

A photograph of a large tunnel under construction. The tunnel is illuminated by bright lights, and a person in a green safety suit is visible in the distance. The tunnel walls are made of concrete segments, and a large cylindrical structure is visible in the center.

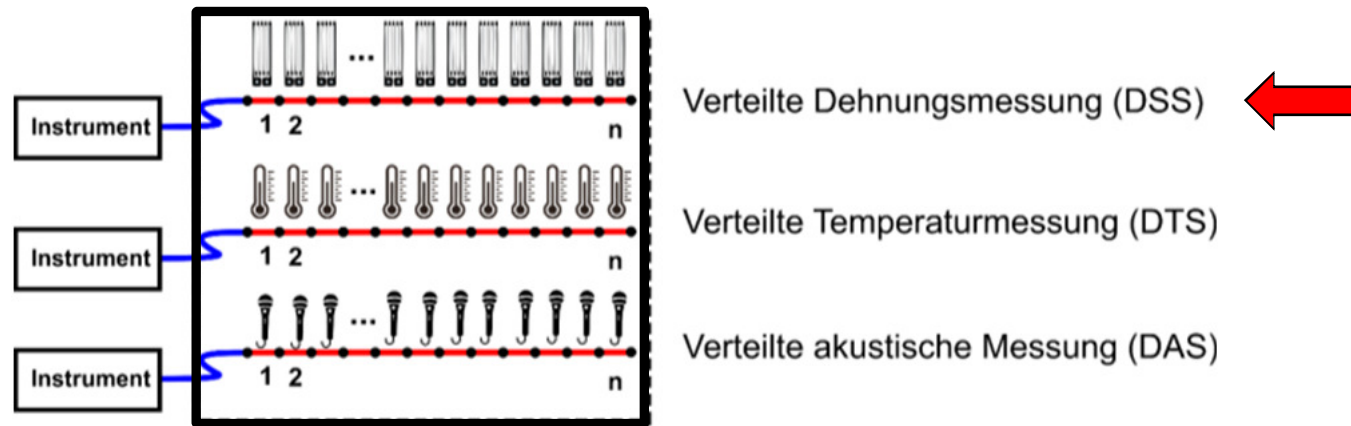
# Faseroptische Sensorik im Tunnelbau

W. Lienhart

# Faseroptische Messungen

## Potential

- 1 Faser => unterschiedliche Möglichkeiten



## DSS - Verteilte faseroptische Dehnungsmessung

- Lückenlose Erfassung von Dehnungen über lange Distanzen

# Konventionelle Überwachungsmessungen im Tunnelbau

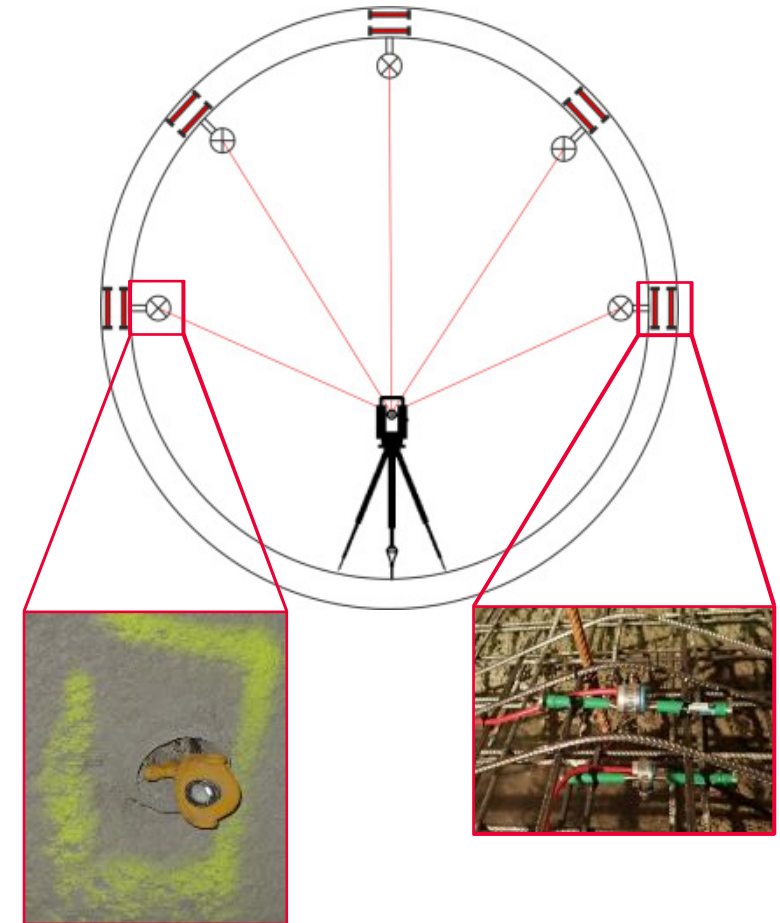
## Totalstationen

- 3D Koordinaten einzelner Prismen oder Reflextargets
- Direkte Sichtverbindung notwendig
- Keine direkte Informationen über interne Deformationen

## Dehnungsgeber (z.B. Schwingsaitensensoren)

- Messungen im Inneren der Tunnelschale
- Punktuelle Messung
- Zuleitungskabel für jeden einzelnen Sensor

→ Information über Deformationen nur an diskreten Punkten ableitbar



# Verteilte faseroptische Messungen im Tunnelbau

## Eigenschaften

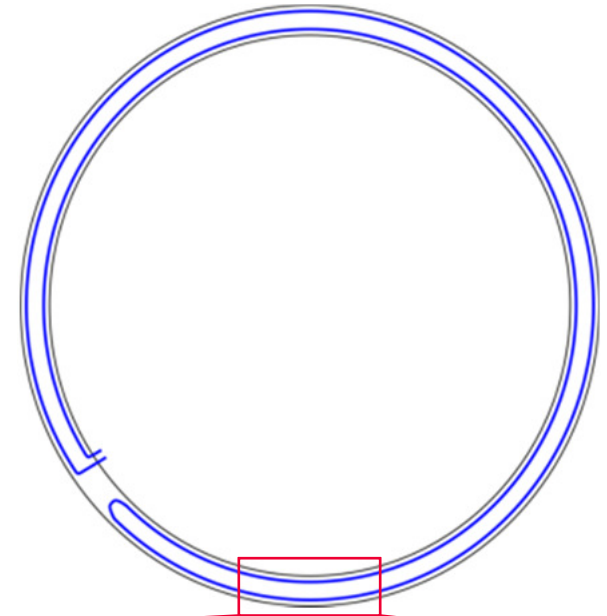
- Verteilte Messung entlang des gesamten Sensorkabels
- Realisierung tausender Messstellen mit einem einzigen Zuleitungskabel
- Hohe Ortsauflösung bis zu 10 mm  
=> 10.000 Messstellen bei 100 m Sensorkabel
- Hohe Messpräzision  $\leq 1 \mu\text{m/m}$  (= 1/1000 mm/m)

## Qualität der Messdaten

- Kalibrierung des faseroptischen Systems?

## Raue Umgebungsbedingungen

- Robustheit des faseroptischen Sensorkabels?
- Performance des faseroptischen Systems?



# IGMS Faseroptische Tunnelmonitoringprojekte

## Eisenbahntunnel

- Koralmtunnel
- Semmering Base Tunnel
- Tunnelkette Granitztal
- Zentrum am Berg



## Autobahntunnel

- Plabutschunnel
- Tauerntunnel



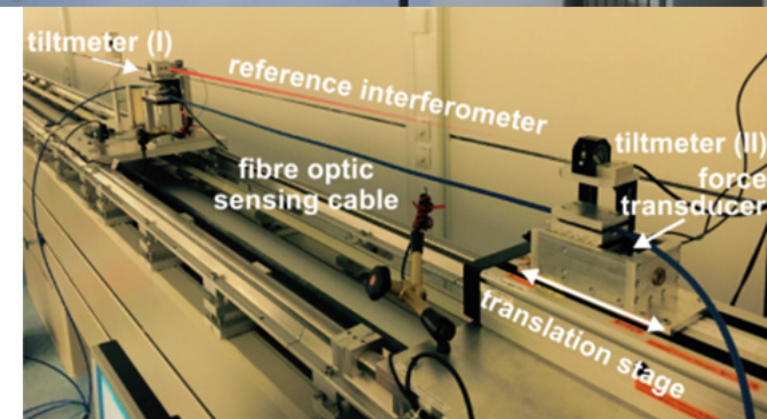
## Kalibrierungen im IGMS Messlabor

### Eigenschaften

- Vollklimatisiert
- Vibrationsisoliertes Fundament

### Faseroptische Kalibrieranlage

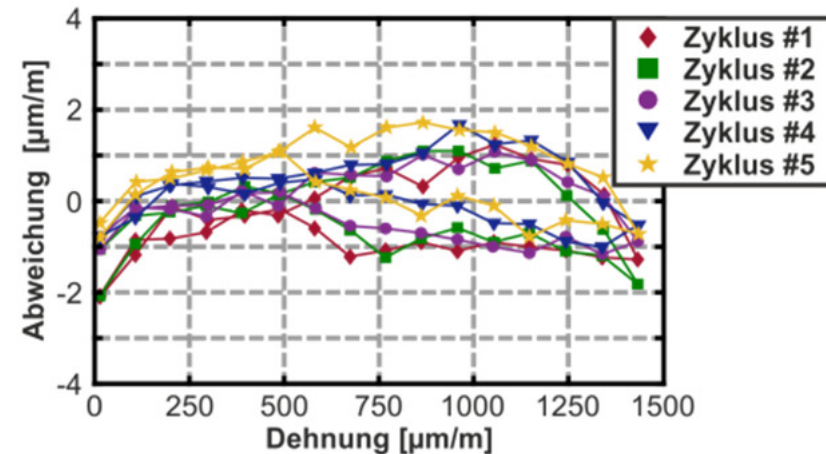
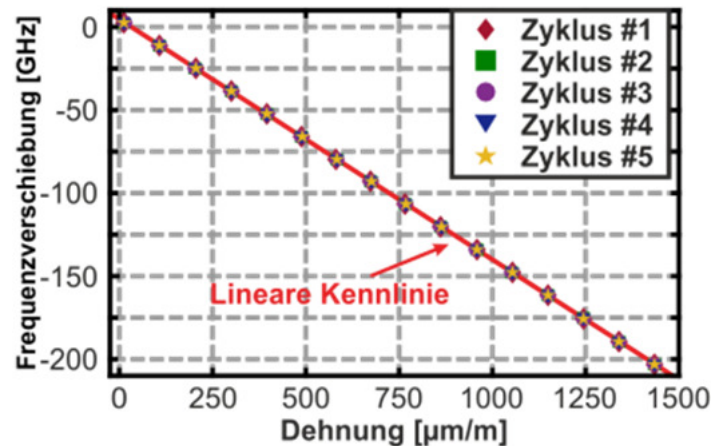
- Interferometrisches Referenzsystem
- Sensorlängen 0.1 bis 30 m
- Vollautomatische Kalibrierung
- Modularer Aufbau
  - Strain transducers (SOFO, FBG)
  - Blanke Fasern
  - Verteilte Sensorkabel



