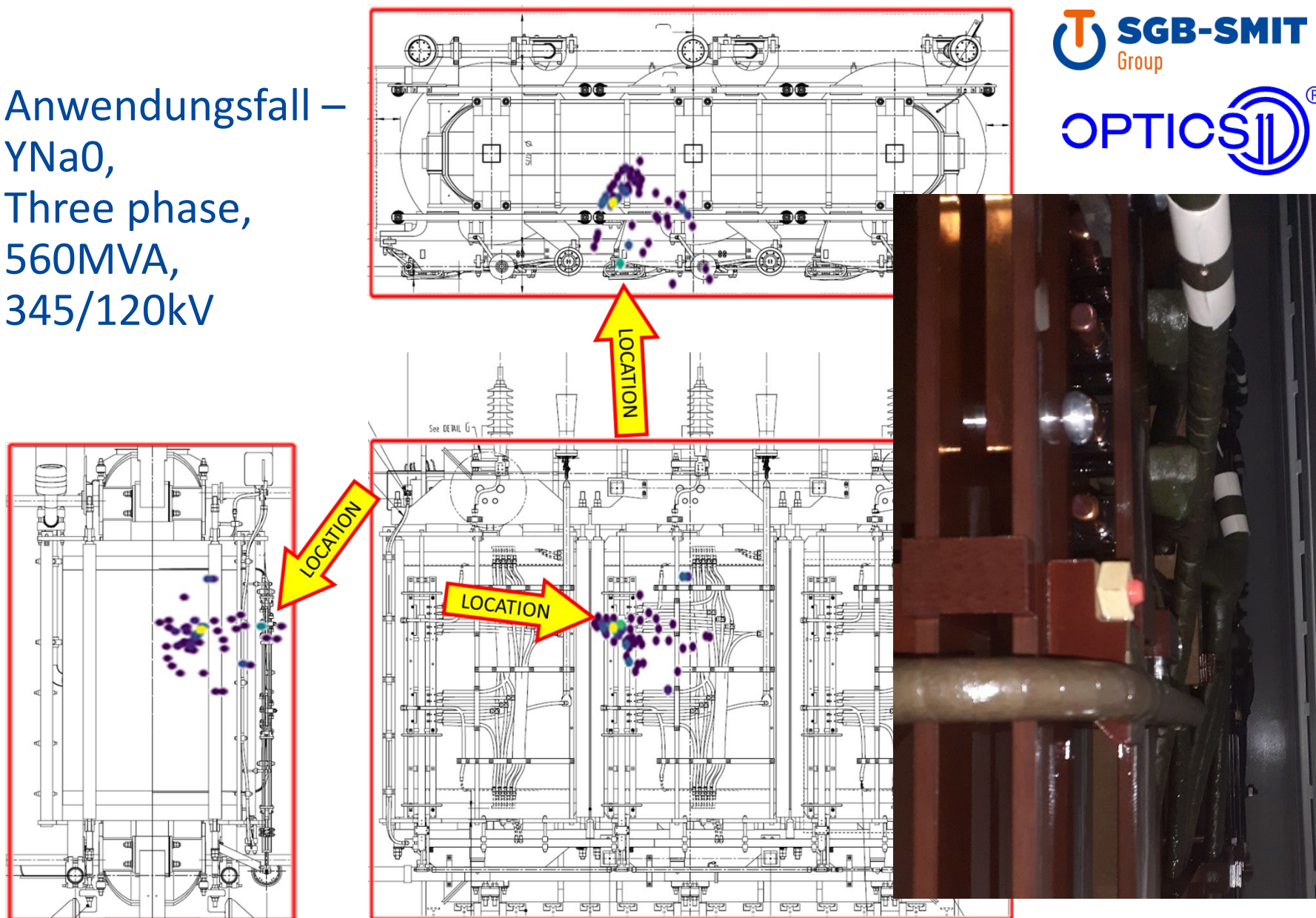


Anwendungsfall –  
Single phase,  
480MVA,  
500/230kV,  
<300pC

Single phase  
480MVA  
500/230kV



Anwendungsfall –  
YNa0,  
Three phase,  
560MVA,  
345/120kV



## Schlussfolgerungen

- Der neuartige, vollständig faseroptische Akustiksensoren eignet sich zur Erkennung akustischer Emissionen und zur Lokalisierung von TE in großen Leistungstransformatoren
- TOA von AE-Sensoren muss mit Vorsicht interpretiert werden
- Die Verwendung von  $> 4$  Sensoren ermöglicht eine bessere Kombinatorik und bessere Statistiken über den identifizierten TE-Standort
- Aktuelle Ergebnisse bedürfen noch der Interpretation durch geschulte Experten

## Ausblick

Derzeit wird daran gearbeitet :

- Verbesserung der Software: Messung auch für Laien zugänglich
- Verwenden Sie Auslöser:
  - Aktivieren Sie PRPD
  - Mittelung aktivieren
  - Erhöhen Sie die Standortgenauigkeit
- Erkennen Sie Fehler auch bei anderen Tests,
  - mehrere erfolgreiche Fälle in den letzten 2 Jahren
- Prüfung vor Ort
  - In den letzten 2 Jahren wurden mehrere erfolgreiche Vor-Ort-Untersuchungen durchgeführt
- Transformator zur Überwachung des Betriebszustands
  - Der erste Pilotversuch wurde 2023 erfolgreich abgeschlossen

Fragen?

# Content

- Transformer health
- Novel acoustic sensor – fully fiber optic
- Partial discharge – acoustic detection
- Partial discharge – acoustic localization
- Outlook