

Ingenieurgeodäsie mit Profil: neue Entwicklungen beim Monitoring von Brückenbauwerken



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Andreas Eichhorn

TU Darmstadt, Institut für Geodäsie

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Geodätisches Kolloquium der Frankfurt University of Applied Sciences

14. November 2019

Teil I: Warum brauchen wir Monitoring ?

1. Aufgaben des geodätischen Monitorings
2. Beispiele für relevante Bauwerke

Teil II: Monitoring an Brückenbauwerken

3. (Innovative) Sensoren
4. Monitoring und Analyse
5. Ausblick: wohin geht die Reise ?

Teil I: Warum brauchen wir Monitoring ?

1. Aufgaben des geodätischen Monitorings

Grundlegende Ziele (innerhalb Lebenszyklus eines Bauwerks) [z.B. Heunecke et al., 2013]

- Monitoring bezogen auf (kritische) Abweichungen vom „Normalverhalten“
- Überprüfung der „Gesundheit“ einer (Bauwerks-)Struktur (z.B. beim Tragwerk: einzelne Elemente und das gesamte System)
- Frühzeitige Identifikation (und Lokalisierung) von Schädigungen
 - ⇒ Unterstützung bei Bewertung von Funktions- und Standsicherheit
 - ⇒ Unterstützung bei Bewertung der Restlebensdauer
 - ⇒ Unterstützung bei Risikoanalyse: Abschätzung Eintrittswahrscheinlichkeit für Schaden
 - ⇒ Im Sinne eines „ganzheitlichen Monitorings“:
 - Monitoring von geologischen Strukturen / geotechnischen Objekten im Einflussbereich
 - Monitoring von möglichen Triggern: z.B. Wind-/Verkehrslasten, Temperatur, Wasserstand etc.
 - ⇒ **Zustandsabhängige Erhaltungsstrategie**

2. Beispiele für relevante Bauwerke

z.B. Straßen- und Eisenbahnbrücken

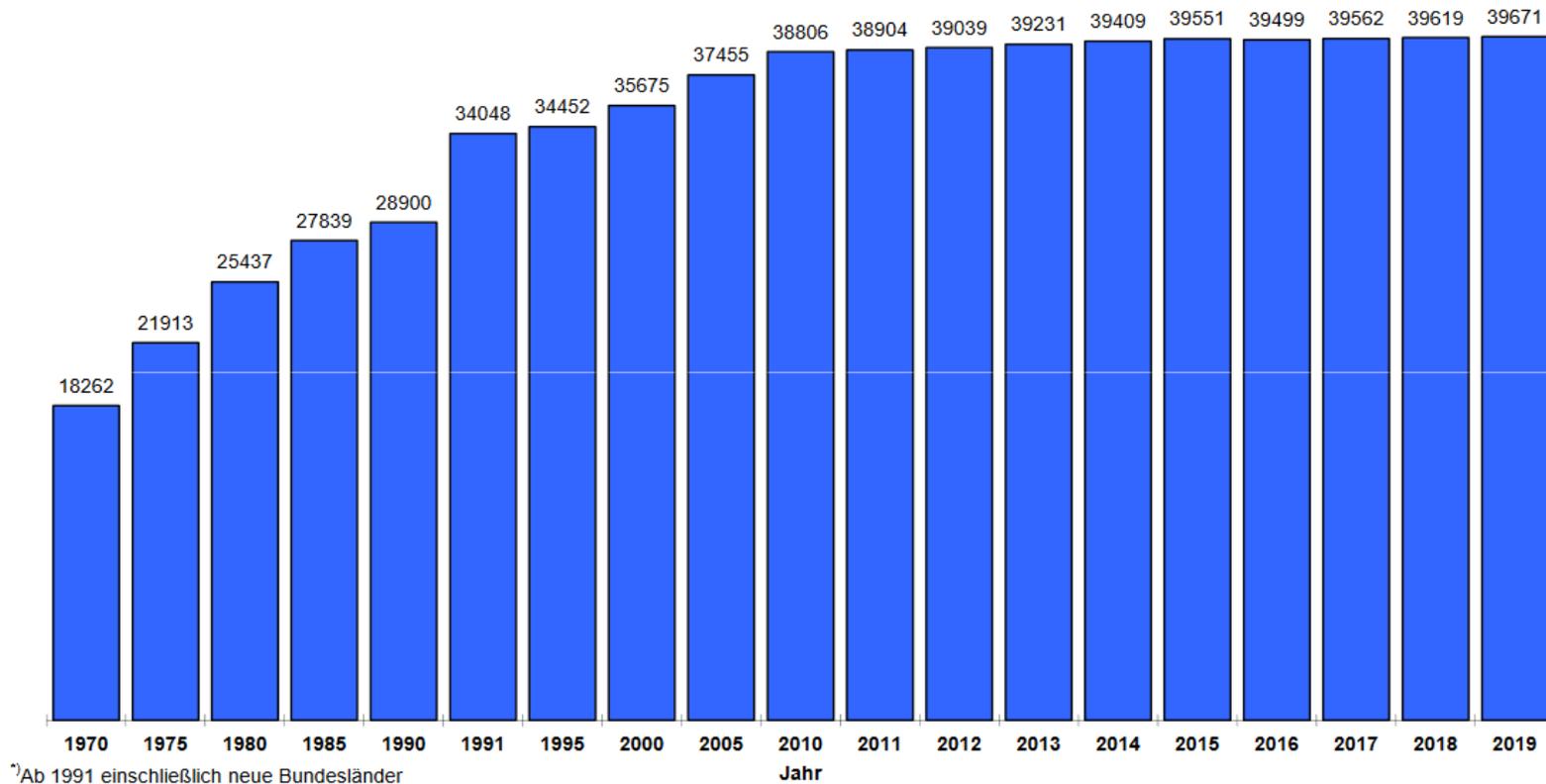
- Internet-Datenbanken mit dokumentiertem Brückenversagen
 - Hauptgründe:
 - Natur (z.B. Anregung im Resonanzbereich aufgrund Wind), Kollisionen, Sabotage
 - Erhöhte Verkehrslasten
 - Konstruktions- und Materialfehler
 - Nur ca. 2% der Versagensereignisse während Bauphase
 - In vielen Fällen: allmähliche Änderungen der statischen und dynamischen Eigenschaften => plötzliche Überlastung führt zum Versagen
 - Resultat: in meisten Fällen Totalverlust, Verlust von Menschenleben
- ⇒ ca. 40.000 Brücken an Bundesfernstraßen und 25.000 Eisenbahnbrücken in Deutschland
- ⇒ Alterung, zunehmend wachsende Verkehrslasten
- ⇒ Bauwerke müssen in Betriebsphase überwacht werden (z.B. DIN 1076: Hauptprüfung alle 6 Jahre, einfache Prüfung alle 3 Jahre und jährliche optische Inspektion)

2. Beispiele für relevante Bauwerke

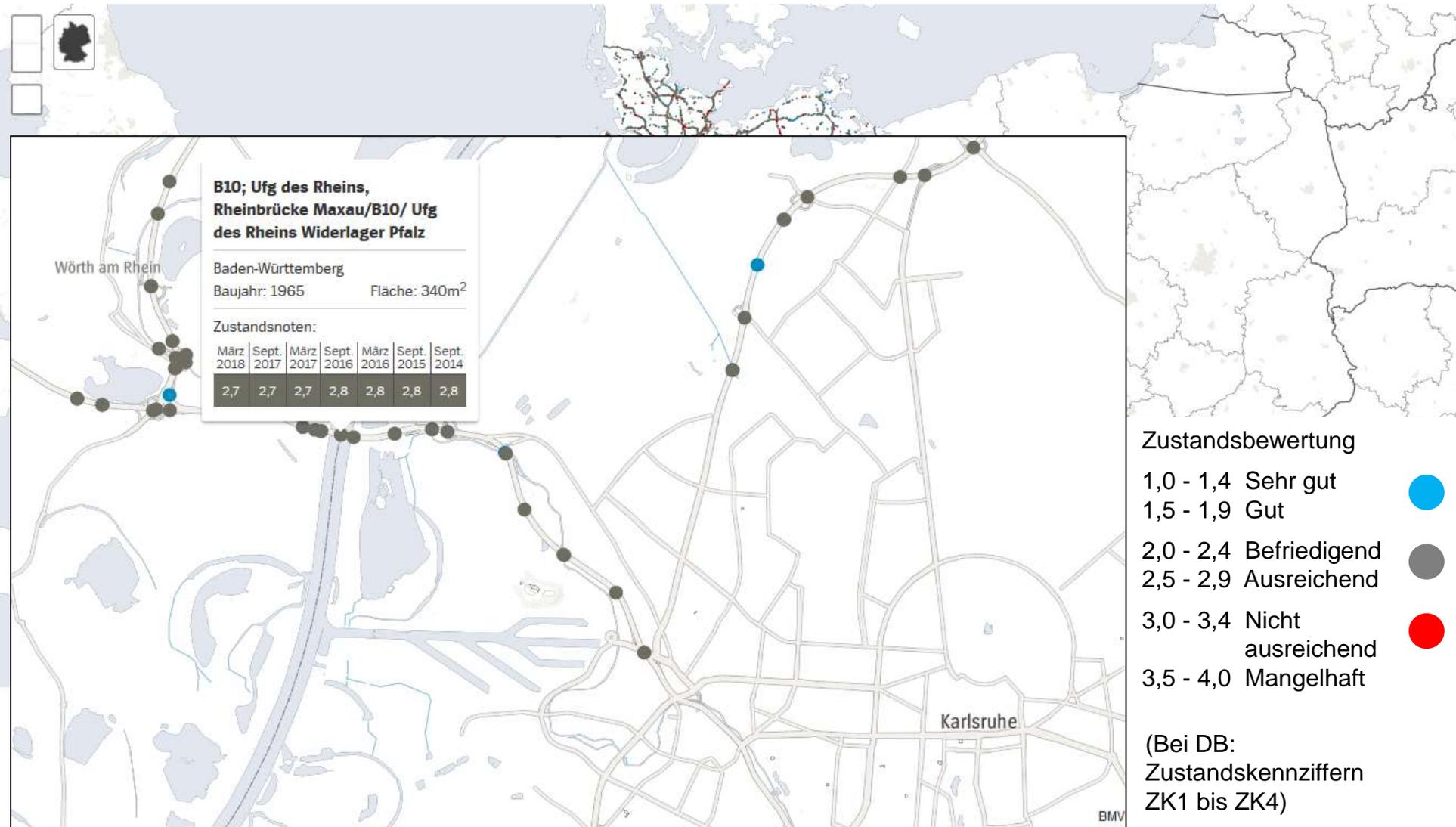
Straßenbrücken

Brücken an Bundesfernstraßen
Anzahl¹⁾ der Brücken (Gesamtbauwerke)
Stand: 01.03.2019

bast



Zustand von Brücken: Brücken-Datenbanken (hier: Bundesfernstraßen)

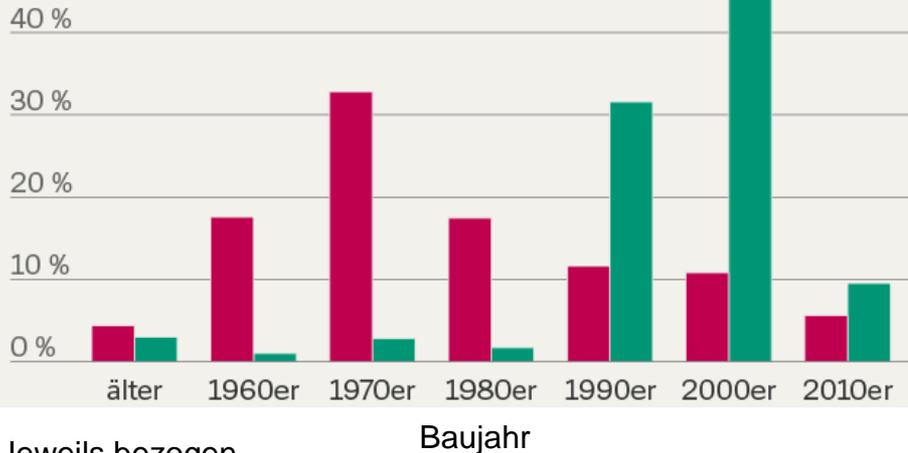


Zustand von Brücken

Neue Länder, neue Brücken

Anteil der Brückenfläche nach Baujahren
in den **alten** und **neuen** Bundesländern

Quelle: BMVI/BASt



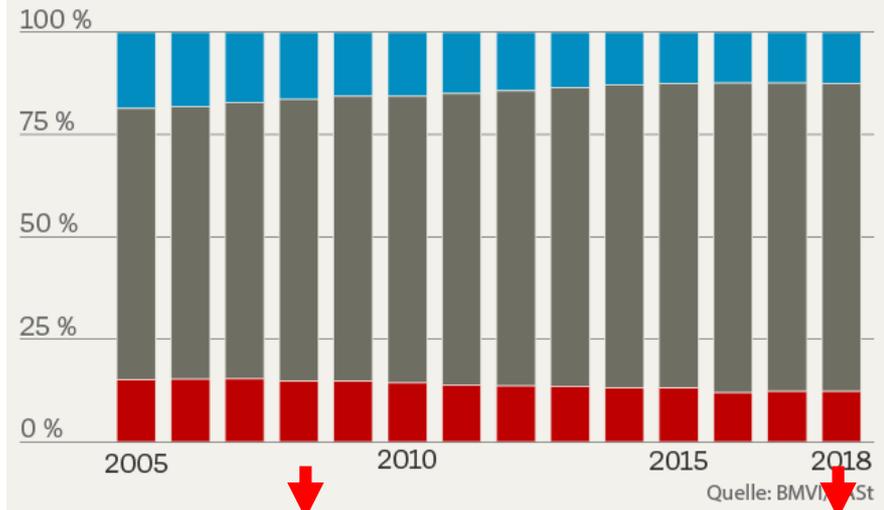
Jeweils bezogen
auf 100%

Bundesfernstraßen

Quelle: BMVI/BASt

Immer weniger Brücken mit Bestnoten

Anteil der Brückenfläche in **gutem**, mittlerem und **schlechtem** Zustand



ca. 15%
(2008)

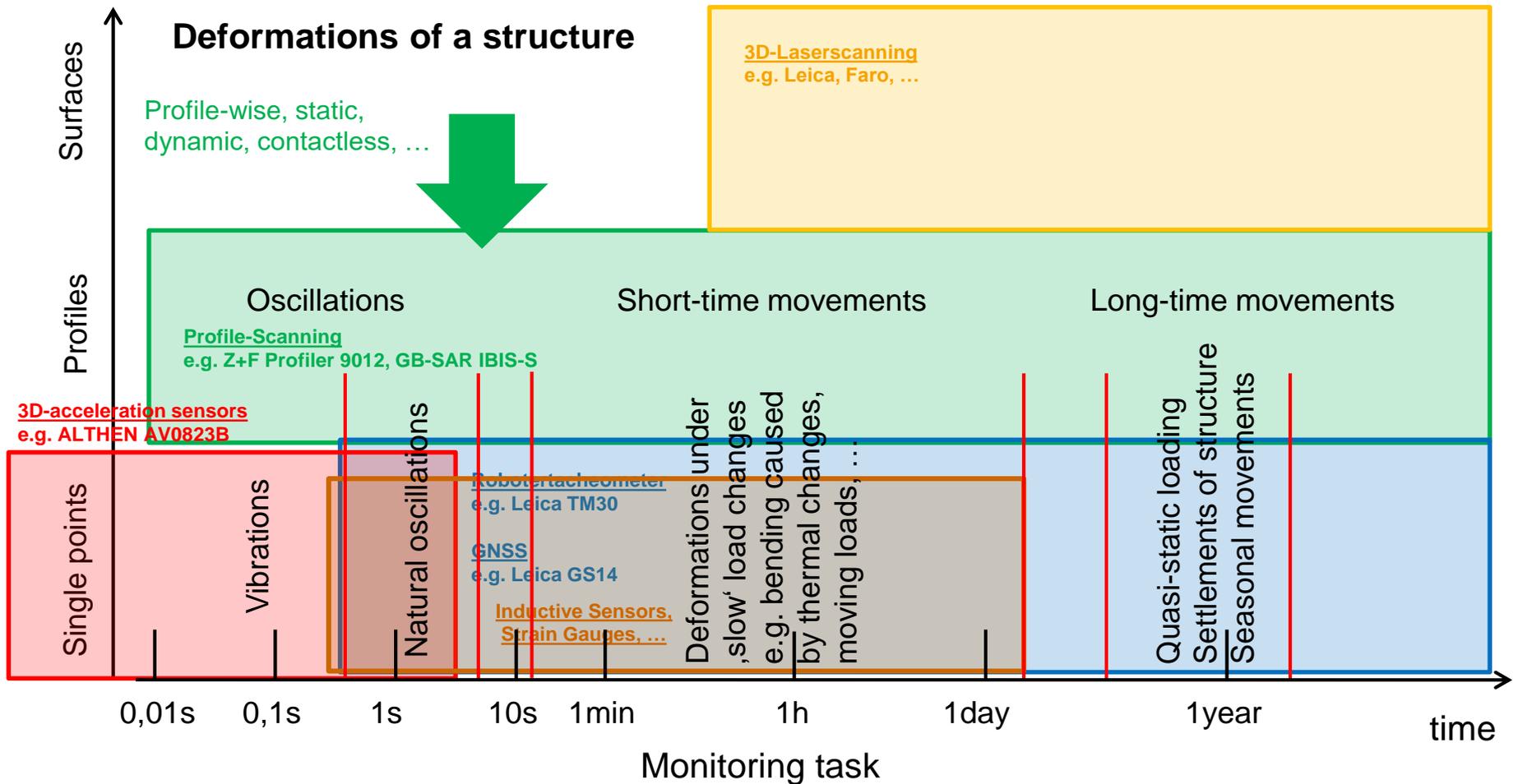
ca. 12,2%
(heute)

- Schlechte Bewertung beschreibt „mangelhaften“ Zustand des Bauwerks
- Bedeutet nicht notwendigerweise Risiko für Funktions- / Standsicherheit
- Mehr qualitativ: Indikator für geplante Erhaltungsmaßnahme in näherer Zukunft (z.B. wegen sichtbaren Korrosionsschäden, Betonabplatzungen, fehlendes Geländer, ...)
- Bewertung Funktions-/ Standsicherheit (inkl. Detektierung von strukturellen Schädigungen und Abschätzung Restlebensdauer), fortgeschrittene Monitoringmethoden erforderlich
- Ableitung struktureller Charakteristika aus Monitoring-Daten (z.B. Änderung Durchbiegung, modale Parameter wie Eigenfrequenzen, -moden, Dämpfung, etc.)
- Ideale Vorstellung von Betreibern:
 - Statische und dynamische Prozesse
 - Repräsentative Erfassung der Struktur
 - Schnell und ökonomisch (ohne hohen Instrumentierungsaufwand), keine Sperrungen

Teil II: : Monitoring an Brückenbauwerken

3. (Innovative) Sensoren

Was können wir damit messen ?



