

Monitoring Model Updating

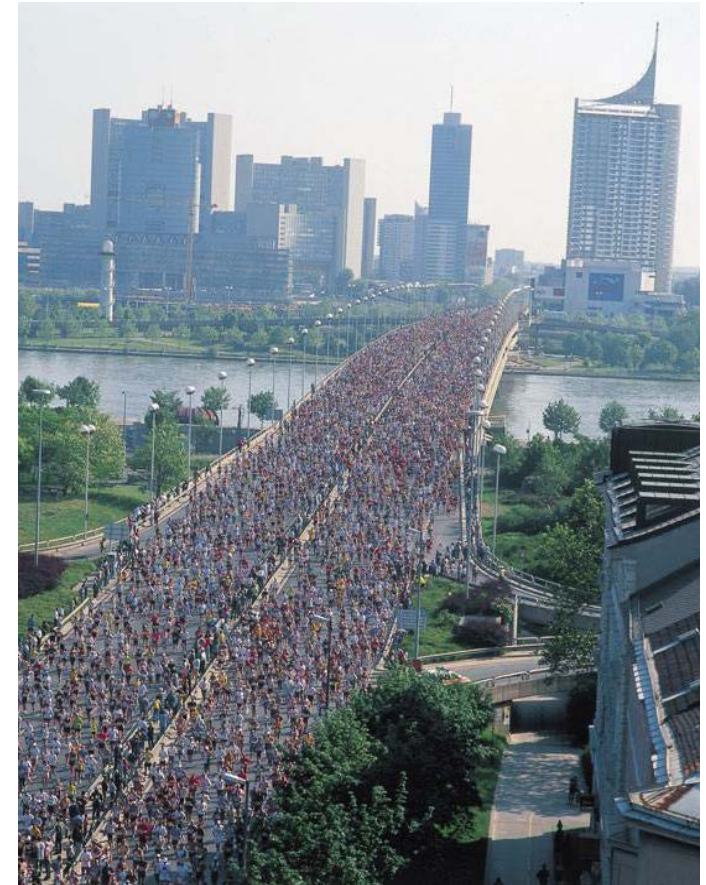
DI Marian Ralbovsky PhD, am 26.2.2016

Inhalte und Ziele des Vortrages – Ihr Nutzen davon

- Aufbau vom Monitoringsystem, Messtechnik
- Zustandsanalyse, Schadenserkennung
 - Stufen der Schadenserkennung
 - Einfluss von Schäden auf dynamische Tragwerkseigenschaften
 - Datenbasierte Methoden
 - Modellbasierte Methoden
- Auswirkung von Mess- und Modellunsicherheiten
- Beurteilung der Erkennbarkeit von vordefinierten Schäden
 - Rissbildung
 - Ausfall von Strukturelementen

Inhalt

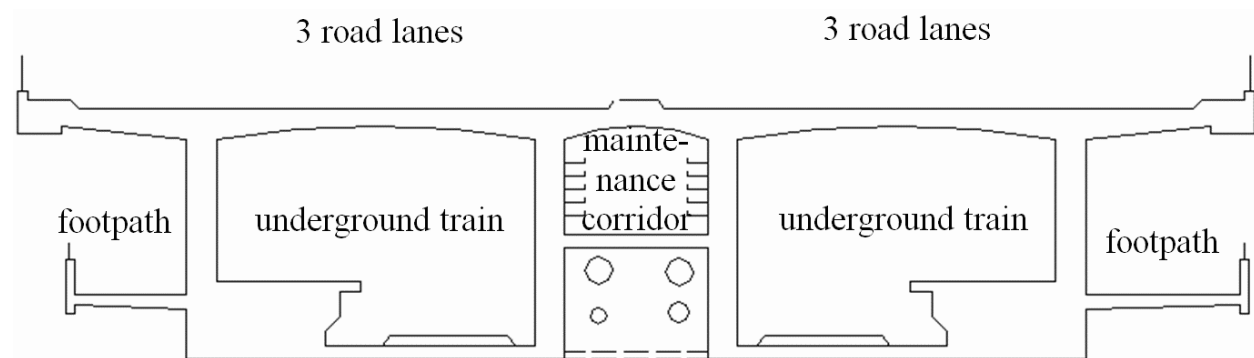
- Ziele vom Monitoring
- Aufbau eines Monitoringsystems
- Zustandsanalyse (Schadenserkennung)
 - Datenbasiert
 - Modellbasiert
- Laborversuche
 - Stahlbetonträger
 - Stahlbrücke
- Schlussfolgerungen