# Kennlinie eines Sensorkabels

## Datenerfassung

- Kalibrierung eines 2 m-Samples des Sensorkabels
- 5 Messzyklen in Stufenform
- Reproduzierbarkeit: Maximale Abweichung zwischen den Zyklen  $< 1.6 \mu\text{m/m}$
- Linearitätsabweichung: Differenzen zur linearen Kennlinie  $\pm 2 \mu\text{m/m}$



# Faseroptische Messungen im zyklischen Vortrieb



# Instrumentierung von Querschnitten im zyklischen Vortrieb

## Sensorinstallation

- Installation des Sensorkabels entlang beider Bewehrungsmatten
- Instrumentierung der Kalotte und Strosse/Sohle

## Messprogramm

- Start der Messungen unmittelbar nach dem Aufbringen des Spritzbetons
- Autonomes Monitoring über mehrere Wochen



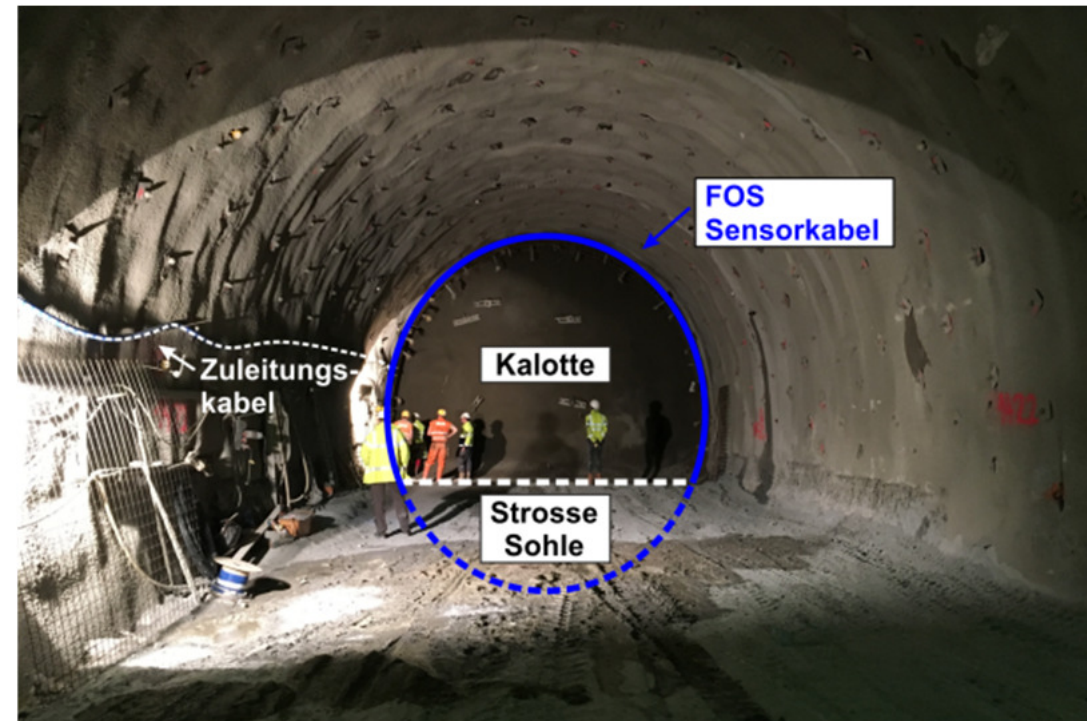
# Instrumentierung von Querschnitten im zyklischen Vortrieb

## Sensorinstallation

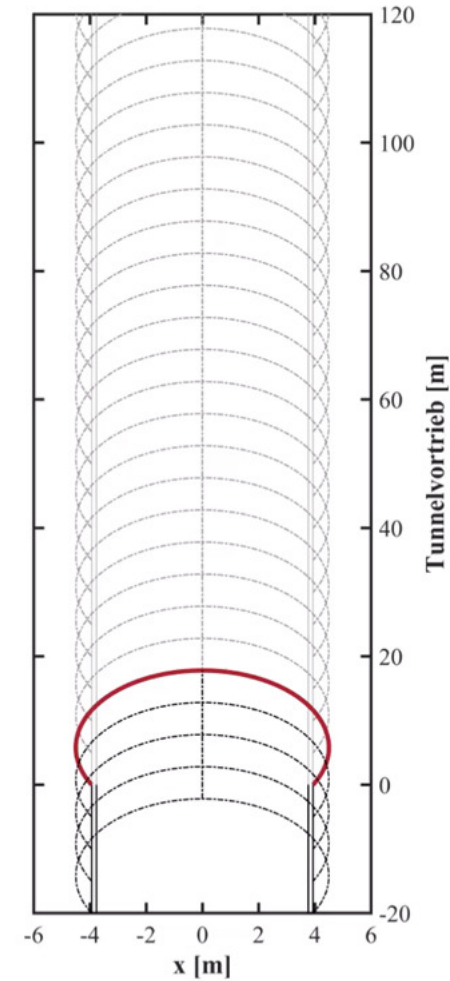
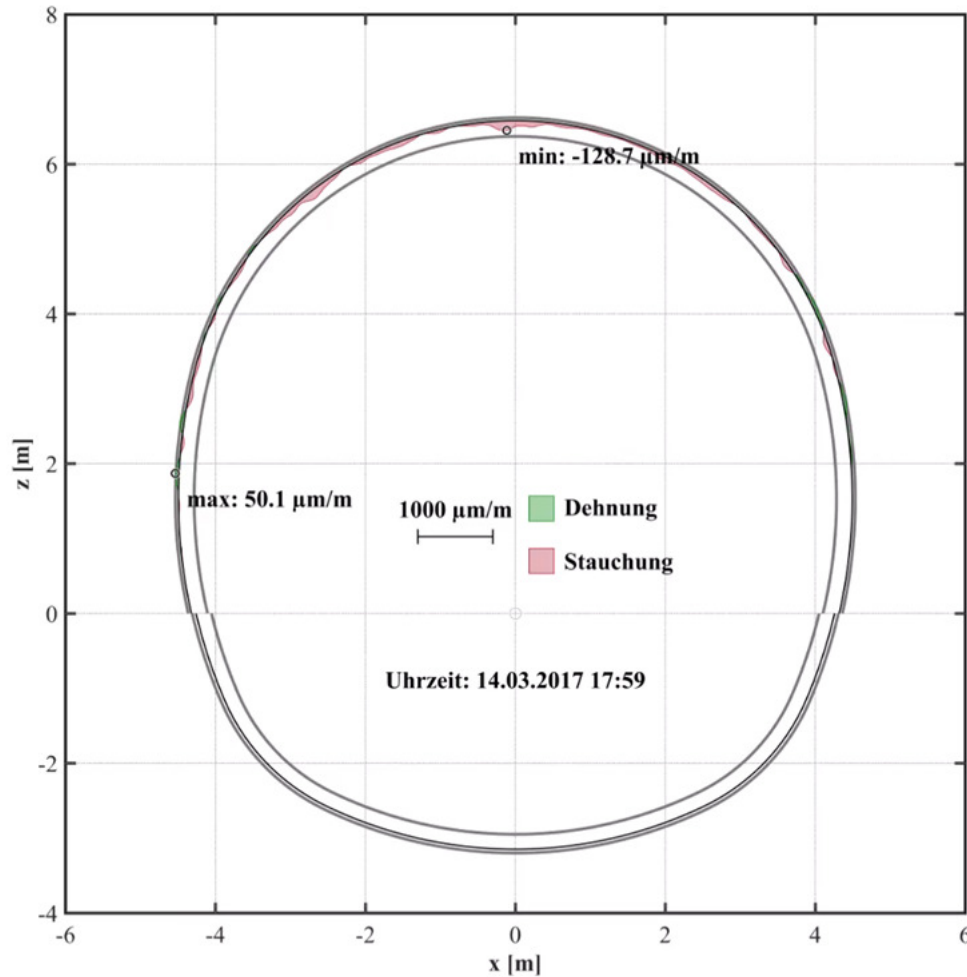
- Installation des Sensorkabels entlang beider Bewehrungsmatten
- Instrumentierung der Kalotte und Strosse/Sohle