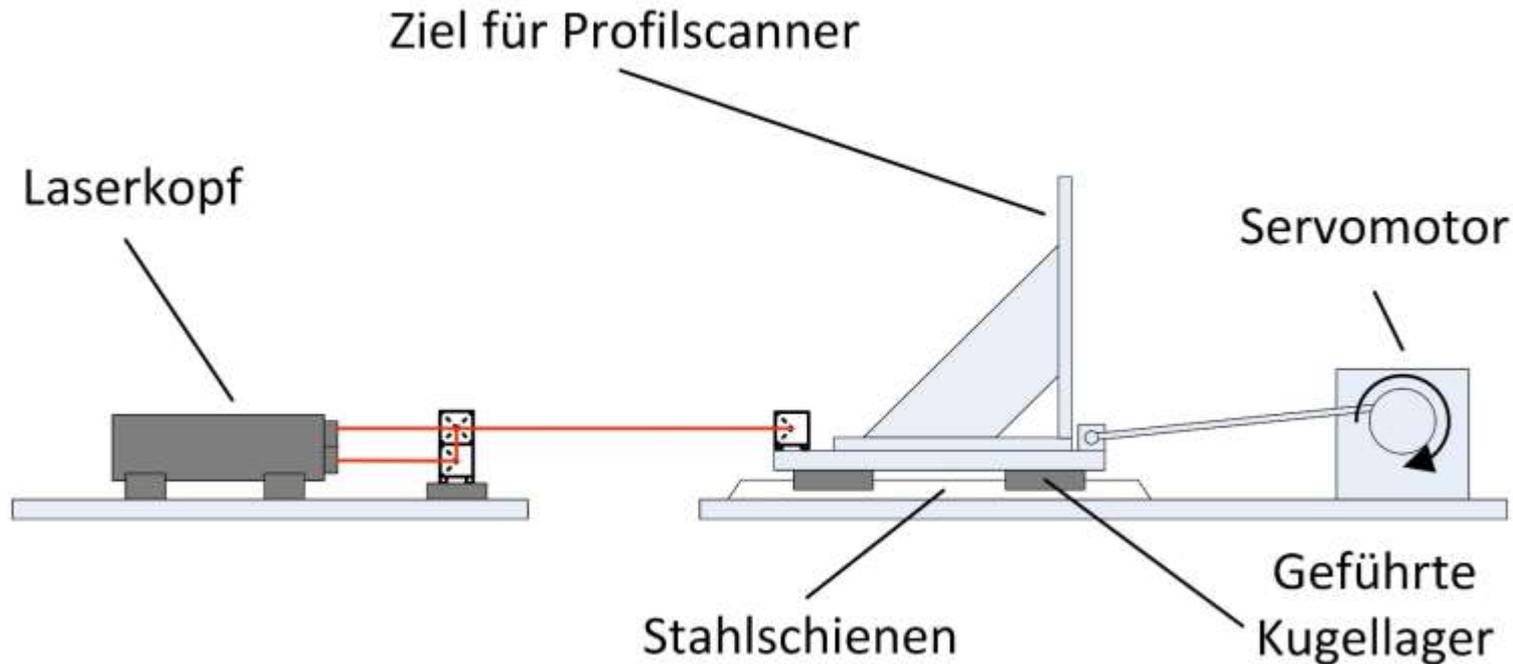
3. (Innovative) Sensoren

Statische und dynamische Deformationsprozesse (Bsp.:
Eisenbahnbrücke über die Regen, Bayerischer Wald)



Idee:

- Profile (2D)
Laserscanner
Profiler 9012 (Zoller & Fröhlich)
- Phasenvergleich
- Messrate bis zu 200
Profile pro Sekunde
- Messbereich bis zu
120m (Profiler) /
Imager 5016 bis
350m
- sub-mm
Genauigkeit (relativ)



Aufbau des Schwingungssimulators (Schwingtisch)
mit Laser-Doppler-Interferometer als Soll

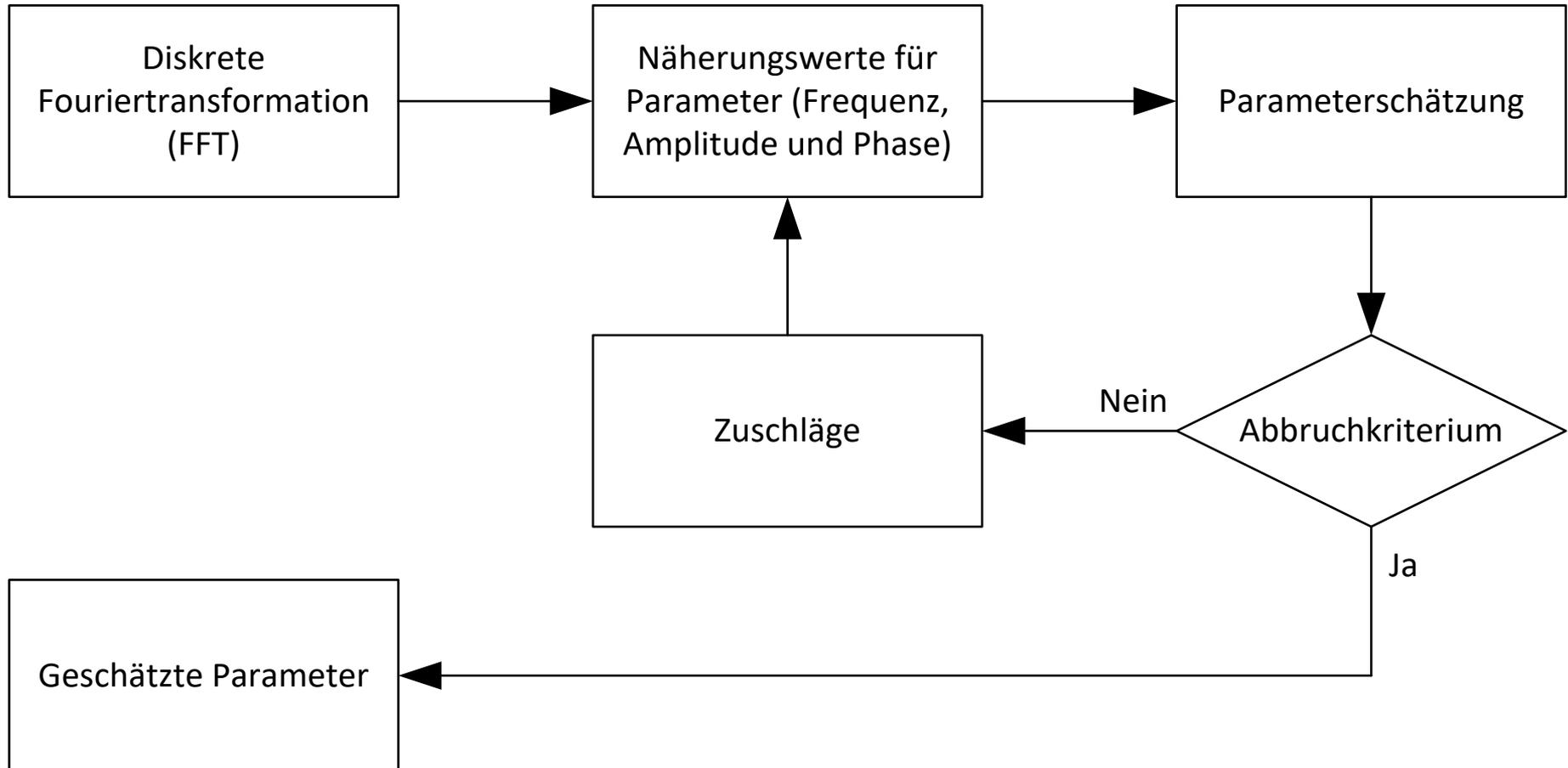


Interferometer HP5529A (Sollgeber)

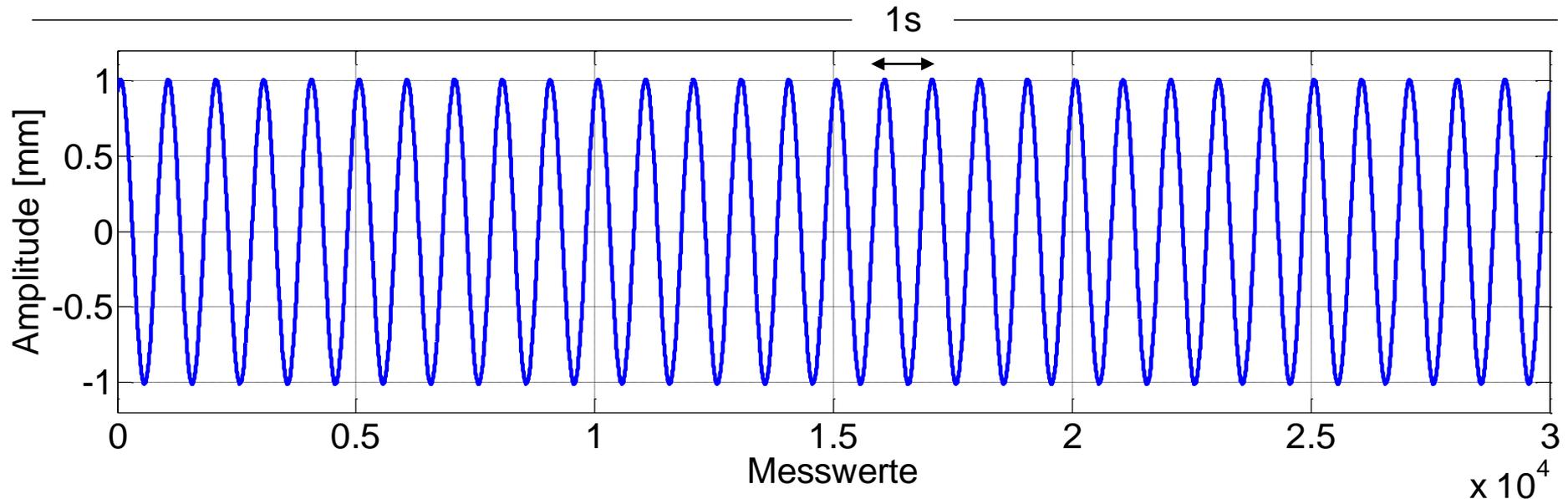
- Messrate: 1000 Hz
- Messbereich: bis 40 m
- Genauigkeit: 0,4 ppm
- Auflösung: 1 nm
- Maximal auflösbare Geschwindigkeit:
0,7 m/s



Auswerteschema für Schwingungsanalyse im Frequenzraum

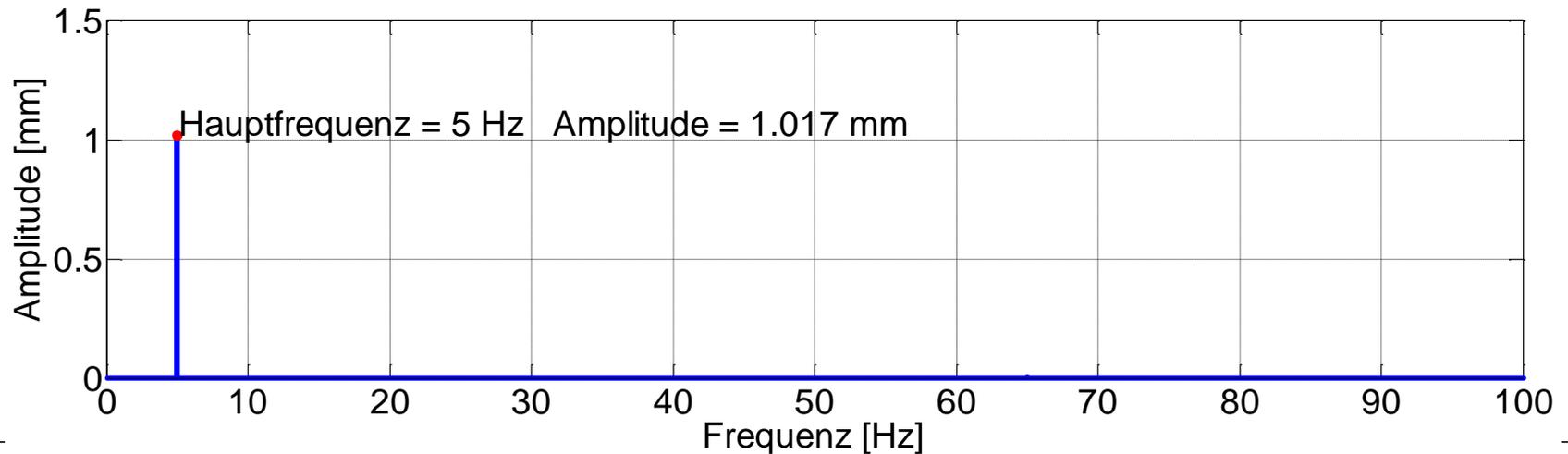
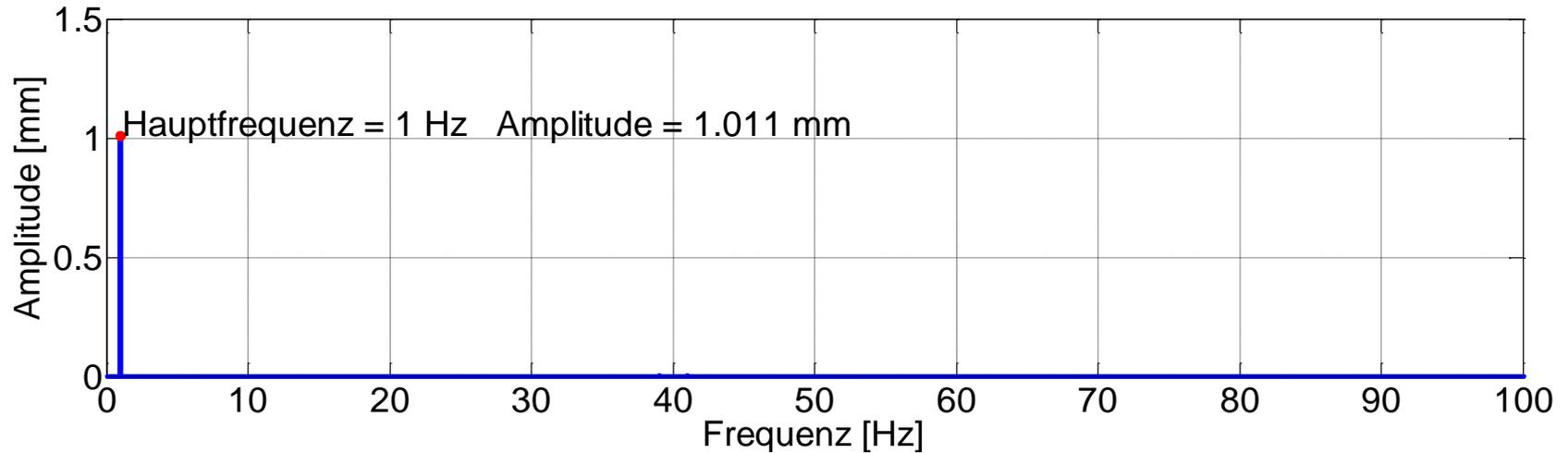


Beispiel: Soll-Schwingung (1Hz, ± 1 mm), mit Interferometer gemessenes Wegsignal



- Periodische Zeitreihe: Vielfaches der Grundschiwingung
 - Keine Leakage-Effekte
 - Keine Fensterung notwendig
- Messrate 1000 Hz: $N = 30.000$ Messwerte in $T_{\text{Ges}} = 30$ Sekunden
 - Frequenzauflösung bei fft: $\Delta\nu = 1/(N\Delta t) = 1/T_{\text{Ges}} = 1/30$ Hz

Beispiel: Amplitudenspektren von Soll-Schwingungen



Ergebnisse der Parameterschätzung für die Soll-Schwingungen

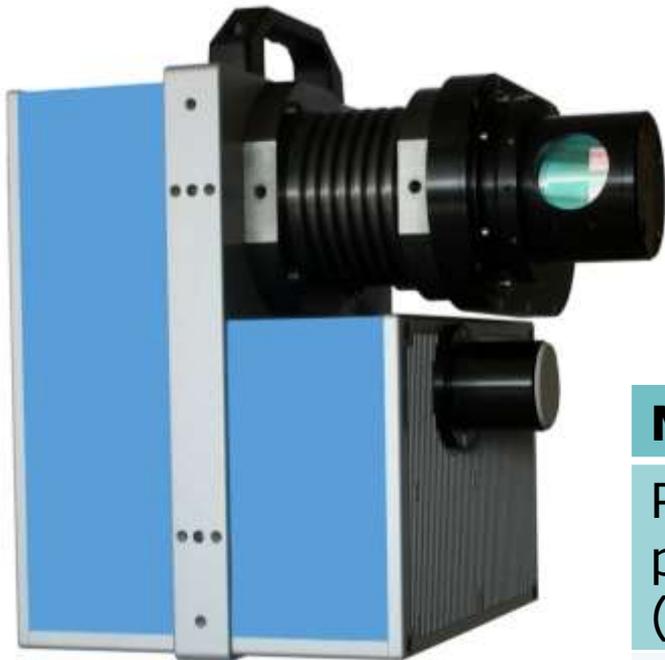
Am Schwingtisch eingestellte Amplitude 1 mm