Ziele vom Monitoringsystem

- Messtechnische Erfassung des Strukturverhaltens
- Zustandsanalyse anhand der Messdaten
 - wichtige Tragwerksparameter extrahieren
 - Identifikation abnormaler Änderungen
 - Lokalisation von strukturellen Änderungen
- Abschätzung der Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit
- Planung von Erhaltungsmaßnahmen

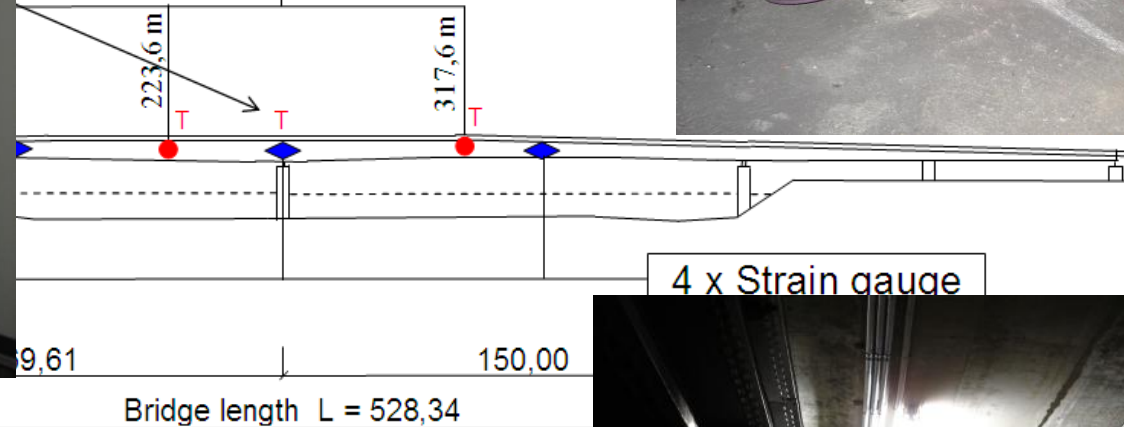
Aufbau vom Monitoringsystem



Aufbau vom Monitoringsystem

or, $f_s=400$ Hz

4 x Acceleration + Structural Temperature



- Platzierung der Sensoren an Stellen mit vermuteter maximalen Strukturantwort

Aufbau vom Monitoringsystem – Messtechnik

- **Vibrationen: Beschleunigung oder Geschwindigkeit**
 - Vielzahl an Sensoren mit unterschiedlichster Empfindlichkeit
 - Faustregel bei Beschleunigungssensoren: größerer Sensor →
→ höhere Empfindlichkeit → tieferer Frequenzbereich
- **Dehnungen**
 - Langzeitstabil: Schwingsaite, optische Sensoren (Kabel)
 - Nicht langzeitstabil: Dehnmessstreifen
 - Auflösung besser 1 μm
- **Neigungen**
 - Kleine Messbereiche empfehlenswert ($1^\circ - 3^\circ$), Auflösung 0.2''
- **Relative Bewegungen**
 - Dilatationsfugen - Lagerbewegungen, Rissbreite
 - Meist angewendet: LVDT-Sensoren
- **Absolute Bewegungen: Setzung, Durchbiegung**
 - Schlauchwagensystem