## Messprogramm

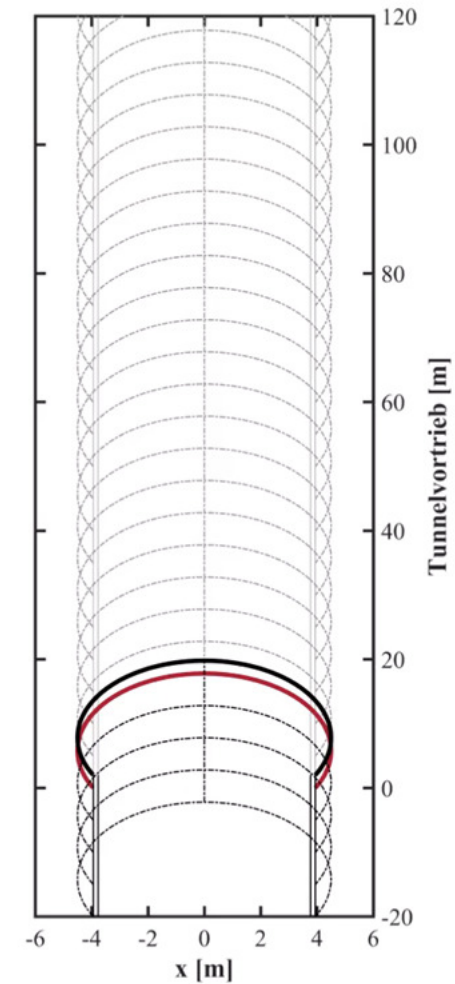
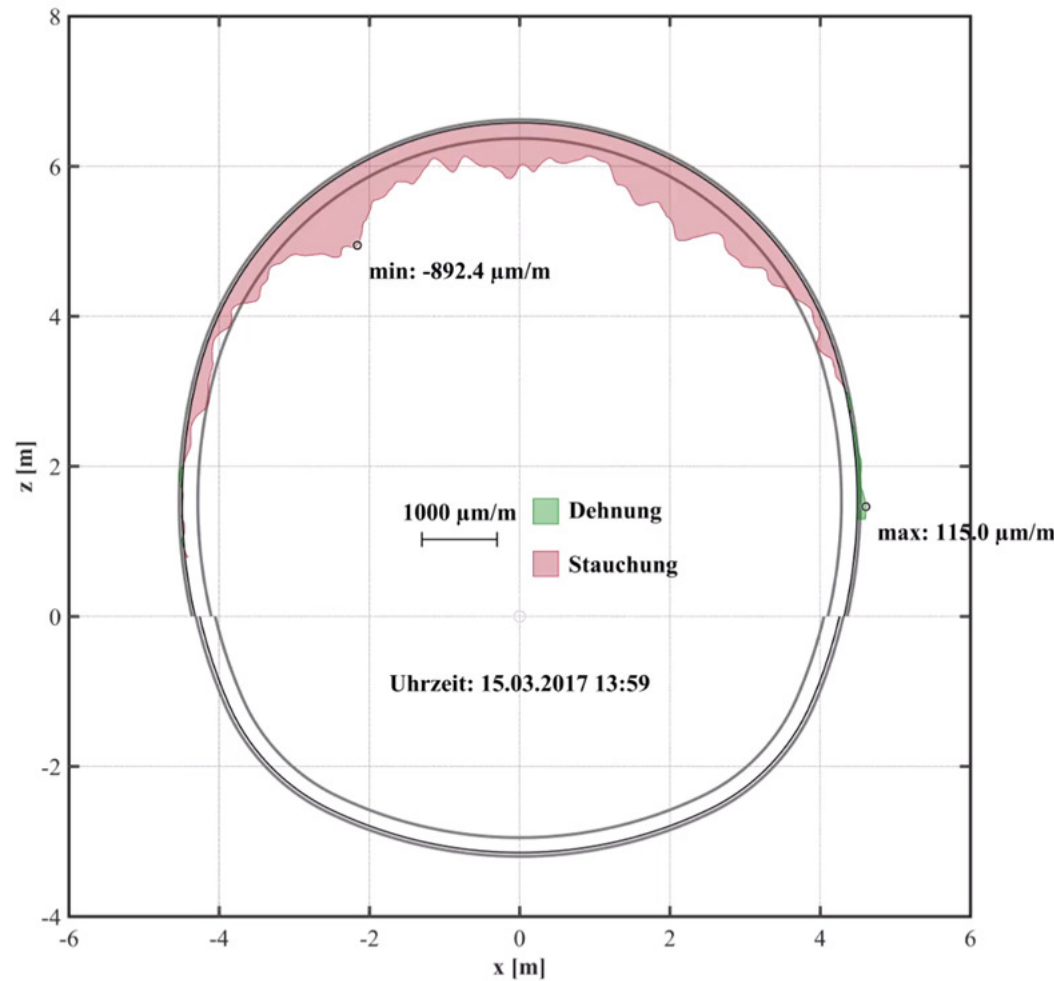
- Start der Messungen unmittelbar nach dem Aufbringen des Spritzbetons
- Autonomes Monitoring über mehrere Wochen



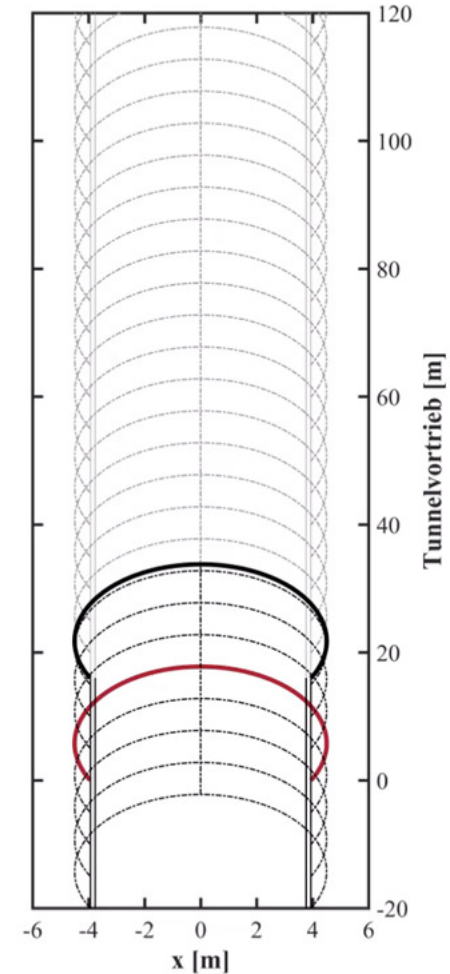
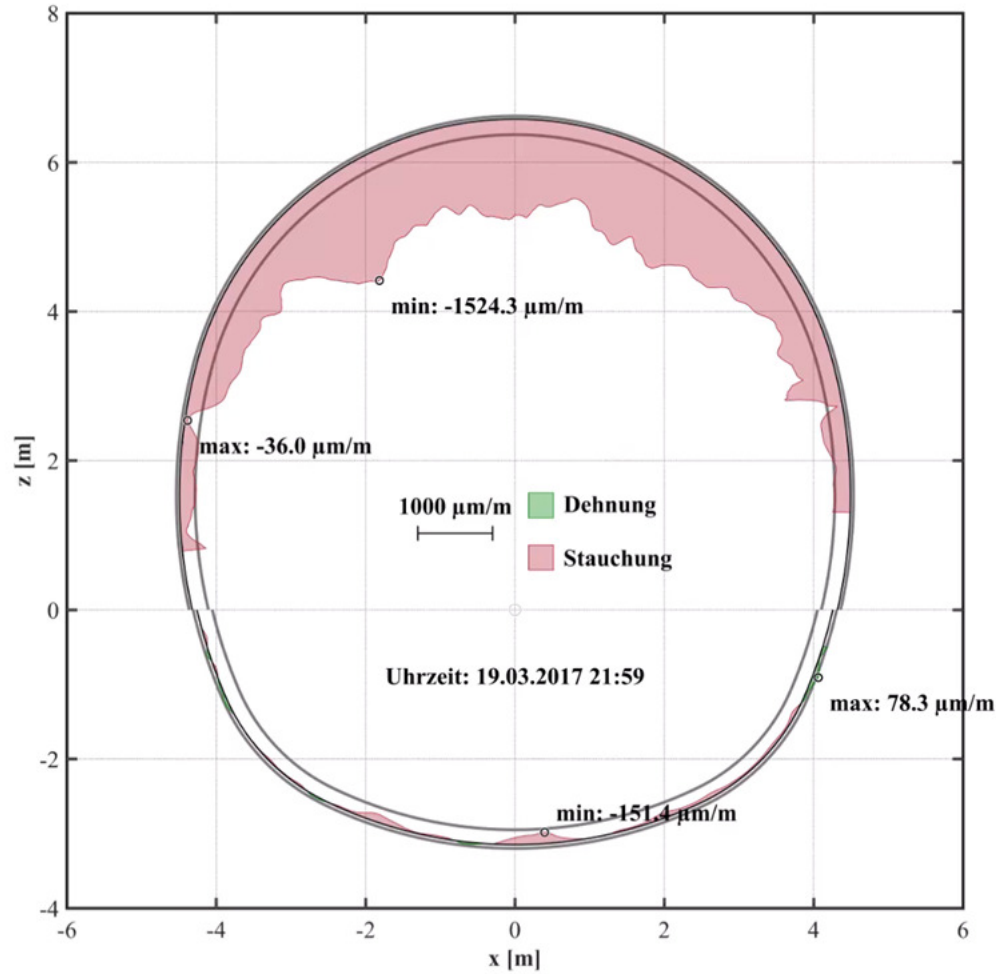
# Dauermessung – Messquerschnitt im zyklischen Vortrieb