Sollfrequenz	Frequenz	Amplitude	Std. Frequenz	Std. Amplitude
1 Hz	1,000 Hz	1,011 mm	$< 1 \cdot 10^{-5}$ Hz	$< 1 \cdot 10^{-4}$ mm
3 Hz	3,000 Hz	1,013 mm		
5 Hz	5,000 Hz	1,018 mm		

Amplitude 4 mm

Sollfrequenz	Frequenz	Amplitude	Std. Frequenz	Std. Amplitude
1 Hz	1,000 Hz	4,041 mm	$< 1 \cdot 10^{-5}$ Hz	$< 1 \cdot 10^{-3}$ mm
3 Hz	3,000 Hz	4,050 mm		
5 Hz	5,000 Hz	4,067 mm		

Vergleich mit Profiler-Messungen

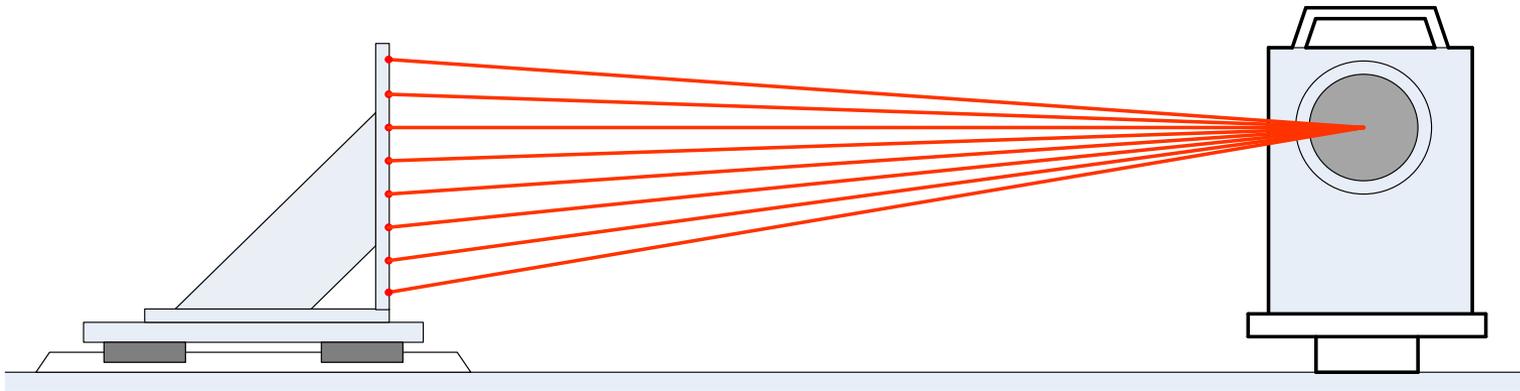


- Bis zu 200 Revolutions Per Second (RPS)
- 360° Messbereich
- Integration GPS-Zeitsignal

Messmodi Profiler9012

Punkte pro Profil (PpP)	50 Hz	100 Hz	200 Hz
1.280	X	X	X
2.560	X	X	X
5.120	X	X	X
10.240	X	X	
20.480	X		

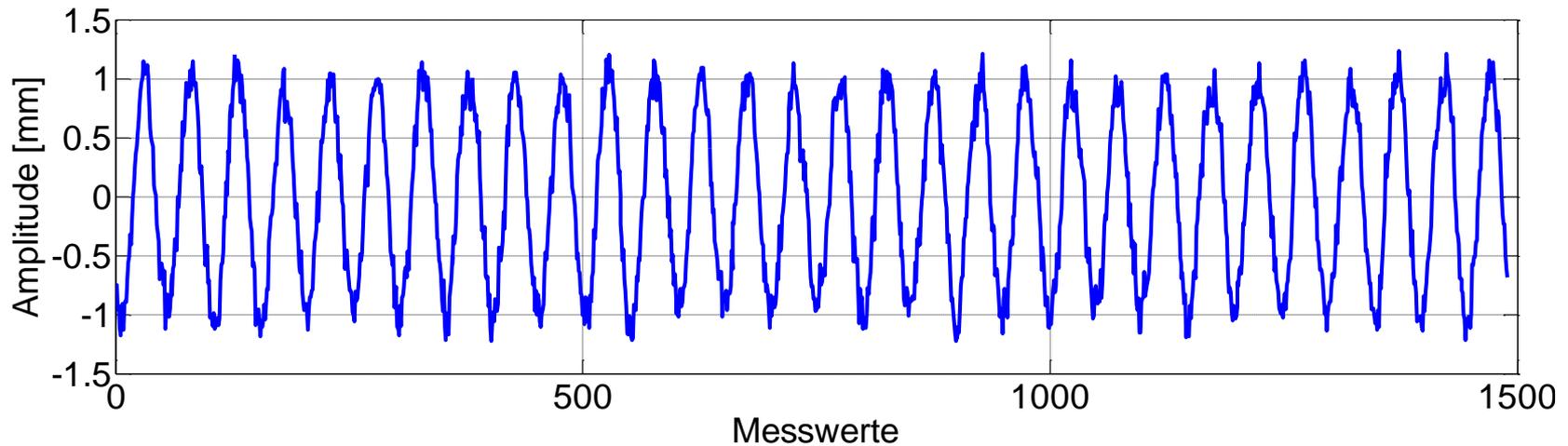
Vergleich mit Profiler-Messungen: Messexperiment



Randbedingungen:

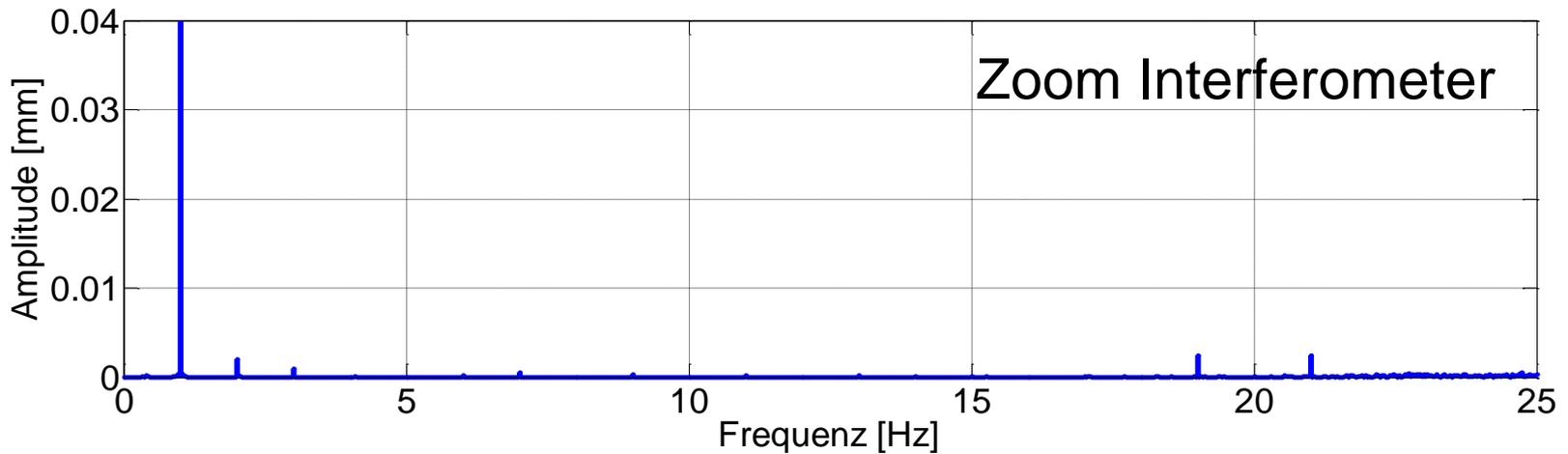
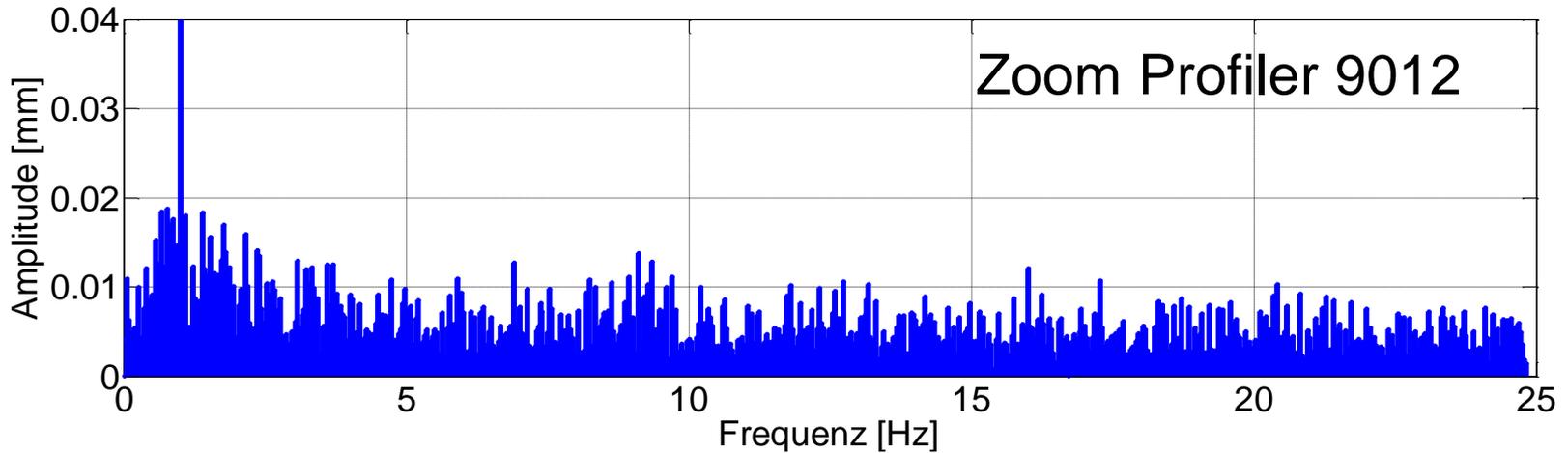
- Konstante Temperatur
- Stabile Gründung
- Kein GPS-Empfang
- **Mittelung aller Punkte auf Ziel**
- identischer Winkelbereich

Beispiel: gemessene Schwingung (1 Hz, ± 1 mm) im Zeitbereich (Mittelung)



- Periodische Zeitreihe \approx Vielfaches der Frequenz
 - Kein relevanter Leakage-Effekt
 - Keine Fensterung notwendig
- 50 Hz: 1500 Messwerte in 30 Sekunden
 - Frequenzauflösung $\Delta\nu = 1/30$ Hz (fft, wie bei Interferometer)

Beispiel: Amplitudenspektrum der gemessenen Schwingung



Ergebnisse der Parameterschätzung Profiler 9012

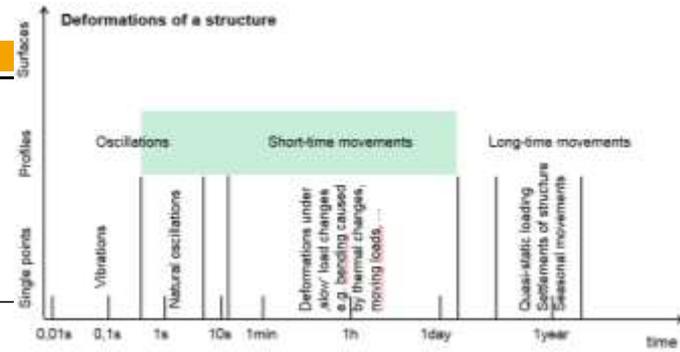
1 Hz	PpP	Frequenz	Amplitude	Std. Freq.	Std. Amp.
50 RPS	1280	1,000	1,01	$< 1 \cdot 10^{-3}$ Hz	$< 1 \cdot 10^{-2}$ mm
50 RPS	20480	0,996	1,01		
200 RPS	1280	1,000	1,02		
200 RPS	5120	0,996	1,02		

5 Hz	PpP	Frequenz	Amplitude	Std. Freq.	Std. Amp.
50 RPS	1280	5,000	1,01	$< 1 \cdot 10^{-3}$ Hz	$< 1 \cdot 10^{-2}$ mm
50 RPS	20480	4,981	1,02		
200 RPS	1280	5,002	1,03		
200 RPS	5120	4,981	1,02		

Soll (Interferometer)
 1,000 Hz / 1,011 mm
 5,000 Hz / 1,018 mm

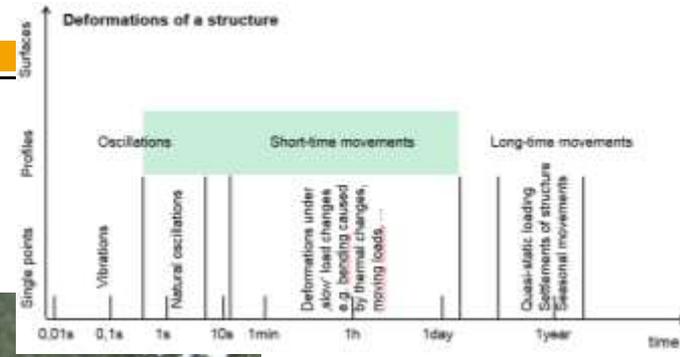
4. Monitoring und Analyse

Zurück zur Brücke über die Regen



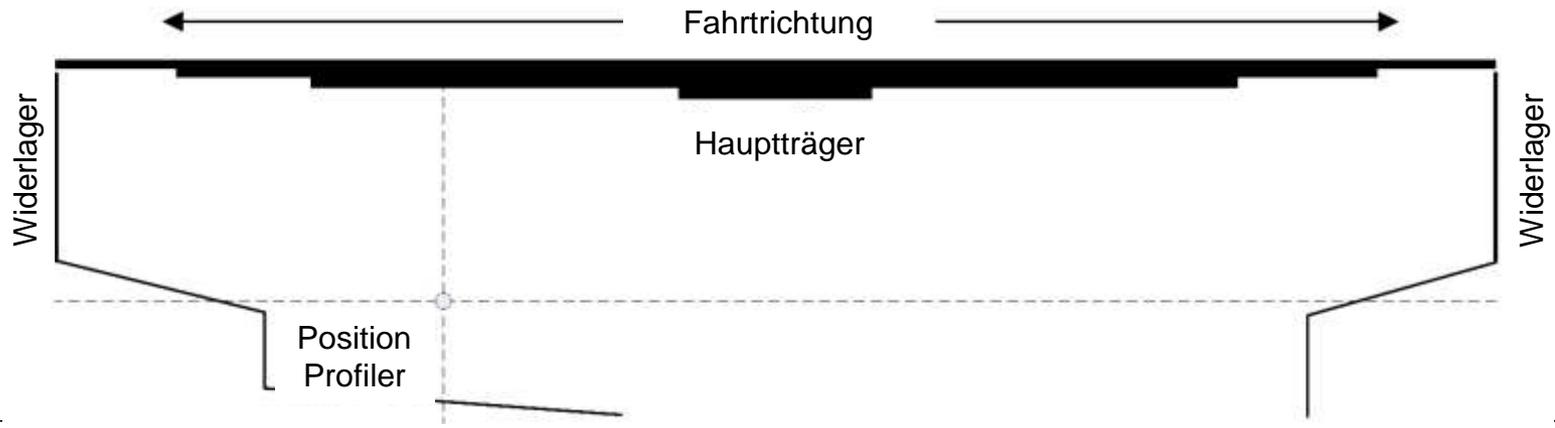
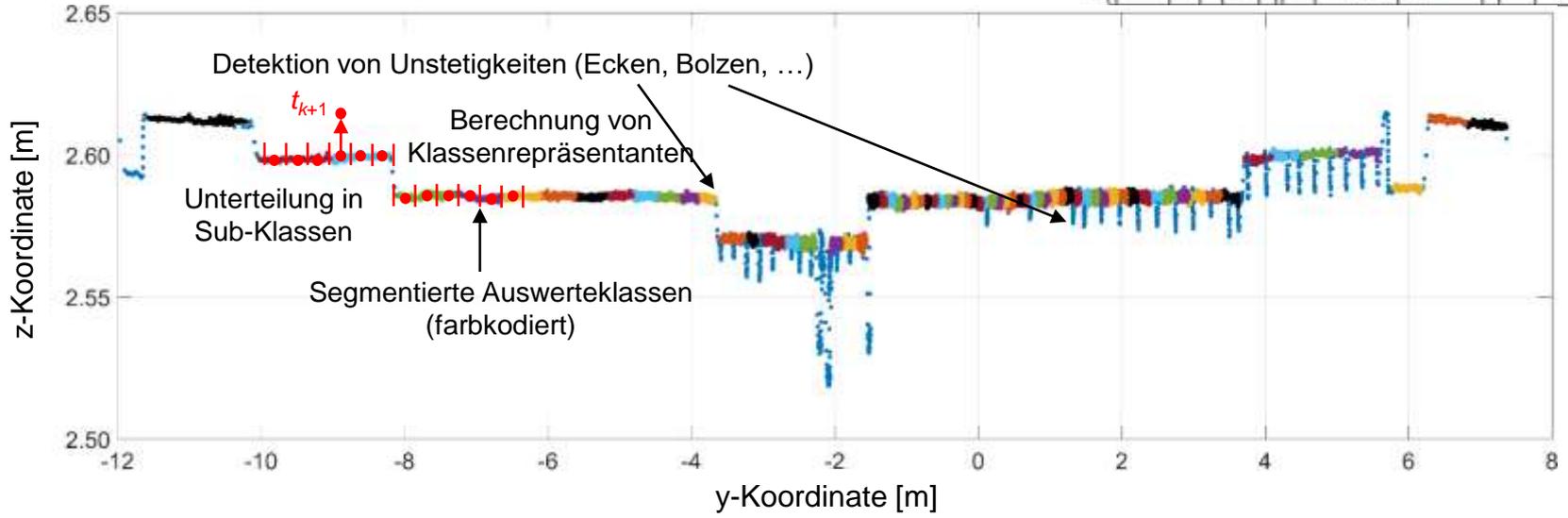
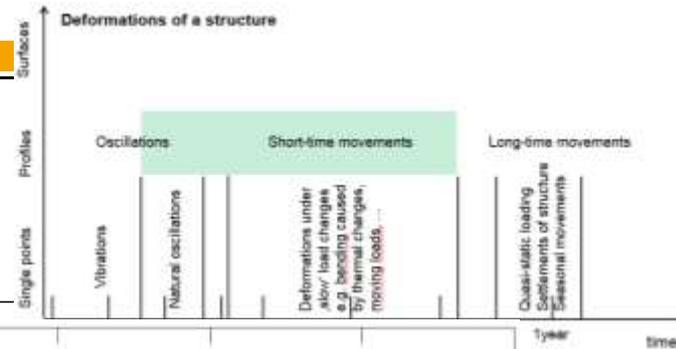
4. Monitoring und Analyse