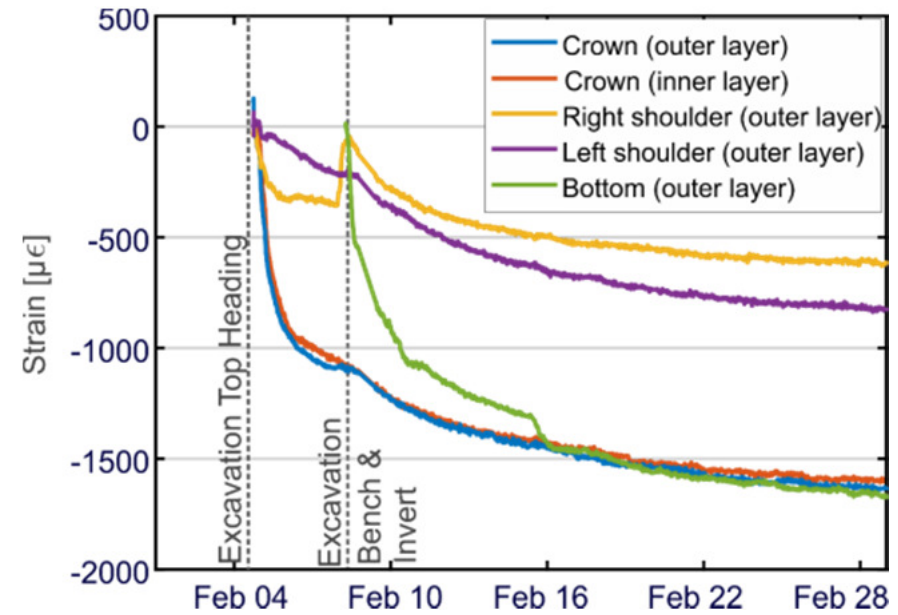
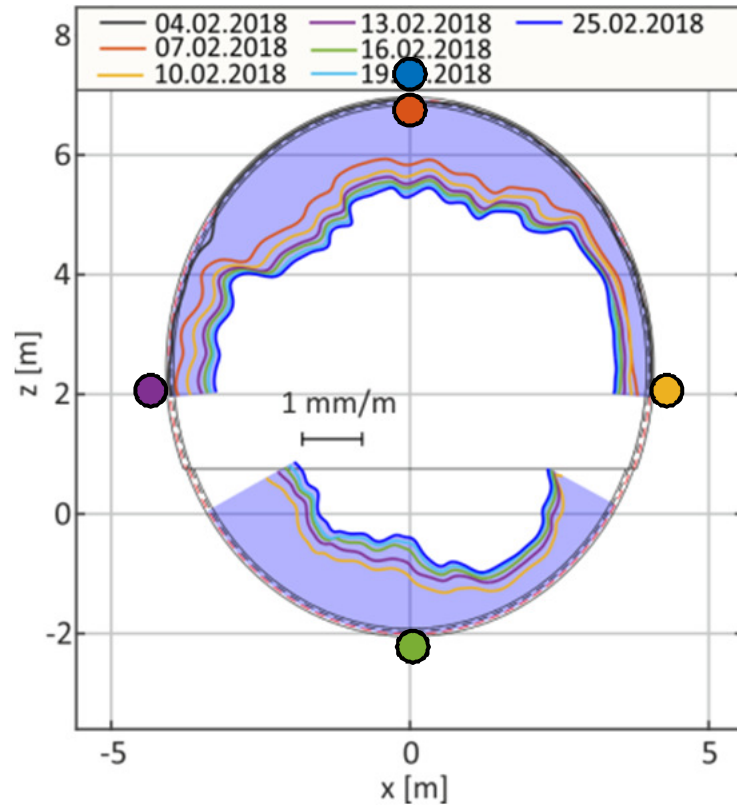
# Dauermessung – Messquerschnitt im zyklischen Vortrieb



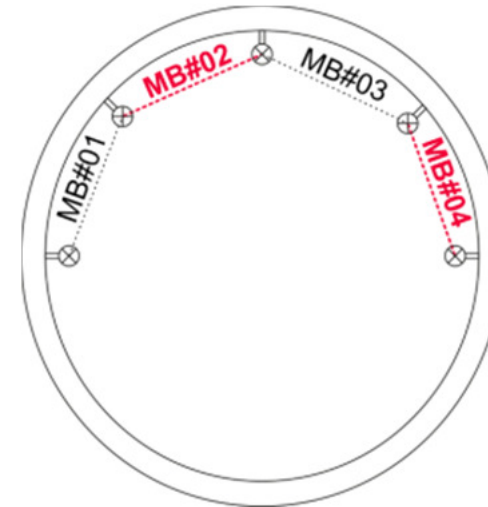
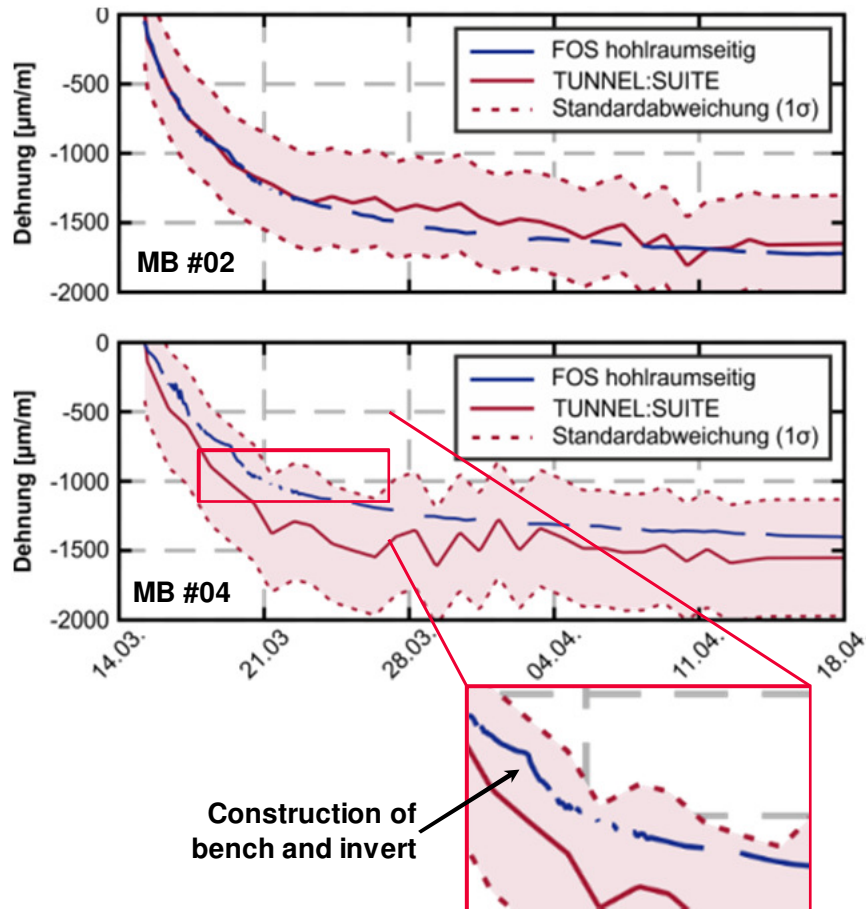
# Dauermessung – Messquerschnitt im zyklischen Vortrieb



# Zeitliche Entwicklung der Dehnungen



# Vergleich mit konventionellen Messungen



## Ergebnis

- Gute Übereinstimmung zw. Den unterschiedlichen Technologien
- Mehr Details in DFOS Messungen aufgrund der besseren Messpräzision erkennbar

# Automatisierung

## Automatische Auswertung mit

- Automatischen Alarming und
- Automatischen Reporting

**ALARMINGS at:**

	Fibermeter [m]	Strain [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Bending Radius [m]	GK_M34 [m]
LEFT	Left	433.5219	-1310	Horiz. 257 X -45159.4315
	Top	1582.859	-164	Vert. -336 Y 273952.4549
	Right	2732.962	-13	

**Recovered ALARMINGS at:**

	Fibermeter [m]	Strain [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Bending Radius [m]	GK_M34 [m]
LEFT	Left	223.2057	246	Horiz. NaN X -45090.5125
	Top	1372.543	100	Vert. NaN Y 274143.7567

**Faseroptisches Pipelinemonitoring Sommerau**  
Wochenbericht KW32/2019

**Kapitel 1. Einleitung**

**Kapitel 3. Ergebnisse**

**Langzeitbeobachtung**

Zeitraum	Anzahl
1	Keine Position
2	Eine Position
3	Keine Position
4	Eine Position
5	2 Positionen
6	Keine Position



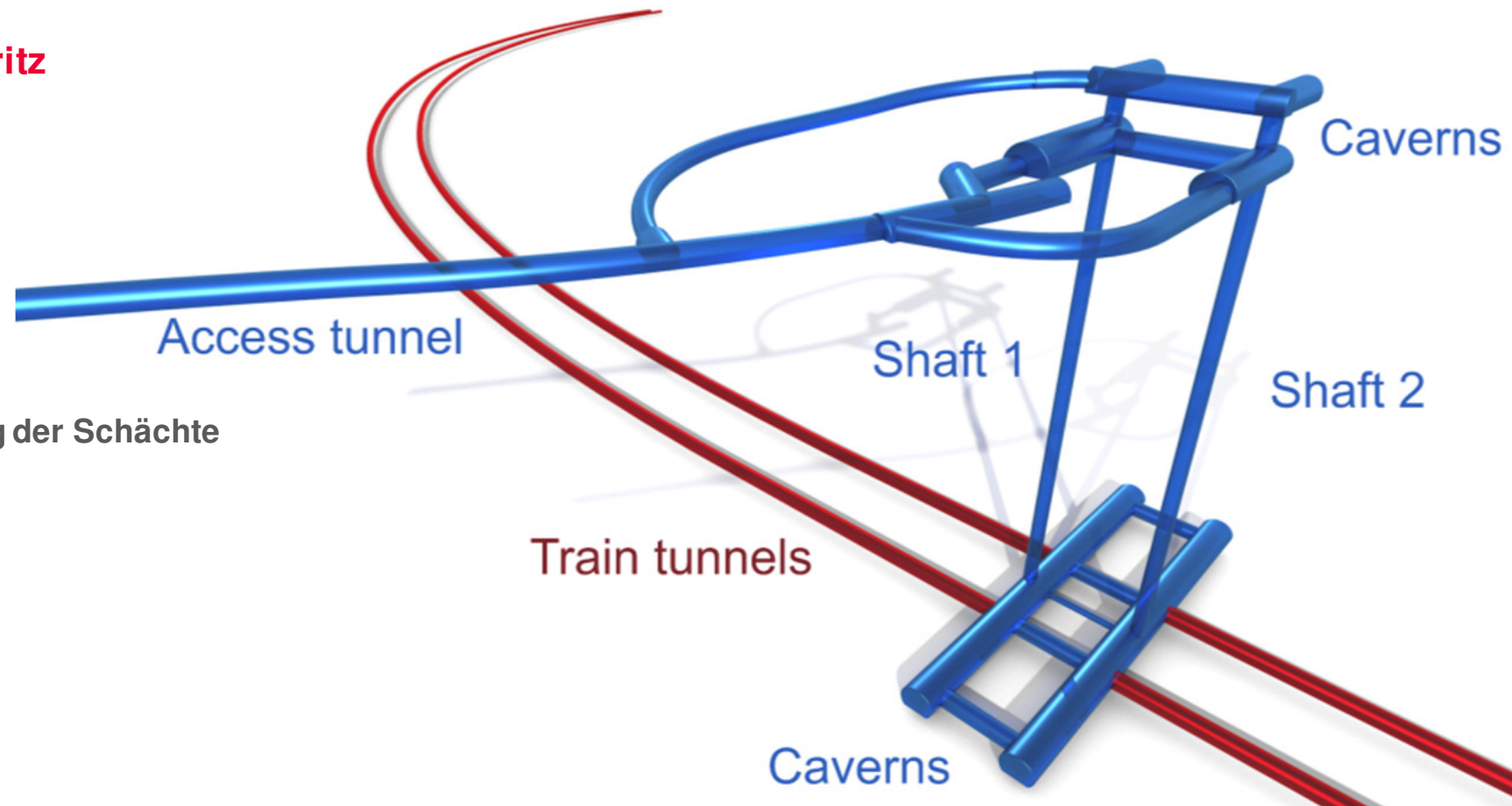
## Messungen in Schächten

### Zwischenangriff Göstritz

- Zugangstunnel 1 km
- 2 Schächte < 200 m

### Zielsetzung

- Langzeitüberwachung der Schächte



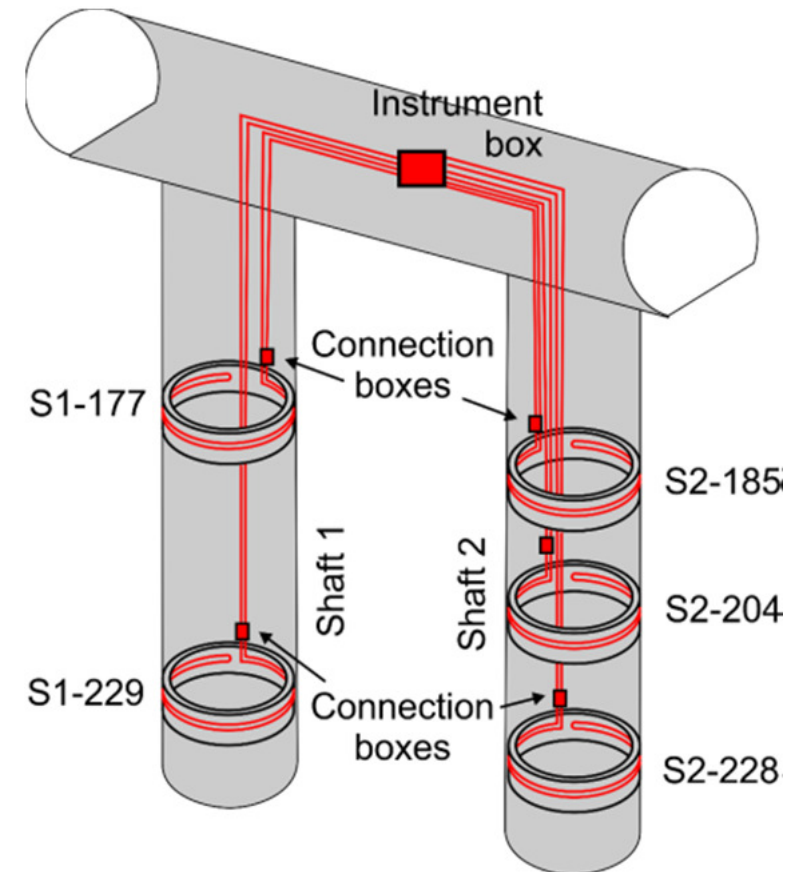
# Faseroptisches Messkonzept

## Messquerschnitte

- Mehrere Querschnitte mit Sensorkabel
- Pro Messquerschnitt Dehnungs- und Temperaturkabel
- Sensorkabel in beiden Spritzbetonlagen

## Messdurchführung

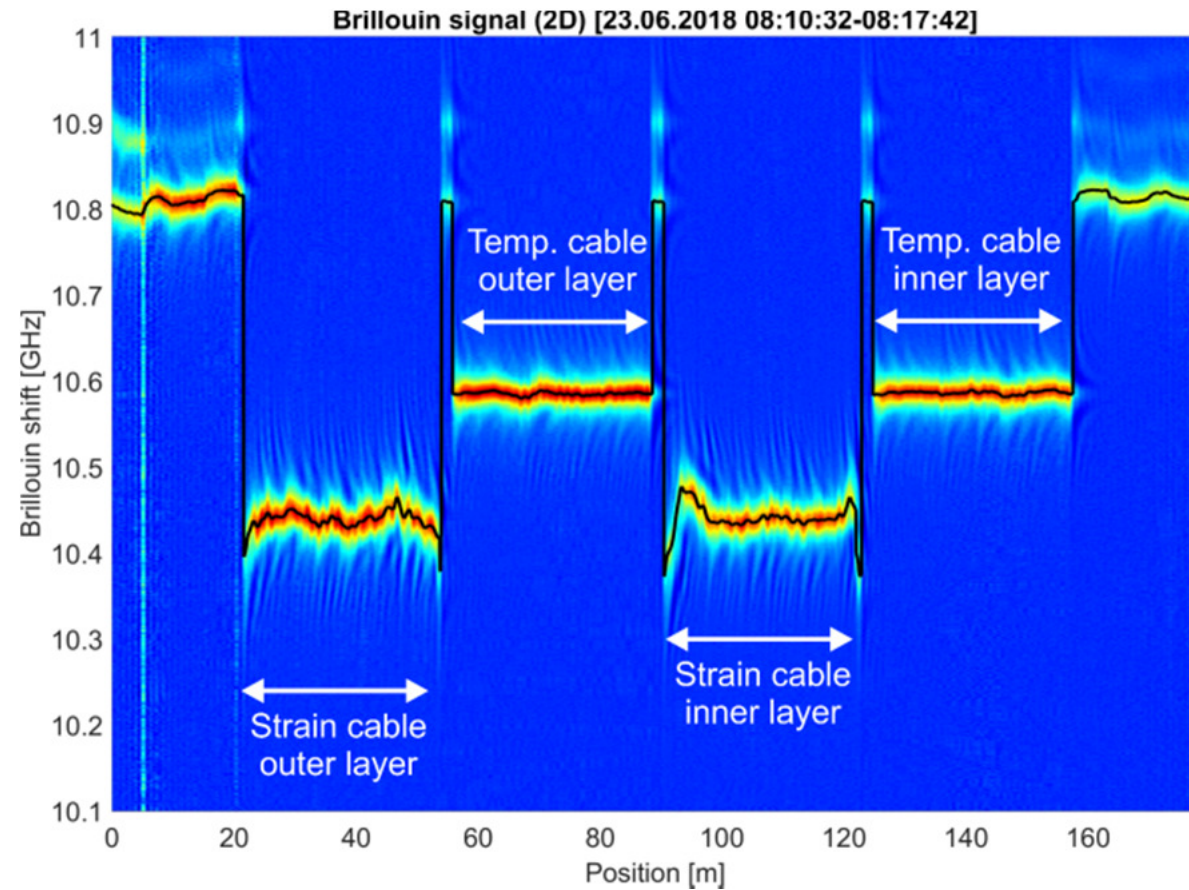
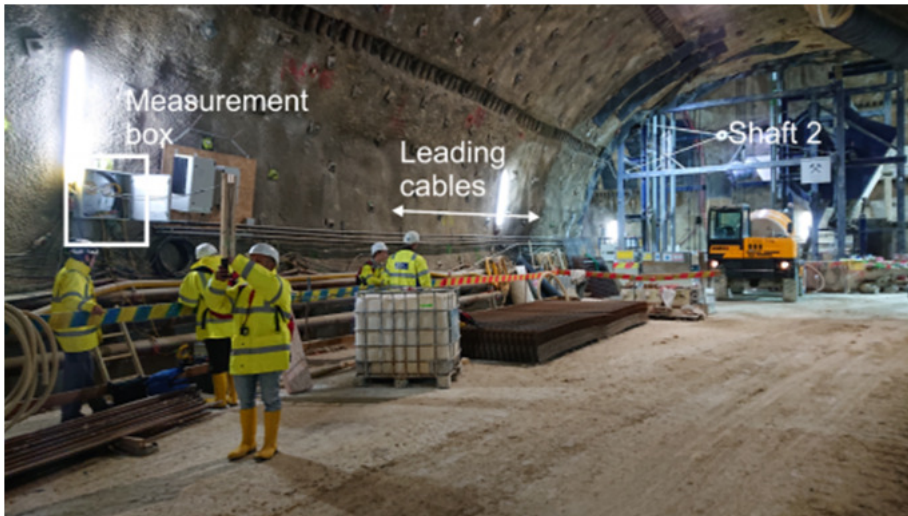
- Messungen von der Kaverne des Schachtes
- Messungen können ohne Beeinträchtigung des Baufortschritts durchgeführt werden