Zurück zur Brücke über die Regen



Automatische räumliche Segmentierung

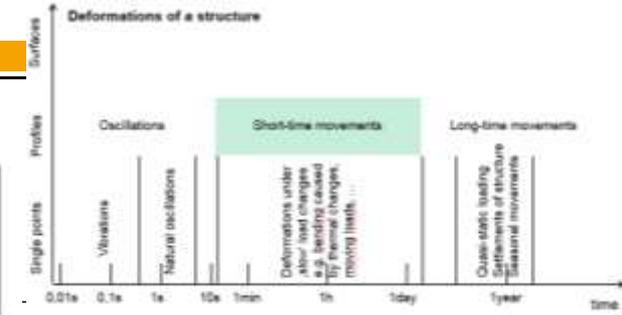
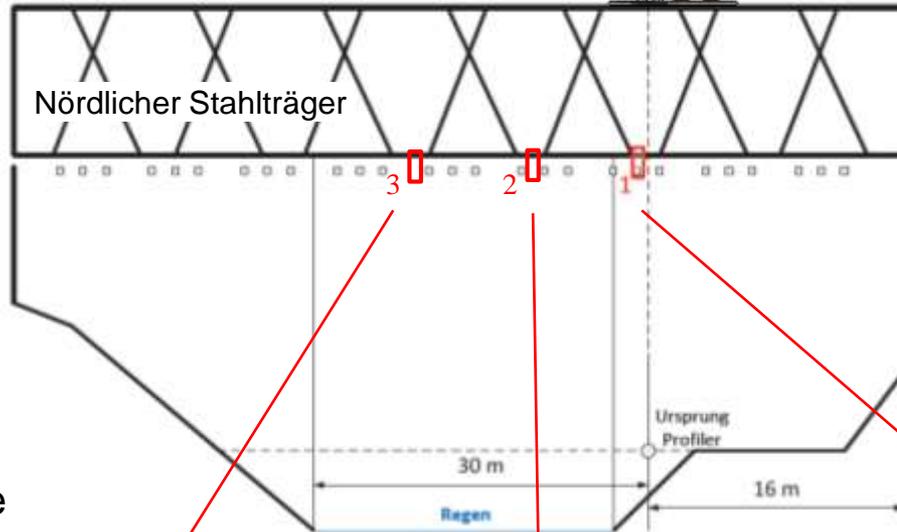
Beispiel: ein Längsprofil t_k (17.000 rohe Messpunkte)



Durchbiegung

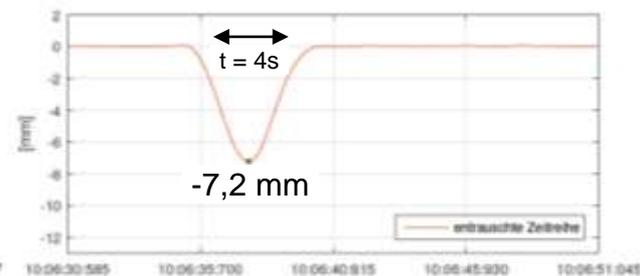
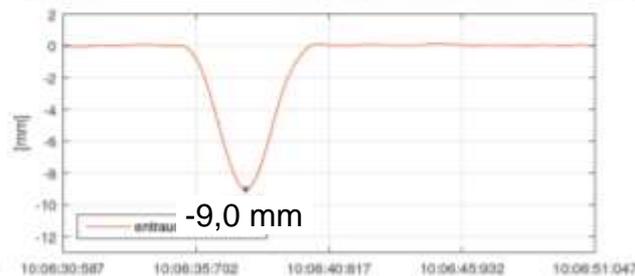
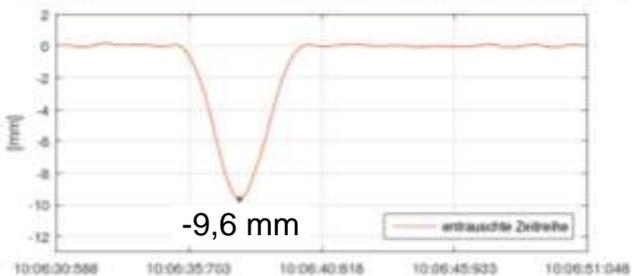
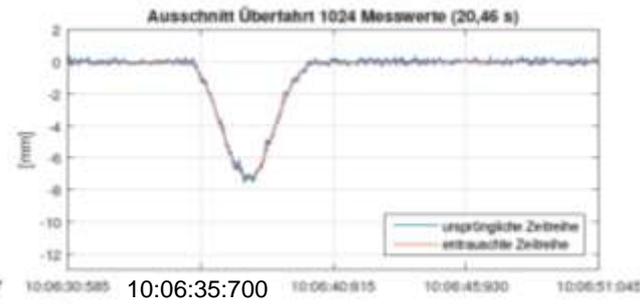
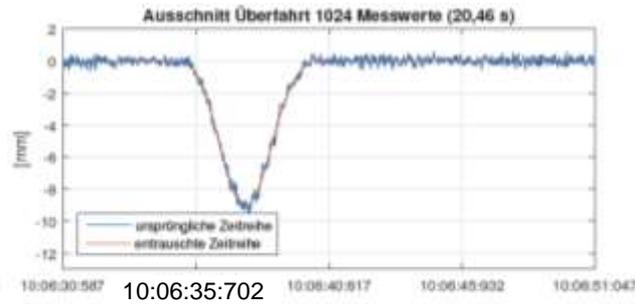
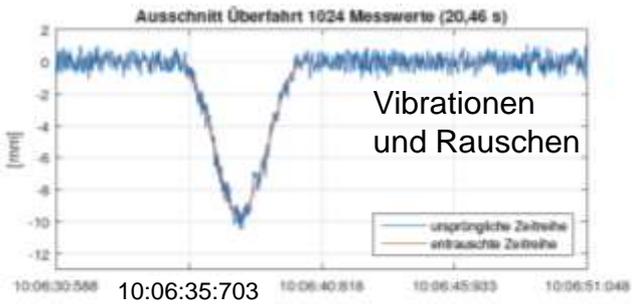
Nochmal
Brücke über
die Regen

3 Profilausschnitte

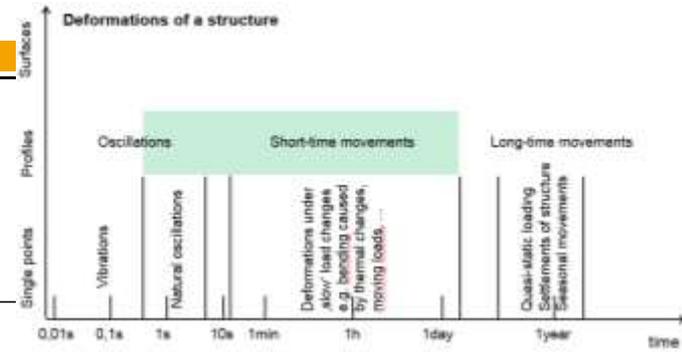


Lastereignis: Wanderlast
Regionalzug mit 2 Anhängern

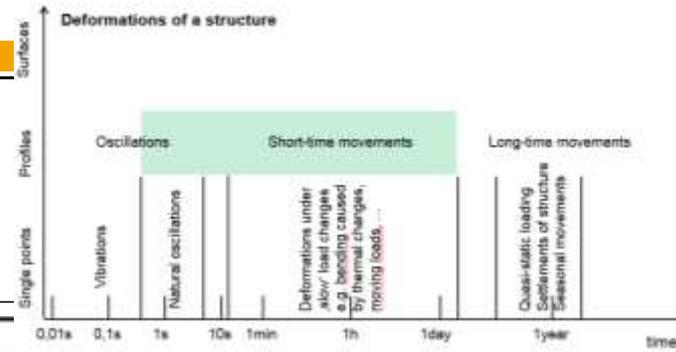
Differenzen zwischen Profiler und
Referenzsensoren (Ind. Wegauf-
nehmer) innerhalb sub-mm



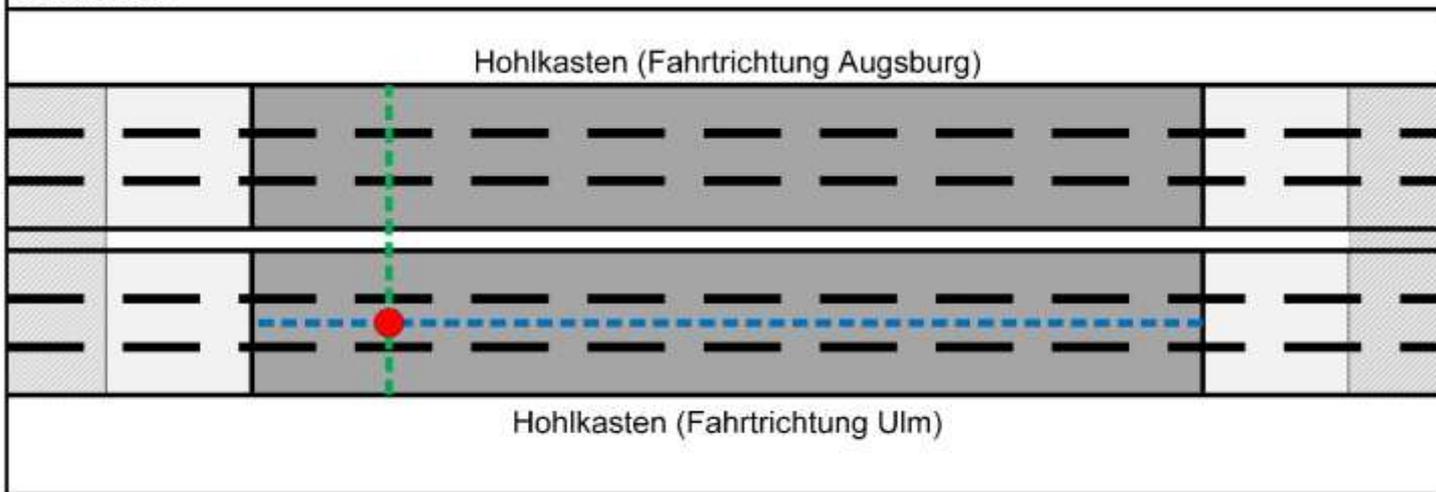
Schwingungen (ICE-Brücke über Schmutter, Nähe Augsburg, Stahl-Hohlkasten)



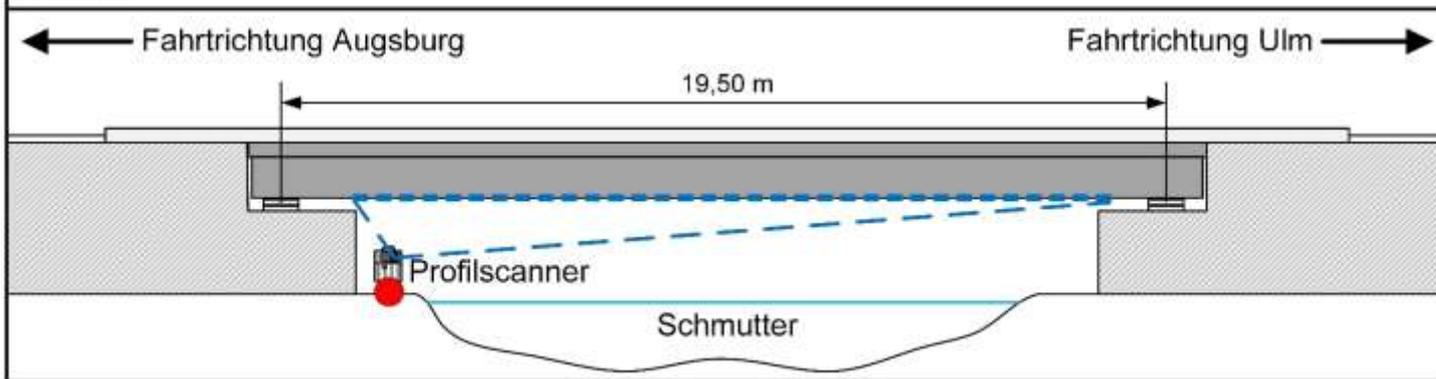
Schwingungen (ICE-Brücke über Schmutter, Stahl-Hohlkasten)



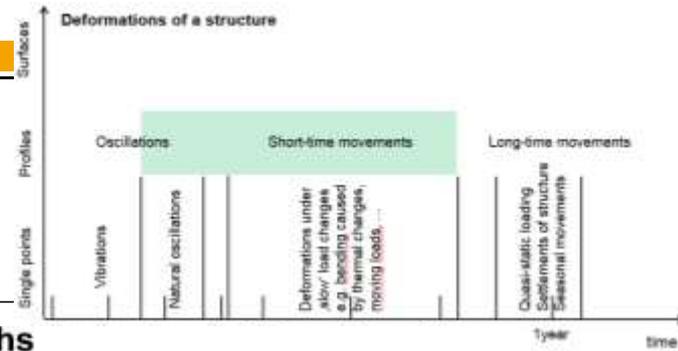
Grundriss



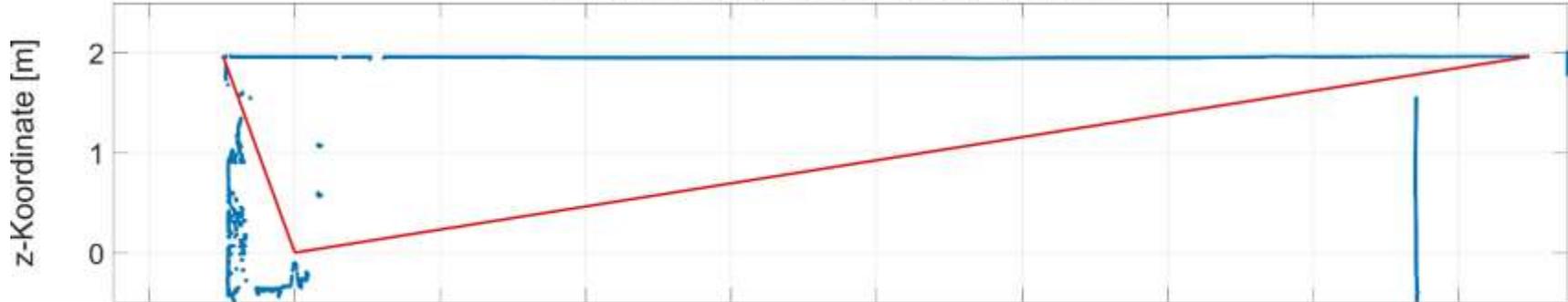
Aufriss



Automatische Vorprozessierung (beispielhaft für ein Profil)



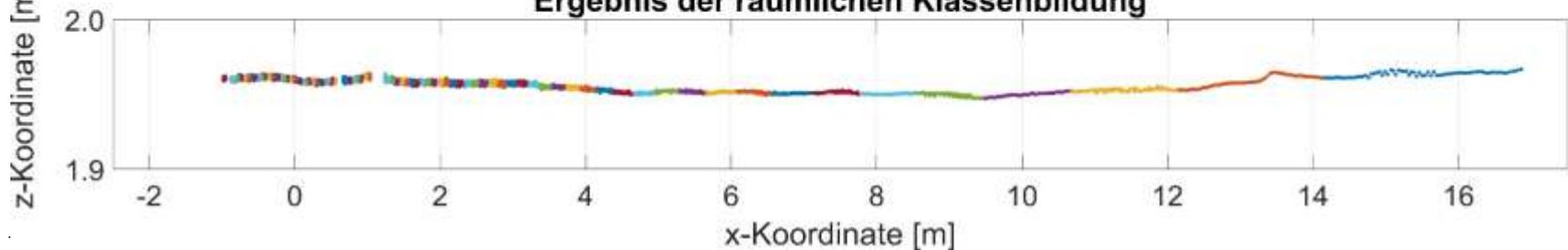
Auswahl des relevanten Profilbereichs



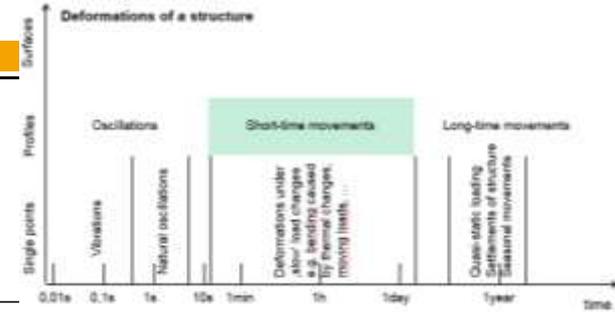
Automatische Analyse des relevanten Profilbereichs