## Beispiel von Rohdaten

### Messintervall

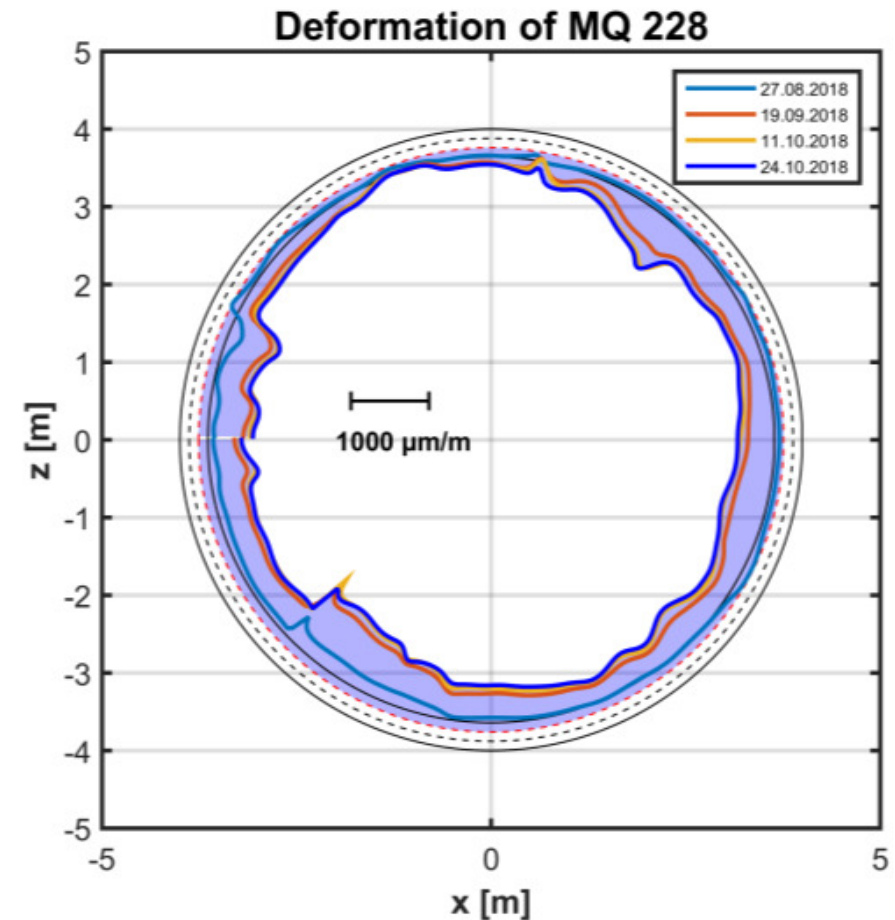
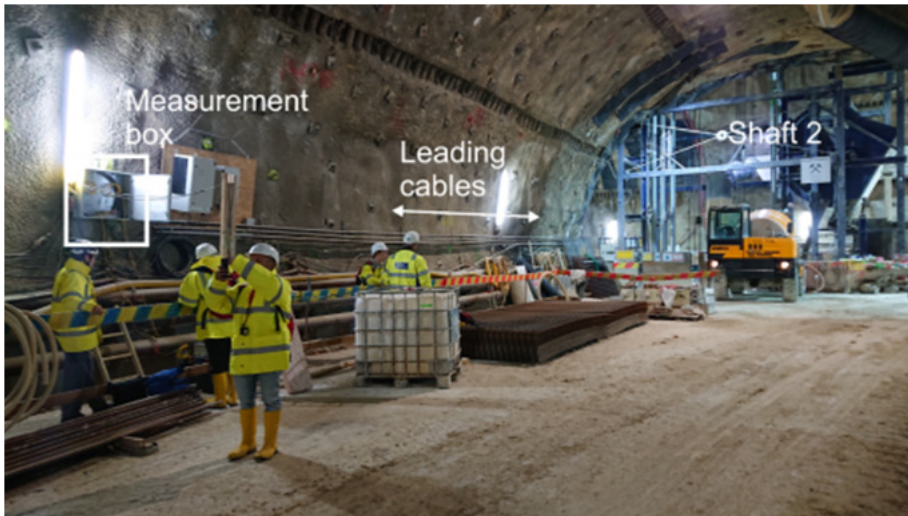
- Nullmessung direkt nach Einbau
- Dzt. Epochenmessungen



# Beispiel von ausgewerteten Daten

## Messintervall

- Nullmessung direkt nach Einbau
- Dzt. Epochenmessungen



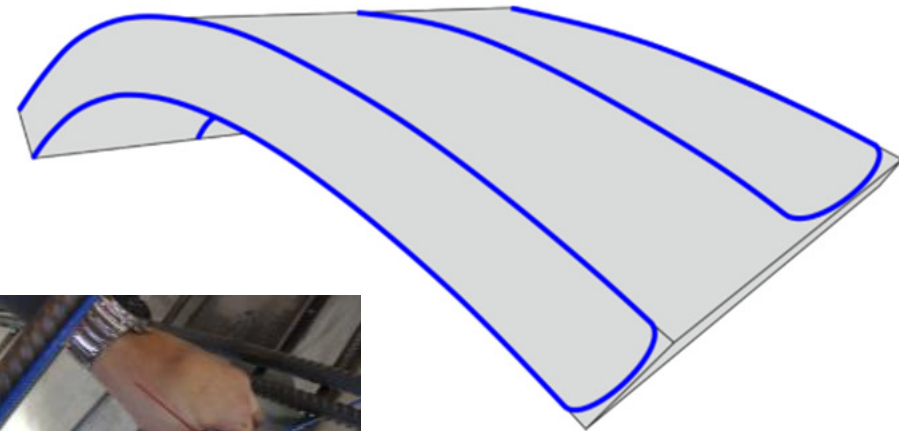


# Faseroptische Messungen im kontinuierlichen Vortrieb

# Flächenhaftes Monitoring von Tübbing

## Monitoring-Konzept

- Individuelle Führung eines durchlaufenden Sensorkabels entlang der Bewehrung
- Abdeckung des kompletten Tübbings
- Fixe Verbindung mit umgebenden Beton durch strukturierte Kabeloberfläche



## Prüfung von Tübbingen

### Tübbingprüfstand Niklasdorf



### Belastungsszenarien

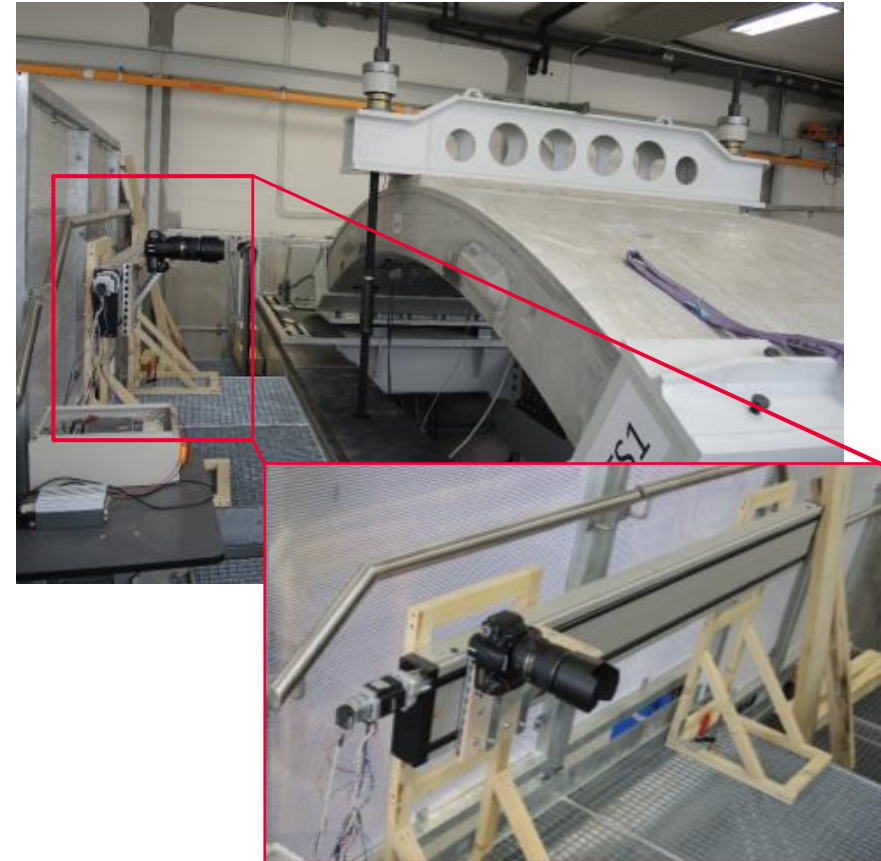
- Vertikal (bis 2000 kN)
- Horizontal (bis 3000 kN)

### Sensoren an der Tübbingoberfläche

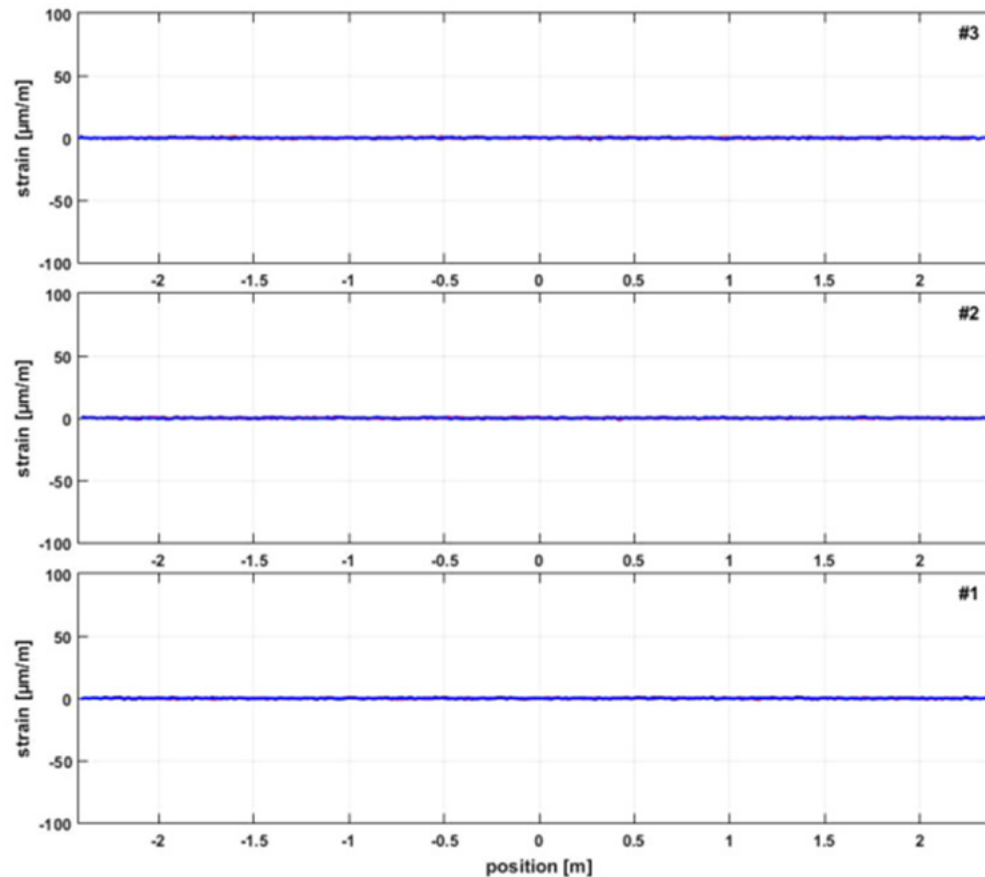
- Dehnmessstreifen (Rissbreiten)
- Wegaufnehmer, Seilzugsensoren (Verformung)

### Berührungslose Messverfahren

- Laserscanner
- Kamerabasiertes Messsystem zur Rissdetektion

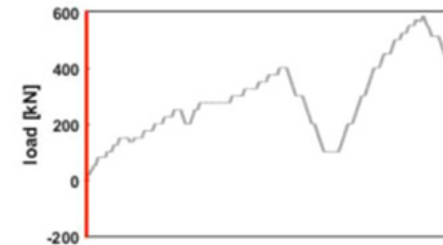


# Vertikaler Belastungstest



**Tubbing A2**  
Tunnel Segment Load Test  
Niklasdorf, 25.02.2016

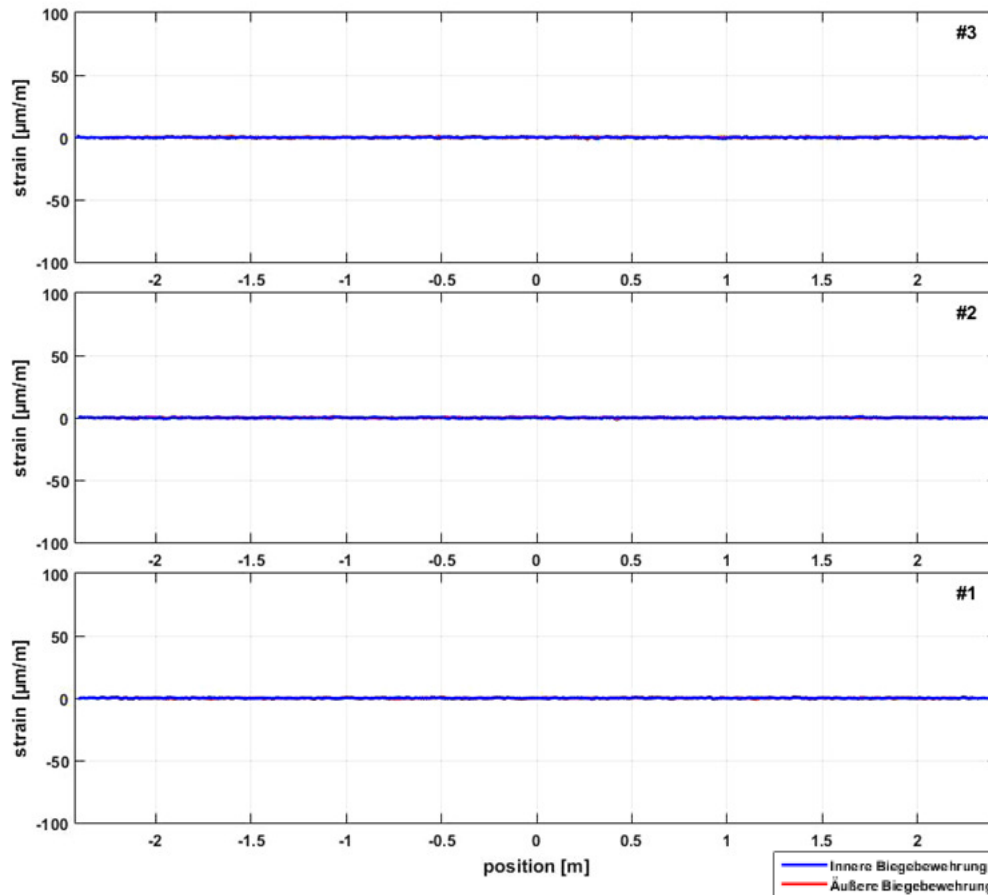
ID	Load HZ [kN]	Load V [kN]	Time [min]
01	50	50	
02	80	100	
03	80	150	
04	80	200	
05	80	250	
06	80	300	
07	80	350	
08	80	400	
09	80	450	
10	80	500	
11	80	550	
12	80	600	



— Innere Biegebewehrung  
— Äußere Biegebewehrung

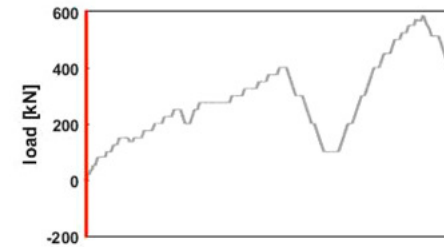


# Vertikaler Belastungstest

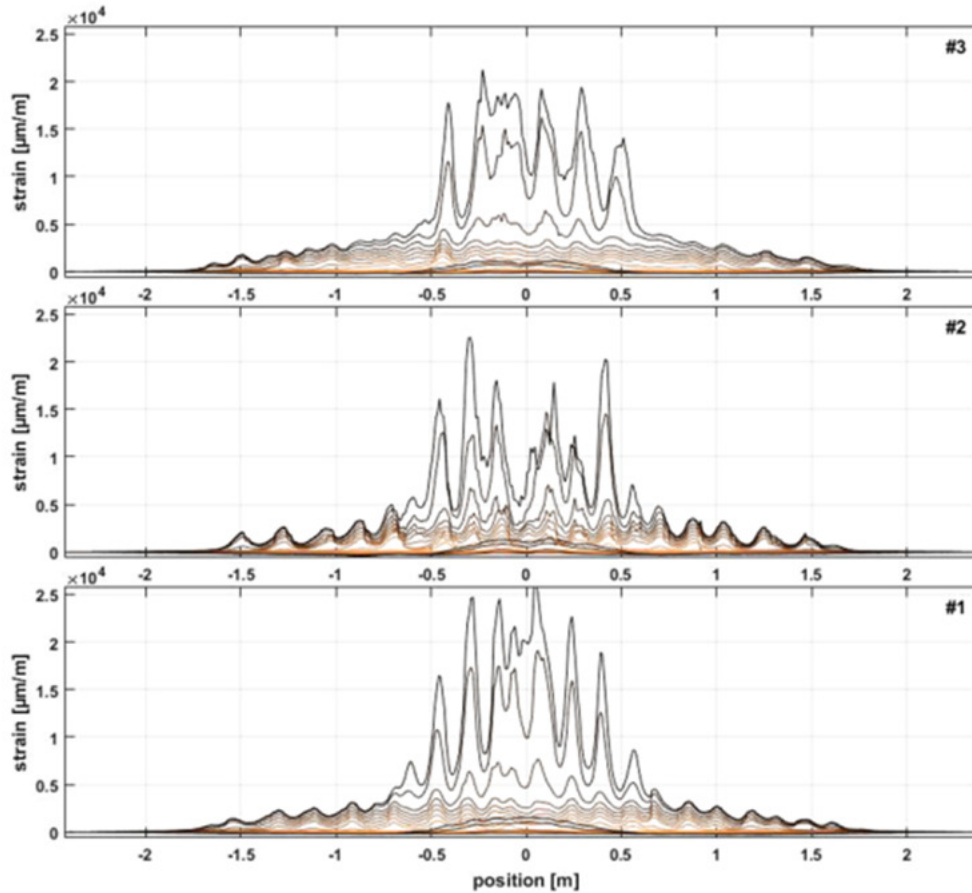


**Tubbing A2**  
Tunnel Segment Load Test  
Niklasdorf, 25.02.2016

ID	Load HZ [kN]	Load V [kN]	Time (min)
01	50	50	
02	80	100	
03	80	150	
04	80	200	
05	80	250	
06	80	300	
07	80	350	
08	80	400	
09	80	450	
10	80	500	
11	80	550	
12	80	600	

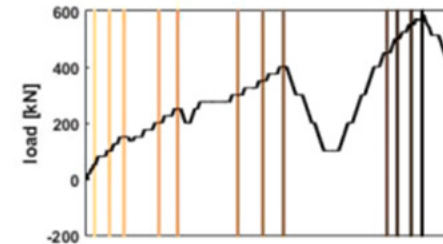


# Vertikaler Belastungstest



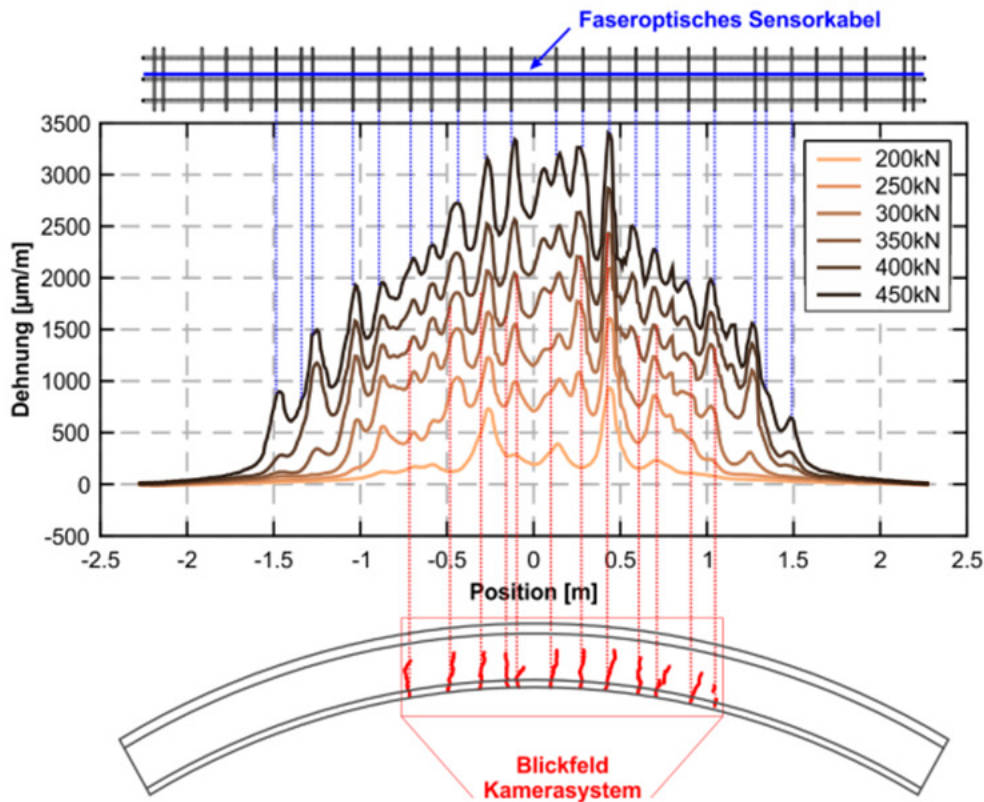
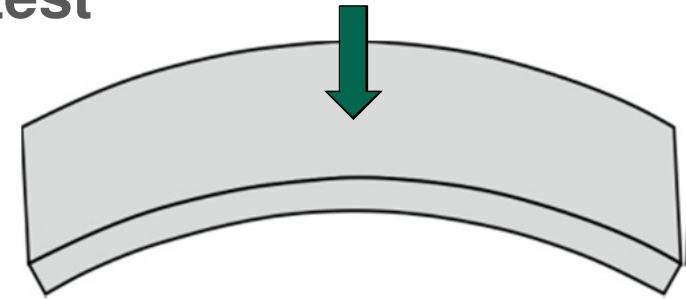
**Tubbing A2**  
Tunnel Segment Load Test  
Niklasdorf, 25.02.2016