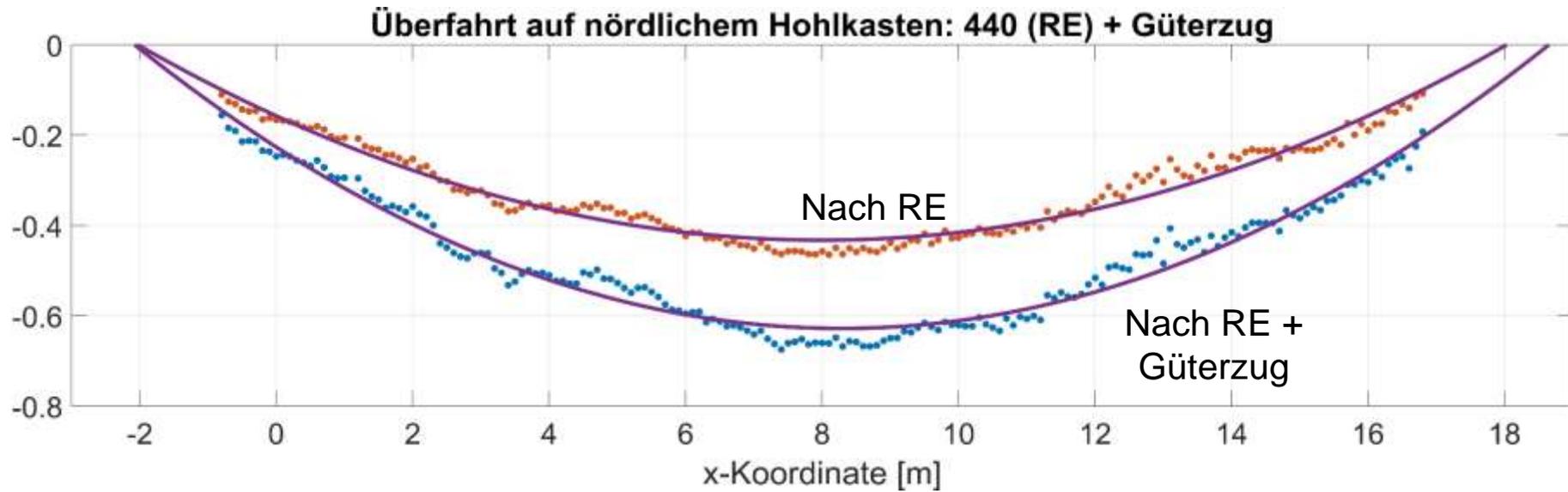
Ergebnis der räumlichen Klassenbildung



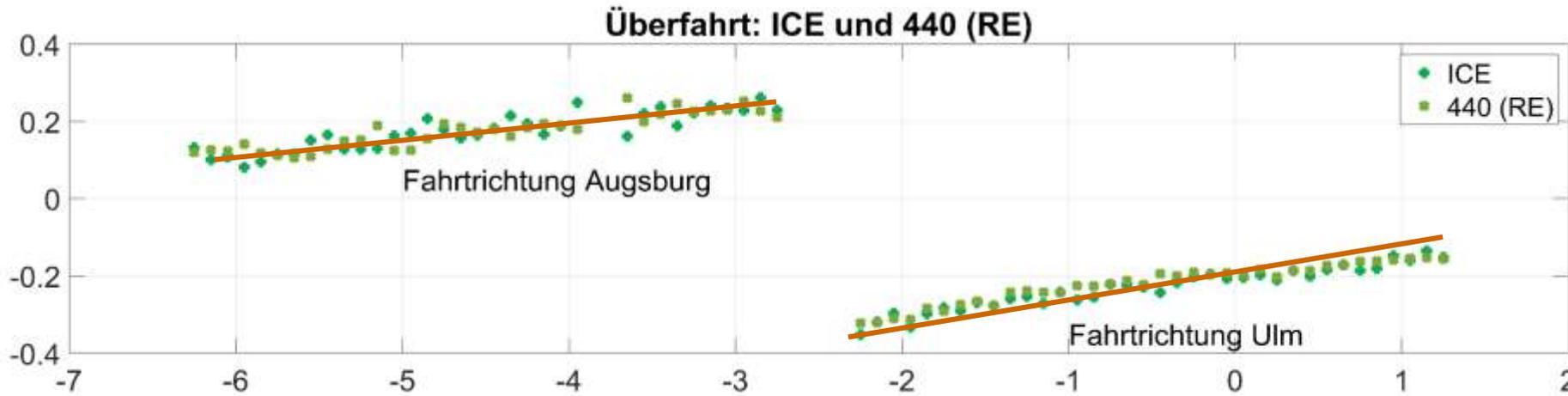
Statische Biegelinie (Experimente Längs und Quer): Durchbiegung nach Überfahrten



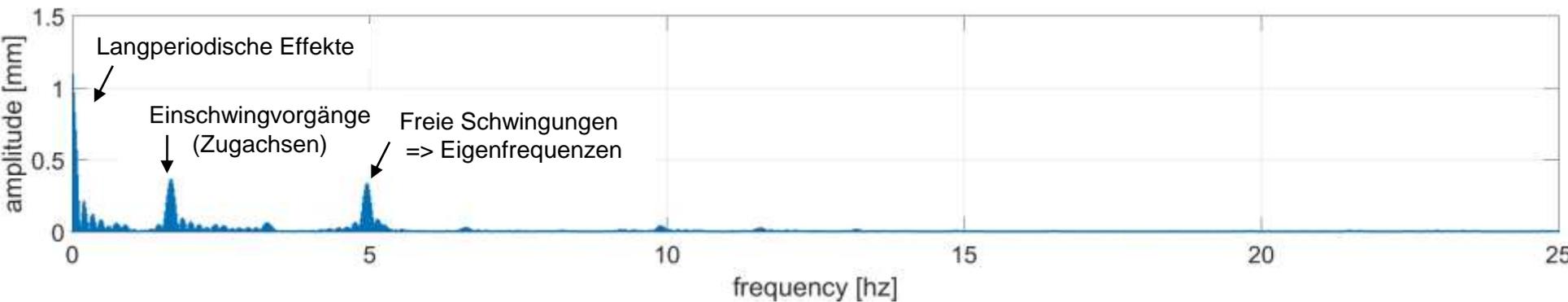
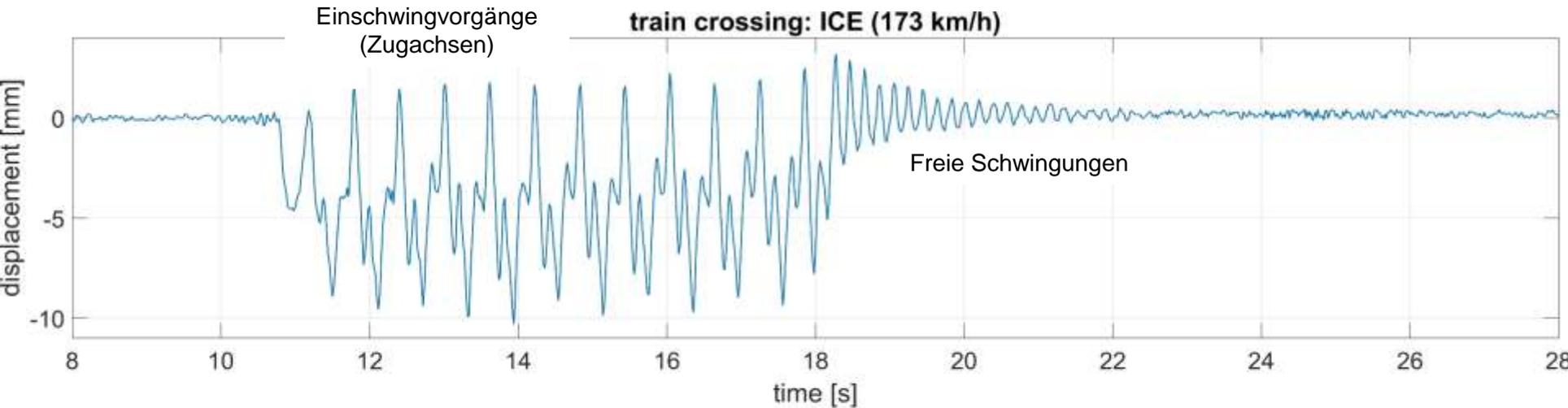
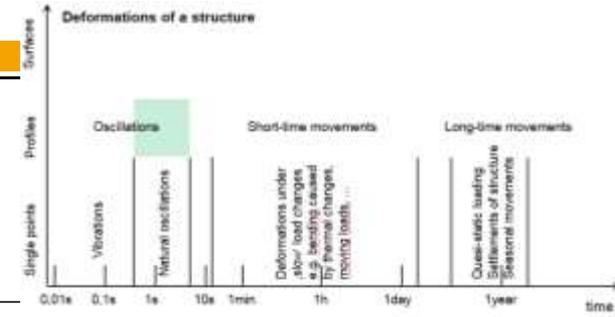
Statische Vertikaldeformation
infolge Überfahrt



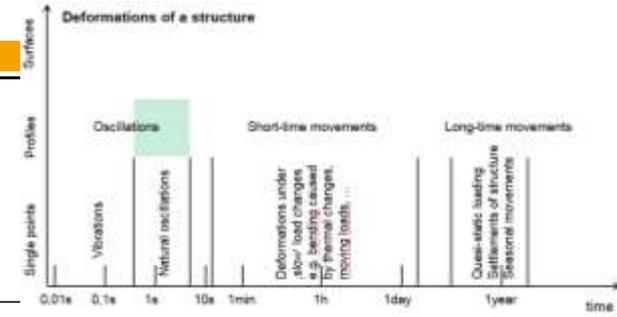
Statische Vertikaldeformation
infolge Überfahrt



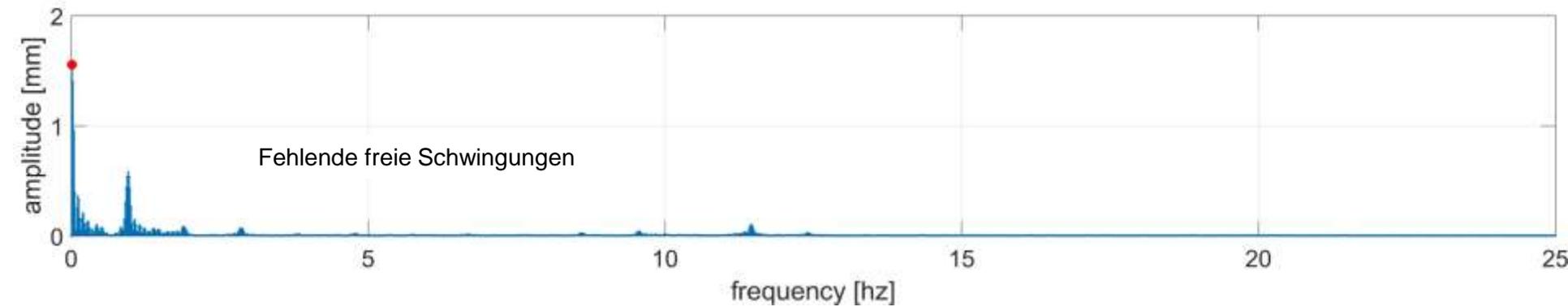
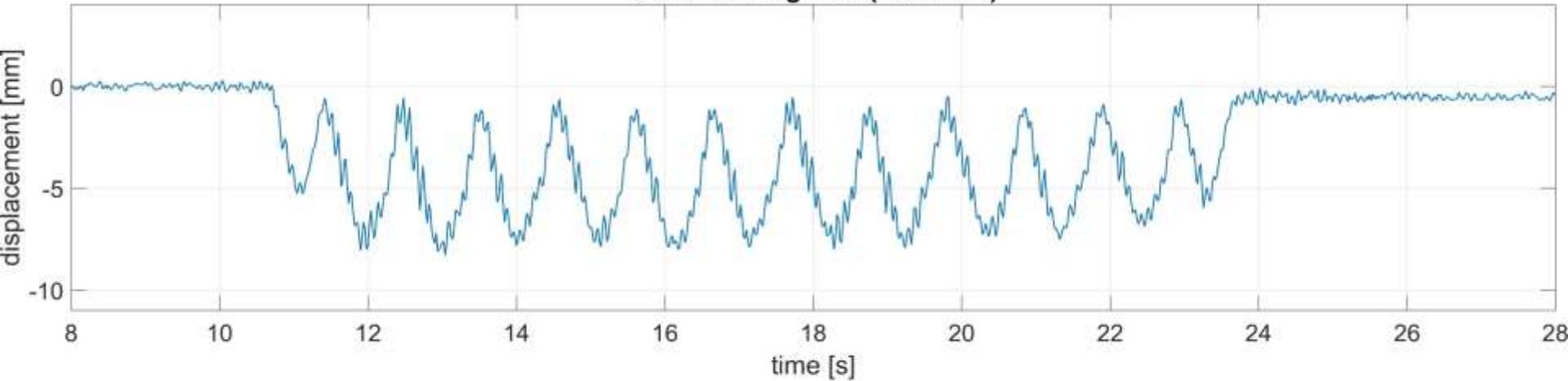
Dynamisch: Schwingungen (ICE mit 173 km/h)



Dynamisch: Schwingungen (ICE mit 100 km/h)



train crossing: ICE (100 km/h)



Darmstädter Echo,
Februar 2019

WIRTSCHAFT SÜDHESSEN

Mit Lasertechnik Risse finden

TU entwickelt neues Verfahren zur Überwachung von Brücken / Scanner ermitteln Schäden

DARMSTADT (web). Die Mitarbeiter der Straßensicherheits-Gesellschaft haben ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden. Das Team der Ingenieurgeodäsie der TU Darmstadt hat ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden. Das Team der Ingenieurgeodäsie der TU Darmstadt hat ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden.

...Dabei ist es möglich, statische und dynamische Deformationen mit hoher Genauigkeit zu messen. Ein Forscherteam der TU Darmstadt hat ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden. Das Team der Ingenieurgeodäsie der TU Darmstadt hat ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden.

Denken

Technische Universität Darmstadt | hoch3 | Mai 2019 | Seite 20

Laserscanner für die Brückensicherheit

TU-Wissenschaftler entwickeln lasergestütztes Messverfahren zur Brückenüberwachung

Tragwerke von Ingenieurbauwerken wie zum Beispiel Brücken müssen regelmäßig überprüft werden. Dies ist oft mit erheblichem technischem und personellem Aufwand verbunden. Ein Forscherteam der TU Darmstadt hat ein Monitoring-Verfahren entwickelt, mit dem ganze Brückenprofile berührungslos mit Profil-Laserscannern erfasst und überwacht werden können.

In Deutschland gibt es weit über 100.000 Brücken – davon allein rund 40.000 Brücken an Autobahnen und Bundesstraßen und circa 25.000 an Eisenbahnlinien. Um die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerke sicherzustellen, müssen sie in bestimmten Intervallen untersucht werden. Viele der Brücken haben ihre Alters- und, aufgrund des stark ansteigenden Verkehrsaufkommens, auch ihre Belastungsgrenze erreicht. Sie müssen daher besonders überwacht werden – eine Herausforderung für die Bauwerke.

Überwachungsmessungen an Brücken erfolgen bislang typischerweise durch manuelle Messungen mit Messgeräten, die in bestimmten Intervallen durchgeführt werden. Diese Messungen sind oft sehr aufwendig und erfordern einen hohen personellen Aufwand. Ein Forscherteam der TU Darmstadt hat ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden. Das Team der Ingenieurgeodäsie der TU Darmstadt hat ein neues Verfahren entwickelt, um Schäden an Brücken zu finden.

Messsystem und Sensorik (GMS3) der TU Darmstadt.

Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen vom Fachgebiet GMS3 haben dabei Brückenmessungen mit einem Profil-Laserscanner durchgeführt. Damit ist es möglich, statische und dynamische Deformationen (zum Beispiel Durchbiegungen) einer Brücke in Zehner-Millimeter-Genauigkeit nicht nur für einzelne Punkte, sondern für komplexe Profile zu ermitteln. Die Messung erfolgt berührungslos, somit können auch bisher unzugängliche Stellen von Bauwerken erfasst werden. Als Ergebnis liefert die gesamte Länge eines Brückenprofils Messwerte vor, die zeigen, wie stark ein Tragwerk im Ruhezustand verformt ist, wie stark es sich bei Belastung verformt und ob diese Deformationen auch innerhalb idiosyncratischer Grenzen liegen. Messung und Auswertung erfolgt dabei weitgehend automatisch.

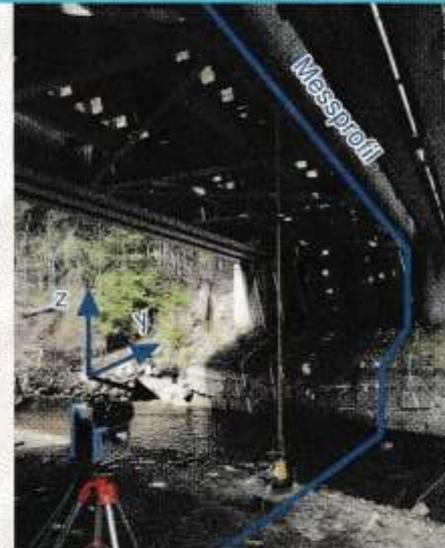
Die in gesammelten Messwerte basieren eine leicht höhere Messgenauigkeit als die mit konventionellen Verfahren ermittelten Daten. Dadurch ist diese Methode ausreißend, um typische

Brücken zu bewerten. Das notwendige Mess- und Auswertekonzept hat Dr.-Ing. Florian Schill im Rahmen seiner Promotion am GMS3 erarbeitet. Das Messsystem basiert auf einem Z+F Profiler Laserscanner. Dabei handelt es sich um einen nach dem Flammenprinzip arbeitenden Profilerscanner, dessen Hauptmessgebiet im Bereich der mobilen Straßenraumerfassung liegt. Die Anwendung zur Überwachung von Tragwerken stellt eine Umkehrung dieses Einsatzzweckes dar, da hier von einer statischen Plattform aus ein sich bewegendes Messobjekt abgetastet wird. Dazu wird der Laserscanner in einer Richtung über das Messobjekt geführt, und zwar mit einer Wiederholrate von bis zu 200 Hz. Die maximale Messerfernung beträgt dabei rund 120 Meter, bei einer maximalen Datenaufnahmerate von einer Million Punkte pro Sekunde.