ID	Load HZ [kN]	Load V [kN]	Time [min]
01	50	50	7
02	80	100	21
03	80	150	34
04	80	200	65
05	80	250	82
06	80	300	135
07	80	350	158
08	80	400	176
09	80	450	268
10	80	500	278
11	80	550	290
12	80	600	300



— Innere Biegebewehrung  
— Äußere Biegebewehrung

# Vertikaler Belastungstest



## Faseroptische Dehnungsprofile

- Rissentwicklung über größere Bereiche bis zu  $\pm 1.7\text{m}$
- Zunahme der Dehnungswerte infolge der Rissverbreiterung erkennbar

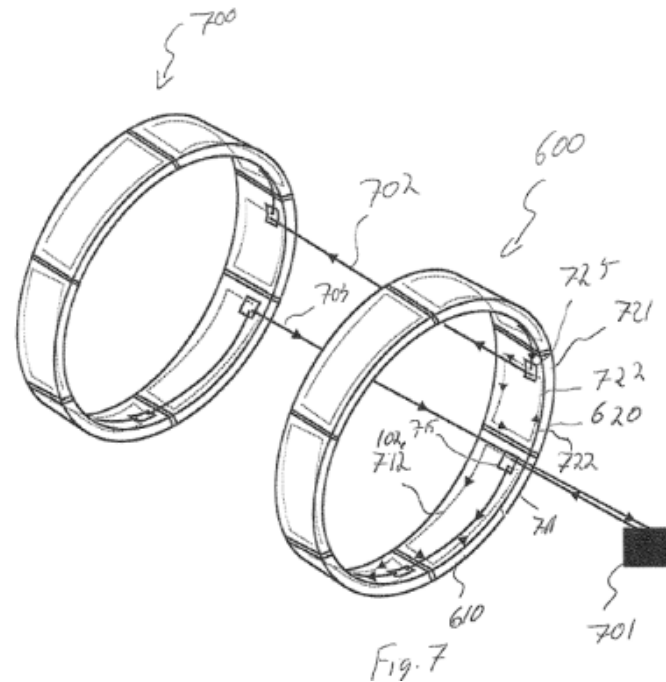
## Lokalisierung der Risspositionen

- Gute Übereinstimmung mit Rissmuster des kamerabasierten Messsystems
- Risse entstehen an Positionen der Querbewehrungsstäbe

## Messungen im Tunnel

### Monitoringkonzept

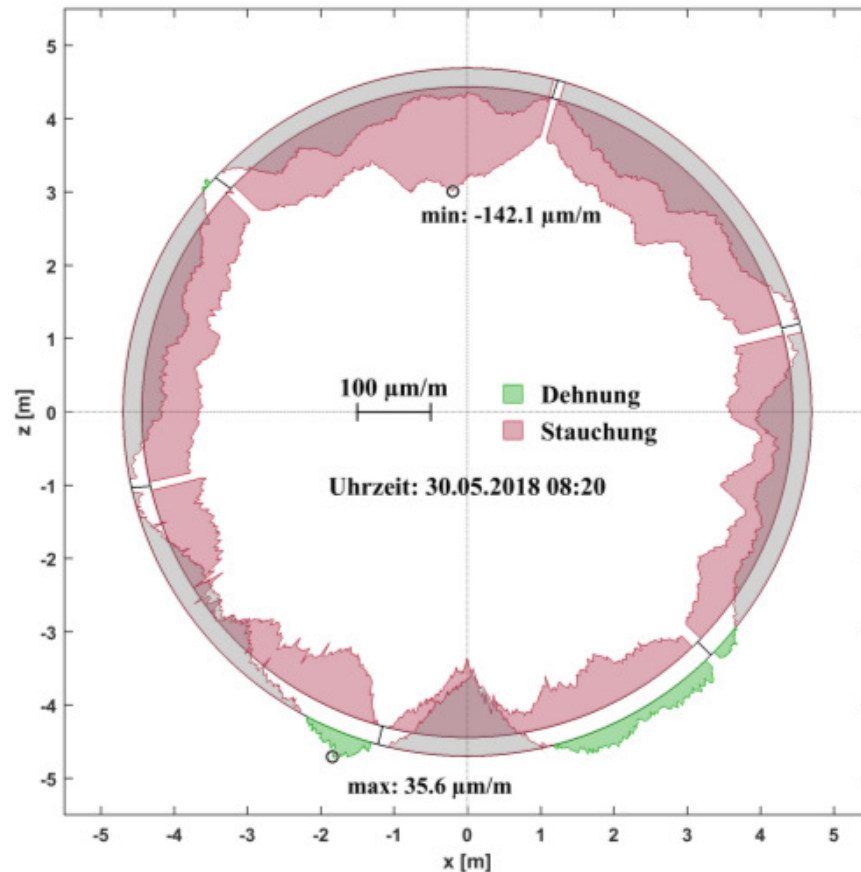
- Verbindung mehrerer Segmente zu durchgängigem Messtübbingring
- Spezieller Messschrank hinter dem TVM-Nachläufer
- Verbindung mittels Zuleitungskabel entlang der Tunnelschale
- Kontinuierliche Dauermessung über mehrere Wochen



(Lienhart & Galler, 2014)



## Ergebnisse Tübbingring



### Faseroptische Dehnungsverteilung

- Lückenlose Dehnungsmessung im gesamten Messquerschnitt
- Ortsauflösung von 2 cm unter praktischen Bedingungen im Tunnel realisierbar
- Stetige Übergänge zwischen einzelnen Segmenten
- Korrelation zwischen innerer und äußerer Bewehrungslage

### Weiterführende Berechnungen

- Schnittkraftverteilung (Moment, Normalkraft)
- Auslastungsgrad

## Zusammenfassung und Ausblick

### Verteilte faseroptische Messungen im Tunnelbau

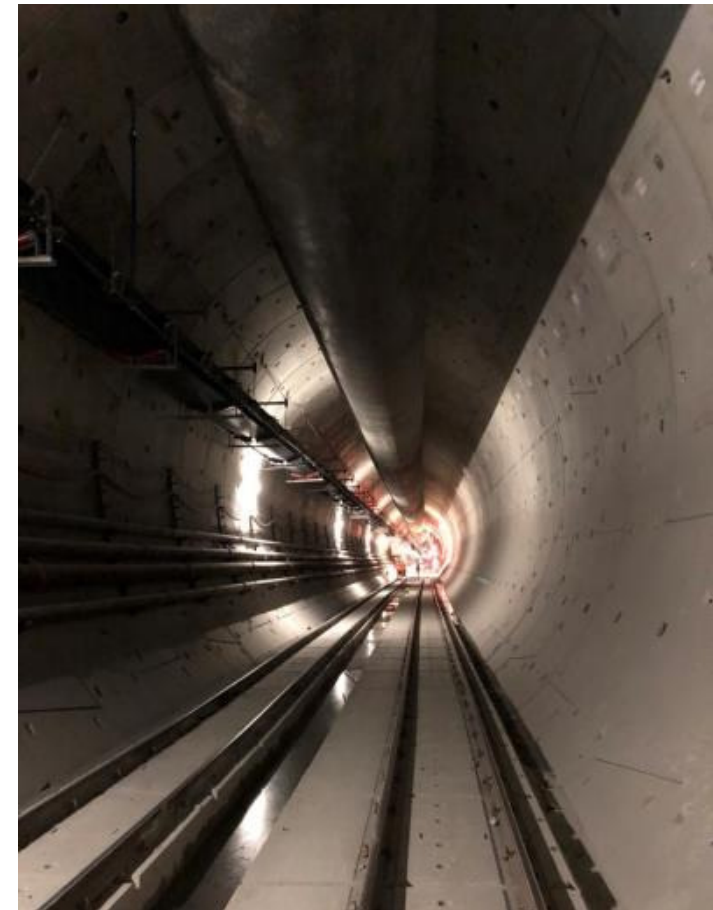
- Realisierung tausender Messstellen mit einem einzelnen Sensorkabel im Inneren der Tunnelschale
- Nachträgliche Oberflächenmontage auf Bestandstunnel auch möglich
- Robustheit unter praktischen Bedingungen bestätigt

### Voraussetzungen

- Auswahl geeigneter faseroptischer Komponenten
- Zuverlässige Kalibrierung des faseroptischen Systems
- Entwicklung speziell angepasster Software

### Erweiterung bestehender Monitoringsysteme

- Verteilte Langzeitüberwachung ohne Beeinflussung des regulären Tunnelbetriebs
- Lokalisierung potentieller Schadstellen wie z.B. Risse im Beton





Vielen Dank für Ihr  
Interesse!

[werner.lienhart@tugraz.at](mailto:werner.lienhart@tugraz.at)