HOHE ABSTRAKT

Auch andere Bauwerke, wie zum Beispiel Windenergieanlagen, Lärmschutzwände und Fabrikhallen wurden vom Fachgebiet GMS3 bereits mit dem vorgestellten Profil-Laserscanner überwacht. Durch die hohe Abstraktion des Scanners können dynamische Bauwerkparameter, wie zum Beispiel Eigenfrequenzen oder auch Dämpfungswerte, erfasst werden.

Wie „strahlende“ Technik für Brückenüberwachung ebenfalls eingesetzt werden kann, wurde in einem weiteren Projekt an der TU erforscht. Hierin



Profilscanner mit Koordinatenachsen und einem schweißischen Messprofil

das Lagerverhalten von Bauwerken auch mit Mikrowellen erfasst werden können – mit einer Methode, die sonst für die Überwachung von instabilen Hängen eingesetzt wird.

Es führen die neue Technik zusammen. «Durch den reduzierten Aufwand ist eine deutliche Effizienzsteigerung und die wirtschaftliche Überwachung von Brücken möglich.»

(3/1)

Seriös geht es weiter: Felduntersuchungen

a) Vergleiche mit Induktiven Wegaufnehmer



Brücke über die Flanitz
(Bayerischer Wald)

- Stahl-Fachwerk
- Eingleisig



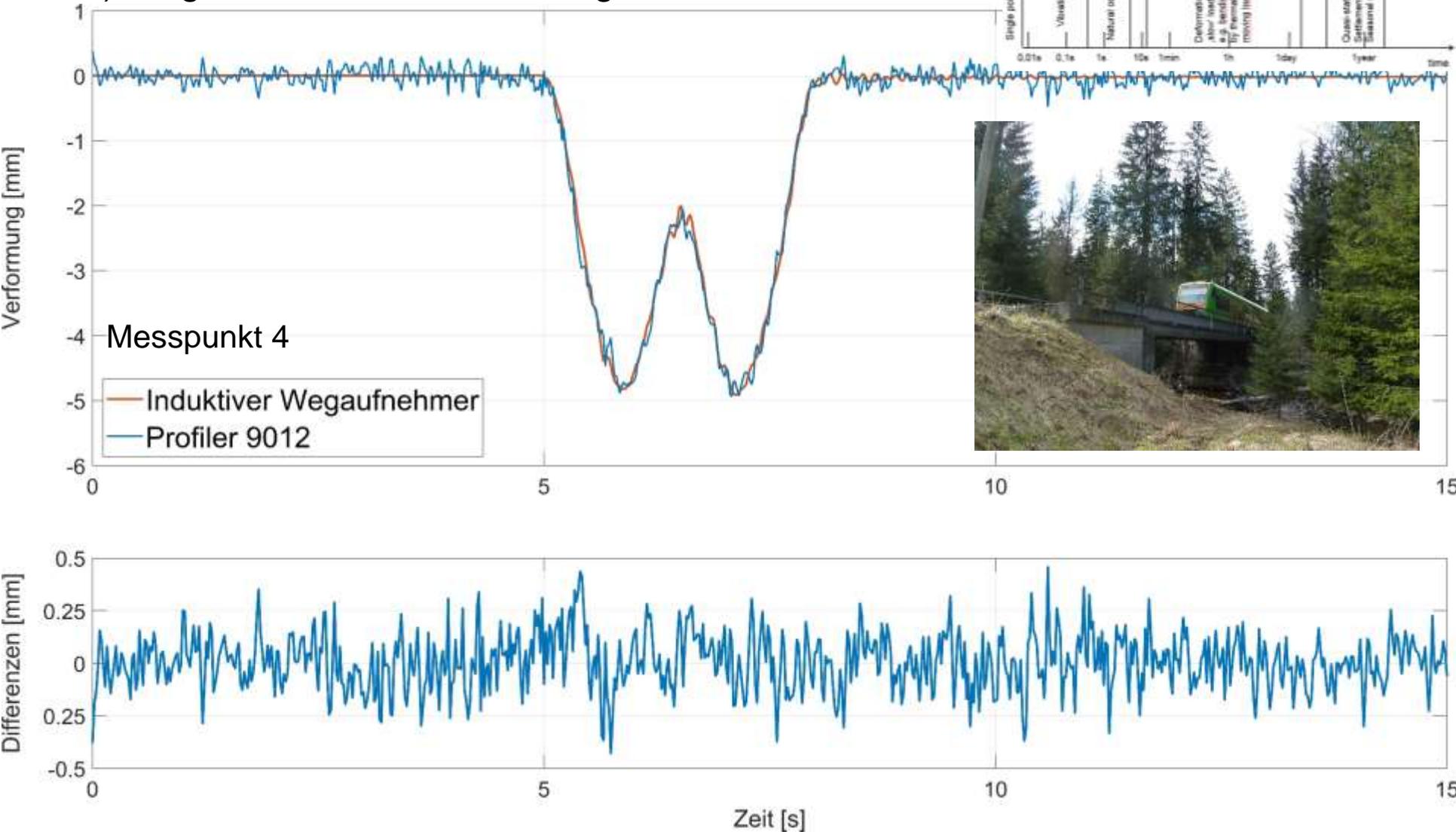
Felduntersuchungen:

a) Vergleiche mit Induktiven Wegaufnehmer



Felduntersuchungen:

a) Vergleiche mit Induktiven Wegaufnehmer



Felduntersuchungen:

b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)



Rhein-Brücke bei Urmitz (Nähe Koblenz), Stahlfachwerk

Felduntersuchungen:

b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)



Messkonfiguration

- Mikrowelleninterferometer IBIS-S (Blick in Zenit)
- Profiler 9012
- IBIS in Relation zur Brücke referenziert durch Faro 3D-Laserscanner (lokales Koordinatensystem)

Felduntersuchungen:

b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)

Grundprinzip Terrestrisches Radar (Mikrowelleninterferometrie)

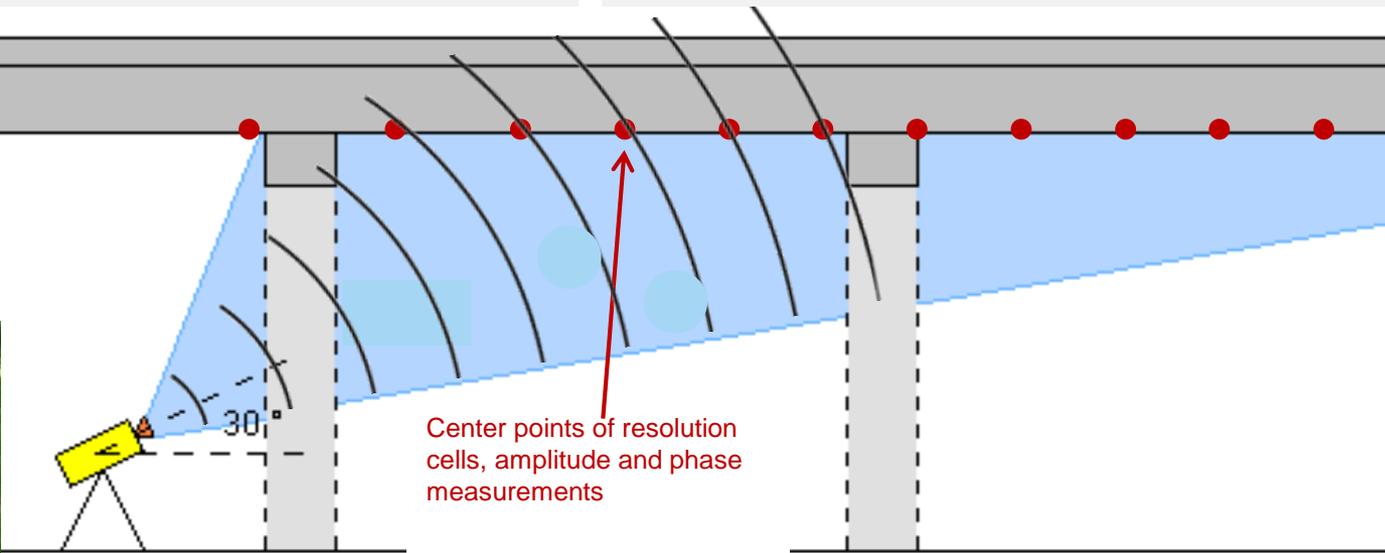
Physikalisches Prinzip:

- Senden / Empfangen von Mikrowellen (reflektiert am Messobjekt)
- Wellenlänge: $\lambda = 17.44 \text{ mm}$ ($f = 17.2 \text{ GHz}$)
- Maximale Reichweite: $d < 4 \text{ km}$

Messprinzip:

- Messen von Amplitude A und Phase ϕ
- Phasendifferenz zweier Messungen (t_1 und t_2) (interferometrische Phase $\Delta\phi$)
=> Bewegung Δr in Blickrichtung

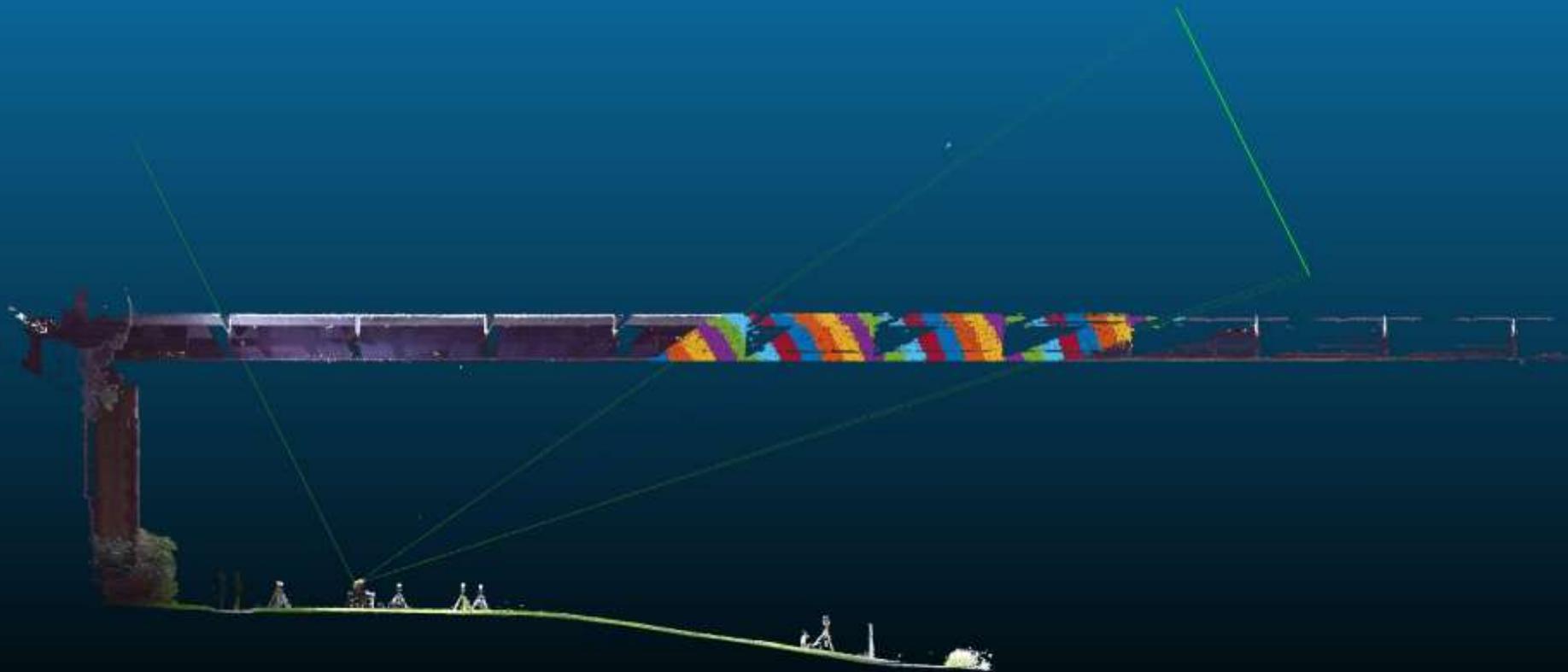
- Relative
- LoS



Felduntersuchungen:

b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)

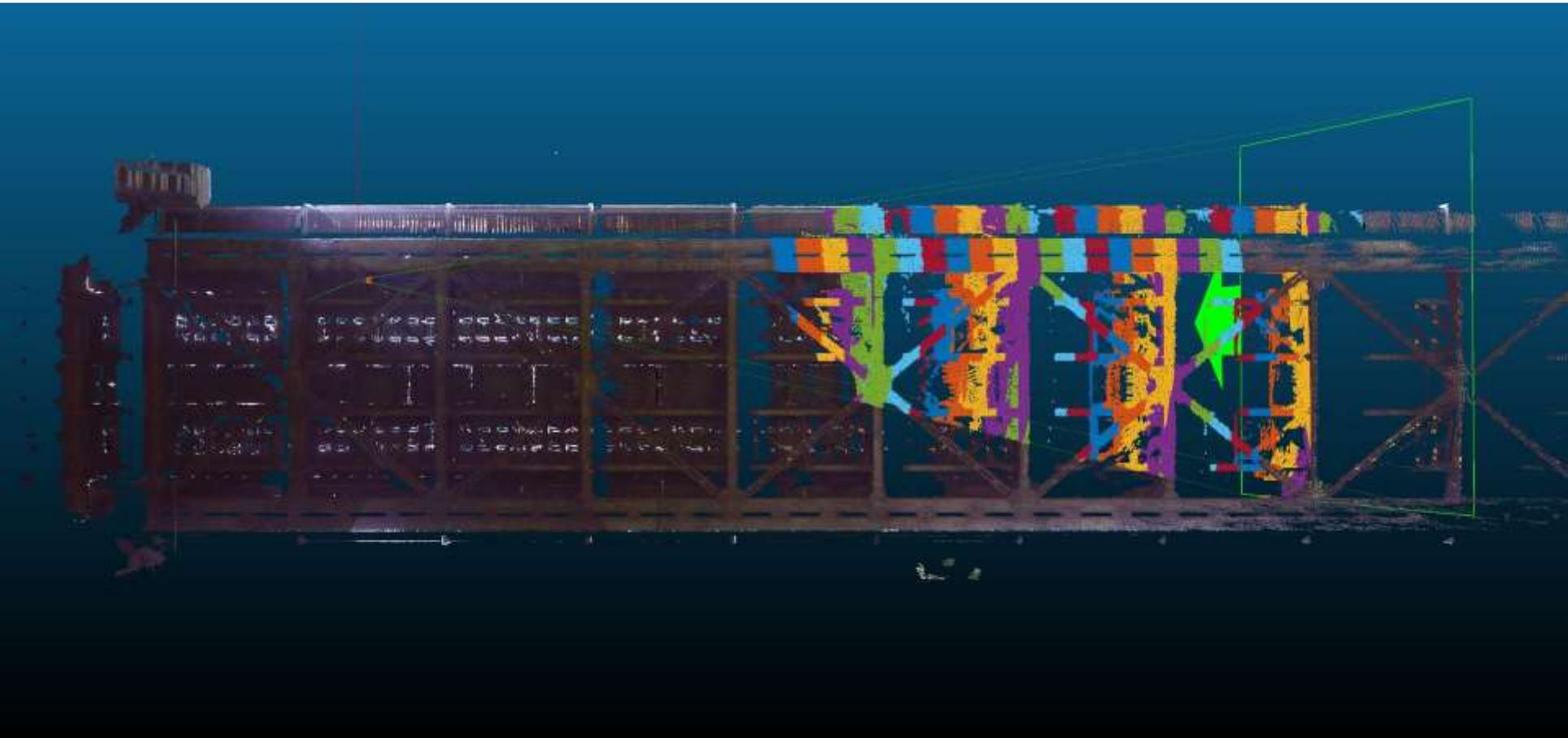
Darstellung Auflösungszellen IBIS bei Schrägmessung an Brücke (Seitenansicht)



Felduntersuchungen:

b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)

Darstellung Auflösungszellen IBIS bei Schrägmessung an Brücke (Ansicht von unten)



Felduntersuchungen:

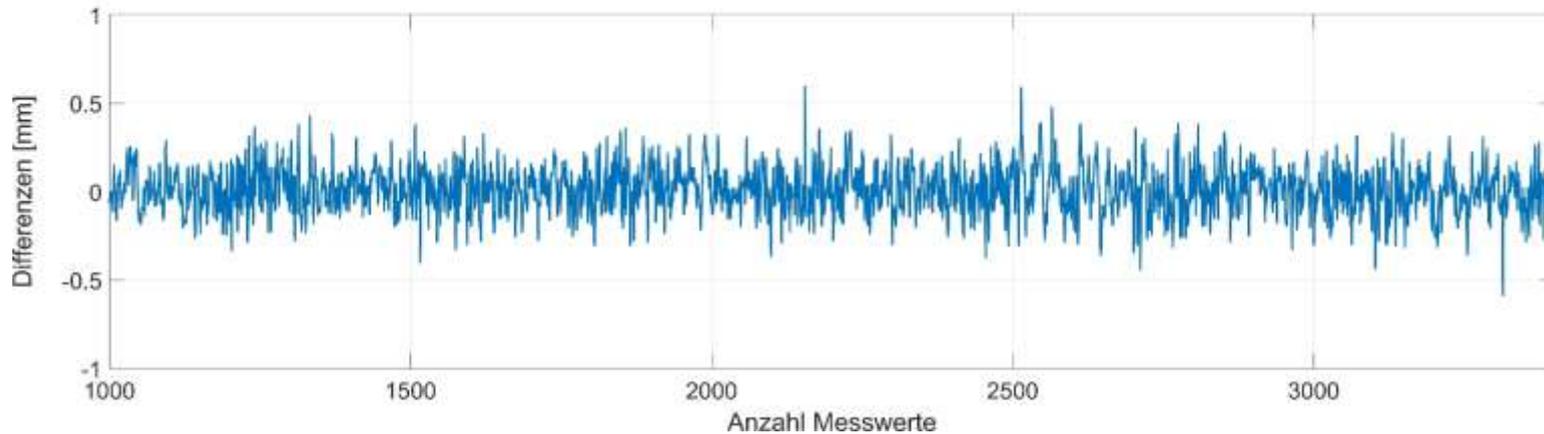
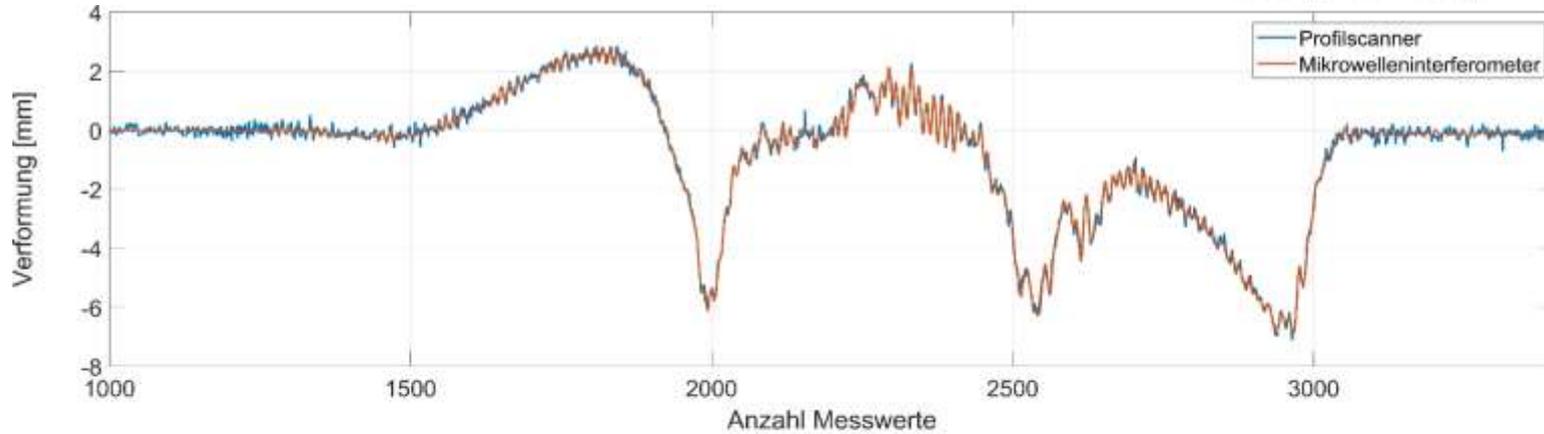
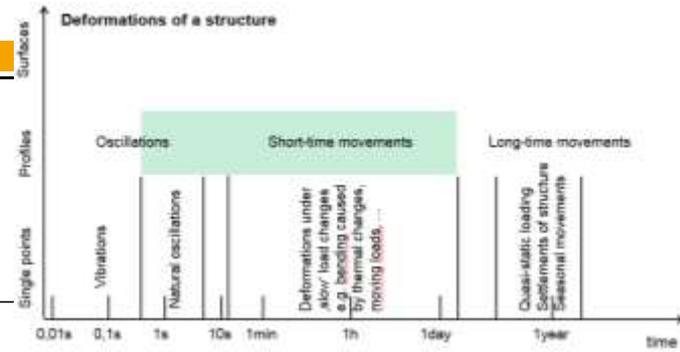
b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)



Ein Traumjob

Felduntersuchungen:

b) Vergleiche mit terrestrischem Radar (IBIS-S)



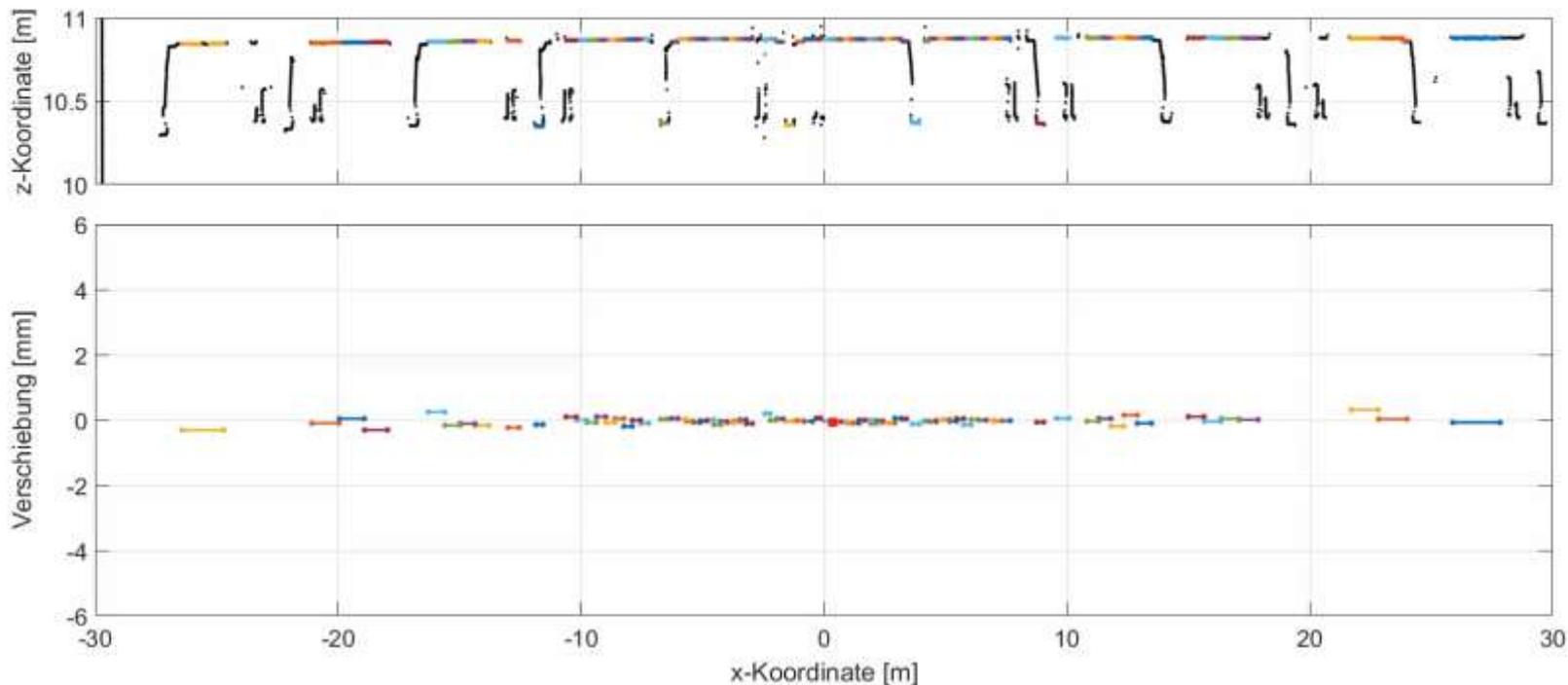
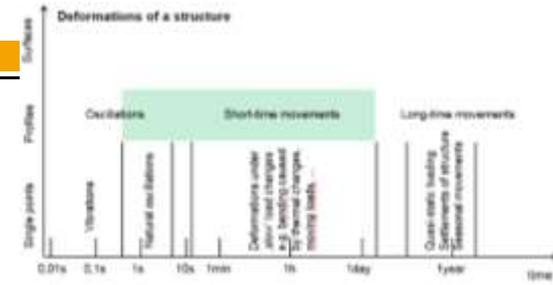
Zenitmessung

IBIS-Zelle:
ca. 2,7 m

Profiler-Klasse:
ca. 0,4 m

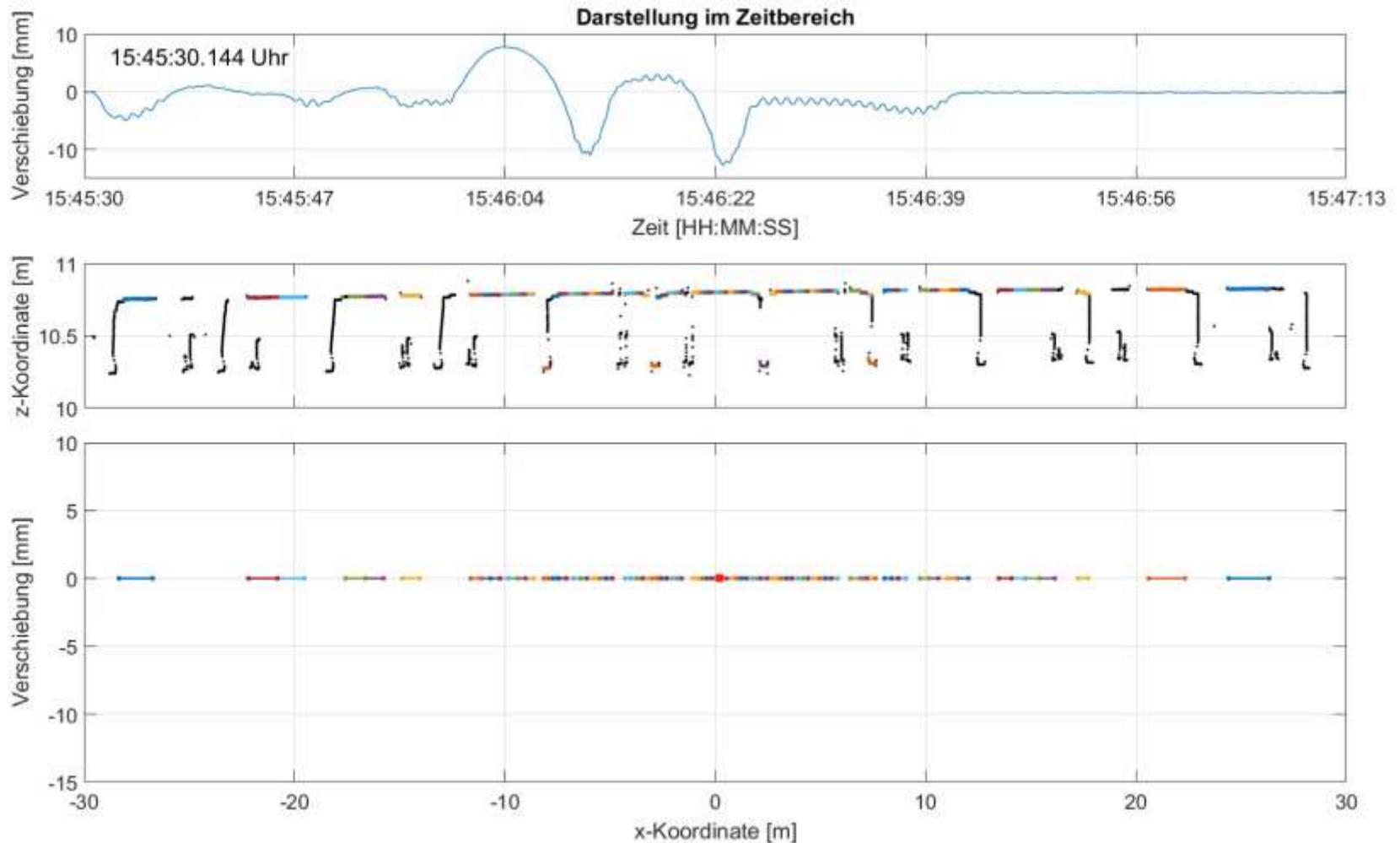
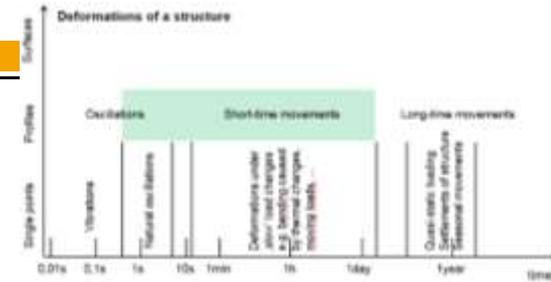
Raum-zeitliche Darstellung des Verformungsverhaltens der Urmitzer Brücke

1 Güterzug



Raum-zeitliche Darstellung des Verformungsverhaltens der Urmitzer Brücke

2 Güterzüge



Und noch eine (erste) Autobahnbrücke ...



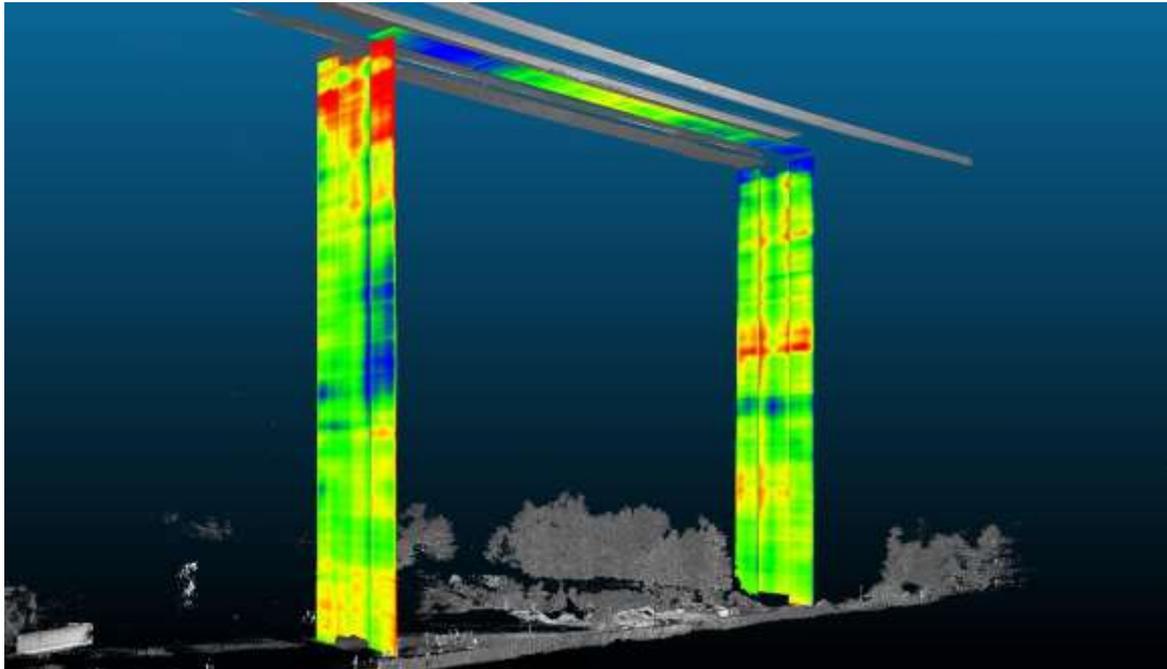
Siegtalbrücke bei Siegen

- Balkenbrücke, Länge 1050 m
- 2 getrennte Spannkonkretüberbauten
- 12 Felder mit min. 63 m und max. 105 m Stützsw.
- Größte Pfeilerhöhe 106 m

Projekt mit Marx Krontal Partner GmbH

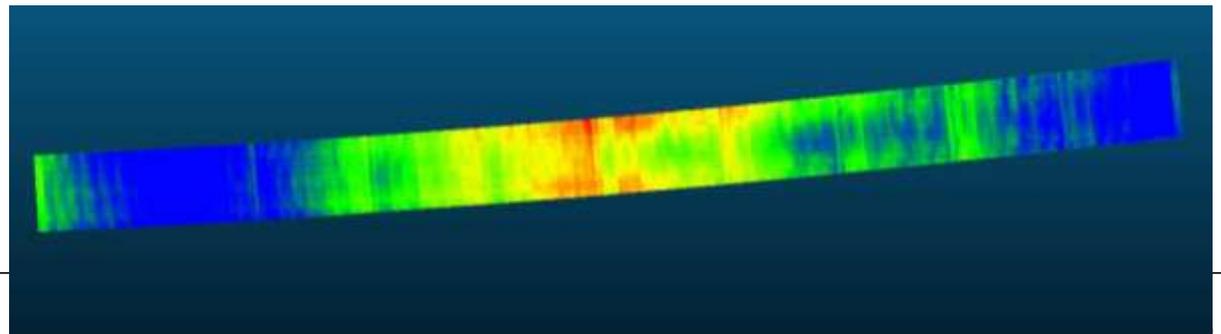
- Ein Brückenfeld
- Ebenheitsprüfung als Grundlage für Planung Rückbaumethode

Und noch eine (erste) Autobahnbrücke ...



Neben „klassischen“ 3D Laserscanning mit Z+F Imager 5016 (Formkontrolle: Ebenheitsprüfung von Unterseite Überbau und angrenzende Pfeiler) ...

wurden wir auch für die Untersuchung dynamischer Verformungen des Überbaus beauftragt.

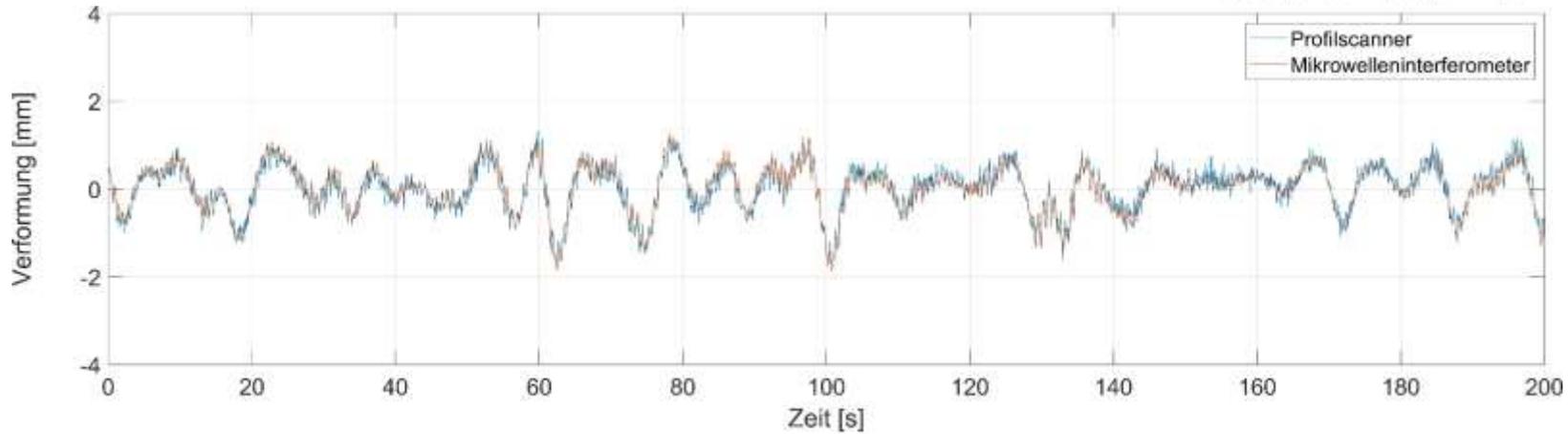
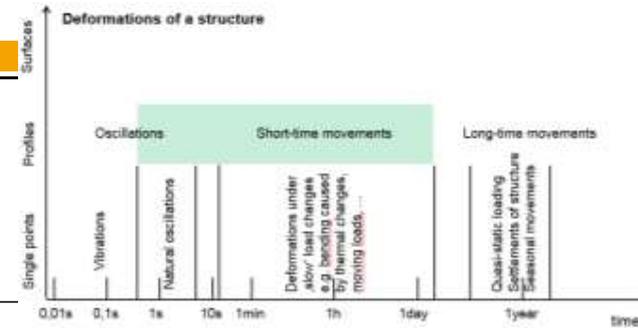


Und noch eine (erste) Autobahnbrücke ...



Getrennte Spannbetonüberbauten
mit unterschiedlichem Anstrich
=> Probleme bei der Reflektivität

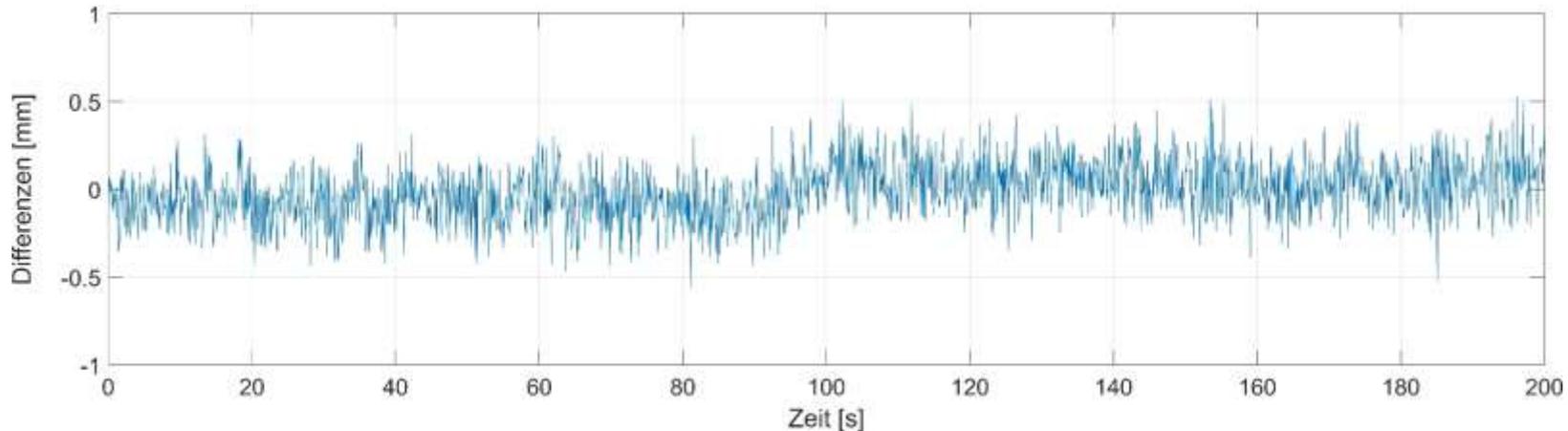
Und noch eine (erste) Autobahnbrücke ...



Zenitmessung

IBIS-Zelle:
ca. 24 m

Imager-Klasse:
ca. 4 m



5. Ausblick: wohin geht die Reise ?

Aktuelle Performanz für Bauingenieure

- Bewertung Amplituden von Durchbiegungen (Längs- und Querprofile) 
 - Schwingungsanalyse in frei wählbaren Segmenten 
- ⇒ Vergleich mit theoretischen (z.B. FE-) Modellen

- In ausgewählten Brückensegmenten:
Bestimmung Häufigkeit und Verteilung von Schwingungsamplituden als Grundlage für Berechnung von auftretenden Schwingspielen
⇒ Extrapolation auf Auswertezeitraum
⇒ Bewertung der Schwingfestigkeit (zumeist statisch, z.B. mittels Wöhler-Linien) 

5. Ausblick

Was kommt als Nächstes ?

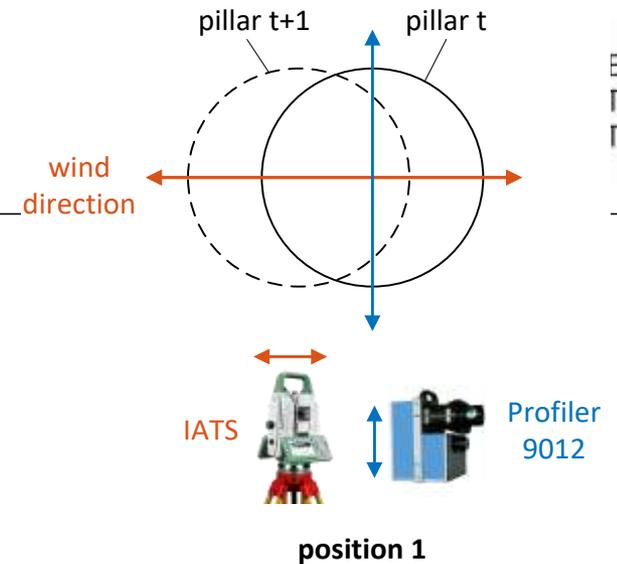
1.) Kontaktlose Sensorkombinationen:

- Profiler mit bildgebenden Sensoren (z.B. IATS)
- Profiler mit GB-SAR (erh. Präzision und Reichweite)

2.) Verbesserte Schadensdetektierung und Lokalisierung:

- Änderung Dämpfung, Frequenzshifts (z.B. Ansätze von VCE)
- Gradientenanalyse: Diskontinuitäten in den Eigenmoden
- Integrierte Analyse: parametrische Modelle (z.B. FE) und Schätzung sich ändernder Strukturparameter (z.B. Steifigkeiten etc.)

Erste Ansätze an TU Berlin (MeMoS), Graz und Darmstadt

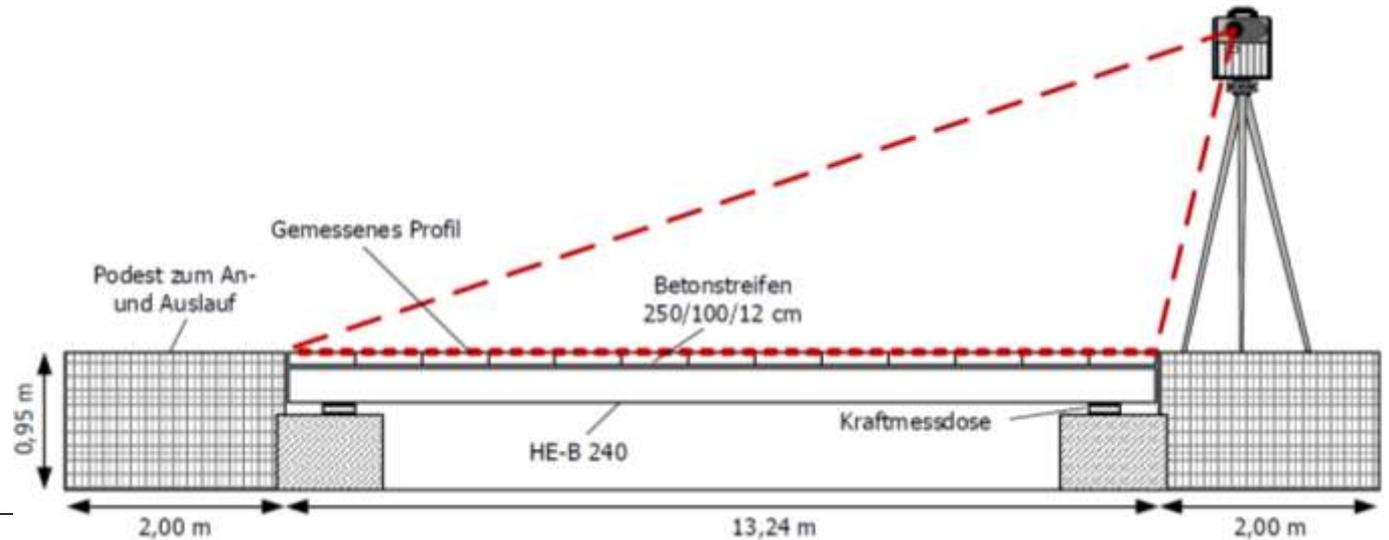
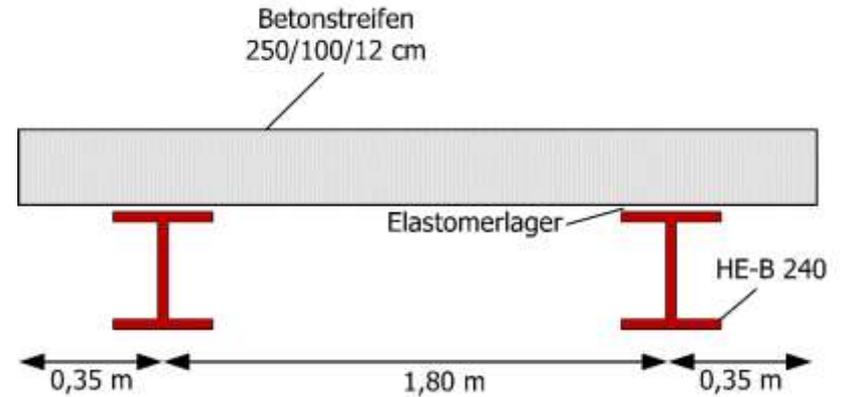


5. Ausblick

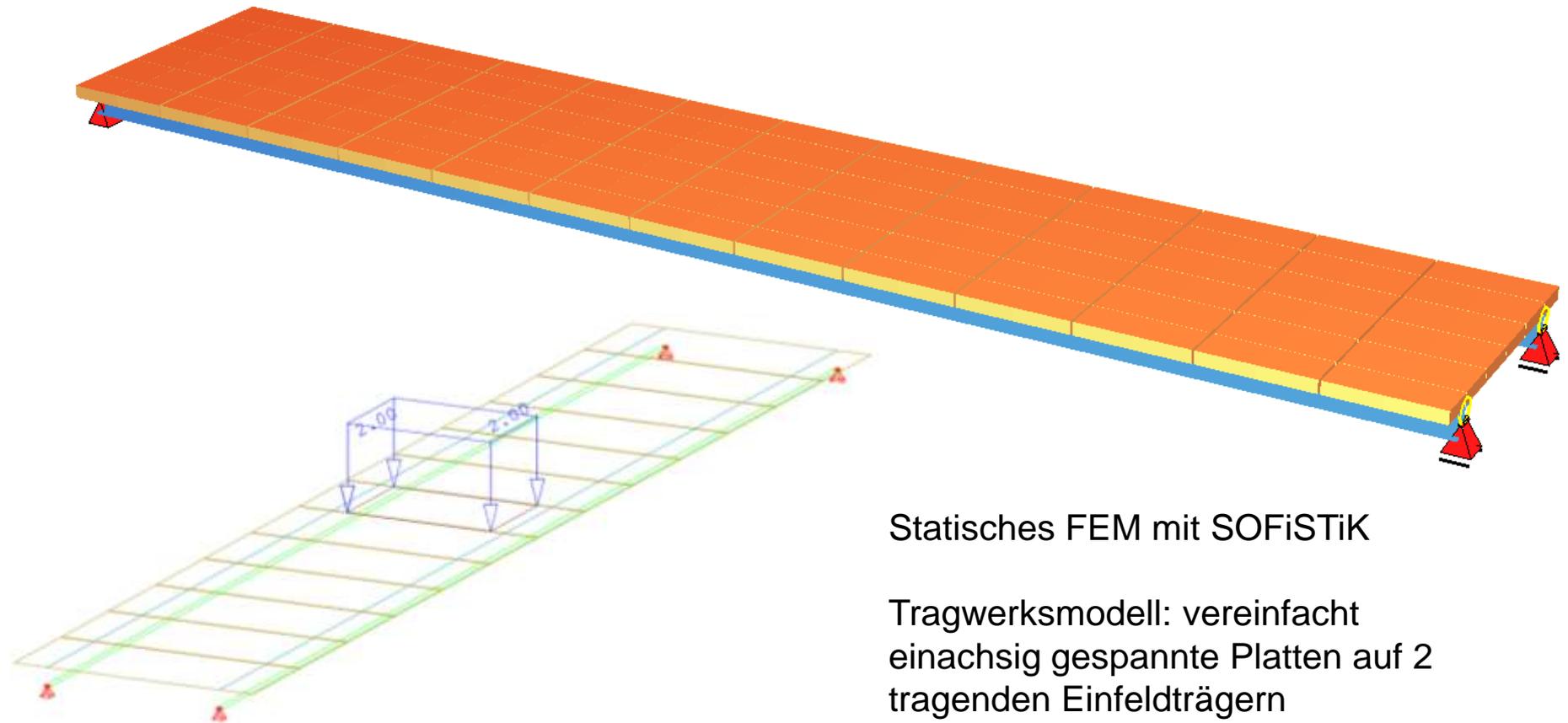
Statische Untersuchung einer
Fußgänger(versuchs)brücke (TU Darmstadt)



Belastungsstufen
0 / 150 / 300 /
300 / 150 / 0 kg



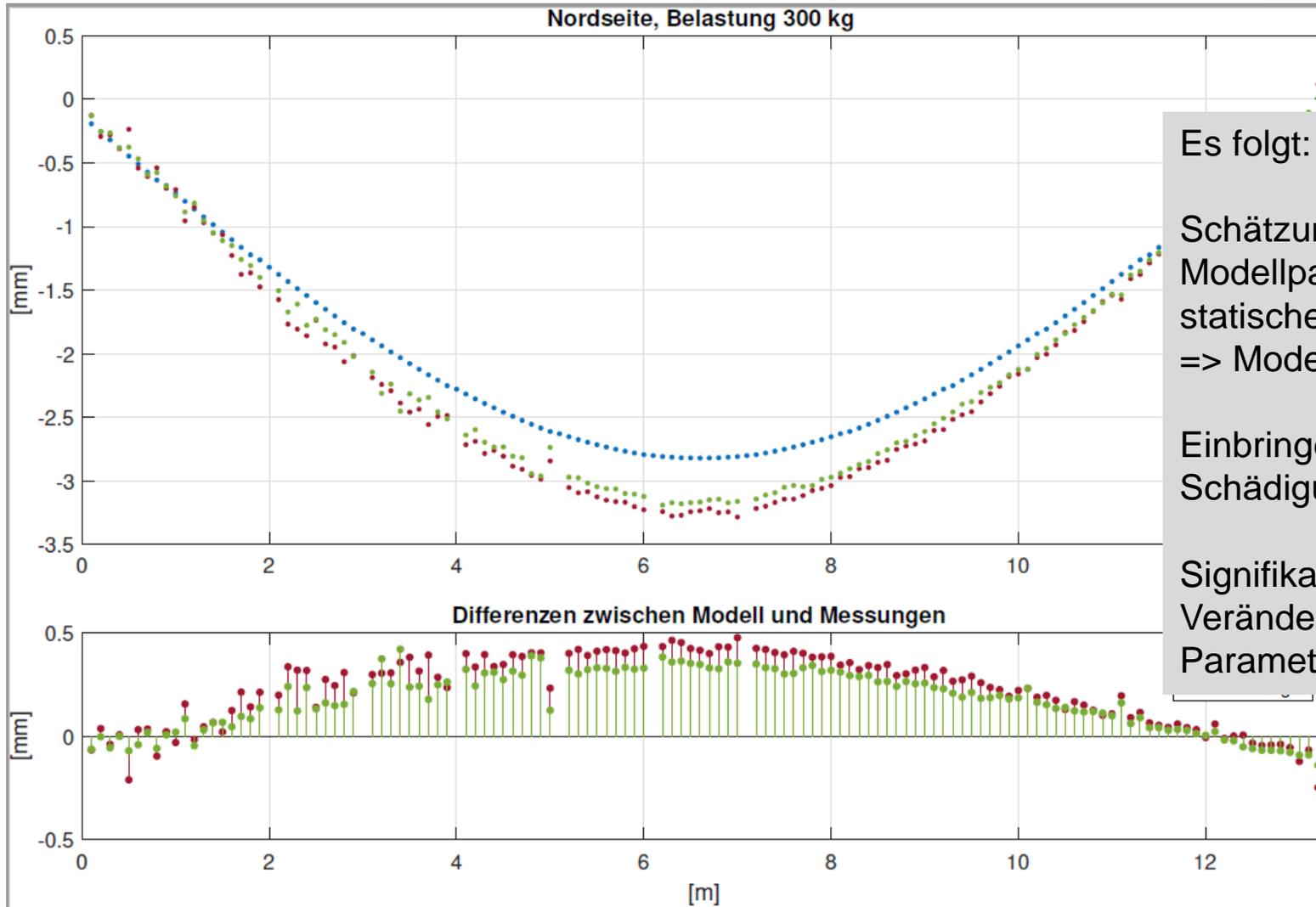
5. Ausblick



Statisches FEM mit SOFiSTiK

Tragwerksmodell: vereinfacht
einachsig gespannte Platten auf 2
tragenden Einfeldträgern

5. Ausblick



Es folgt:

- Schätzung der Modellparameter im statischen KF-Ansatz => Modell-Kalibrierung
- Einbringen von Schädigungen ...
- Signifikante Veränderung von Parametern ?



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

**Andreas Eichhorn
Florian Schill
Anna Sviridova
Kim-Denise Clement**