Prinzip der vibrationsbasierten Schadenserkennung

$$K \cdot x + C \cdot \dot{x} + M \cdot \ddot{x} = F$$

$$k \cdot y + c \cdot \dot{y} + m \cdot \ddot{y} = f$$

Resonanz:

$$(K - \omega_r^2 \cdot M) \cdot \phi_r = 0$$

$$K, M \rightarrow \omega, \phi$$

$$\omega, \phi \rightarrow K, M$$

Transformation:

$$x = \phi \cdot y$$

$$k = \phi^T \cdot K \cdot \phi$$

$$m = \phi^T \cdot M \cdot \phi$$

$$c = \phi^T \cdot C \cdot \phi$$

$$f = \phi^T \cdot F$$

Dynamische Berechnungen

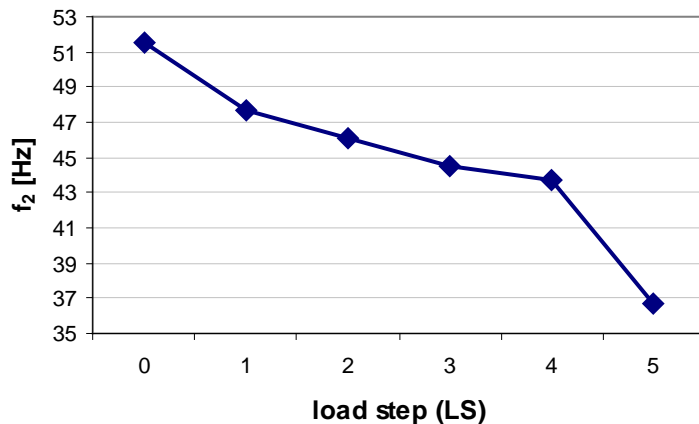
Dynamisches Testen

Zu erwartende Änderungen

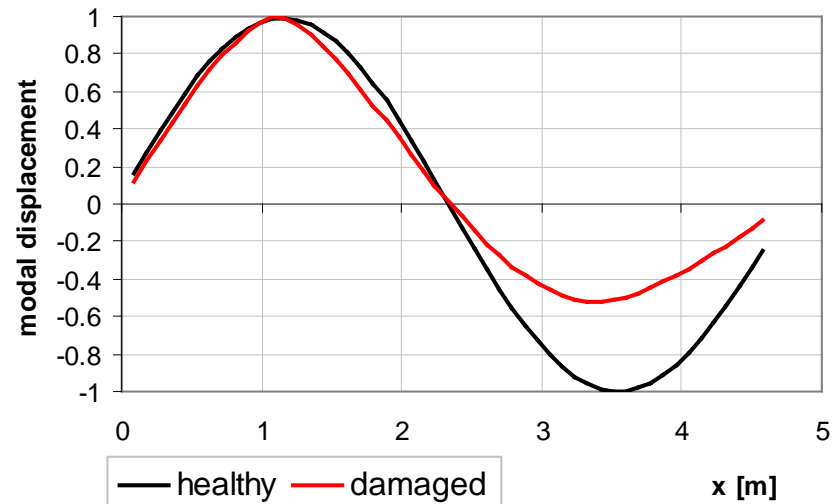
- Schaden \Rightarrow Steifigkeitsreduktion \Rightarrow

Änderung der dynamischen Parameter

Eigenfrequency decrease



Mode shape change



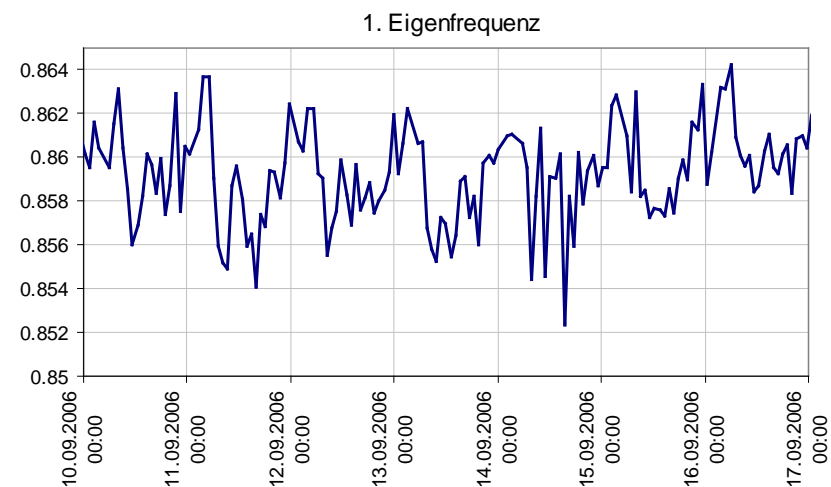
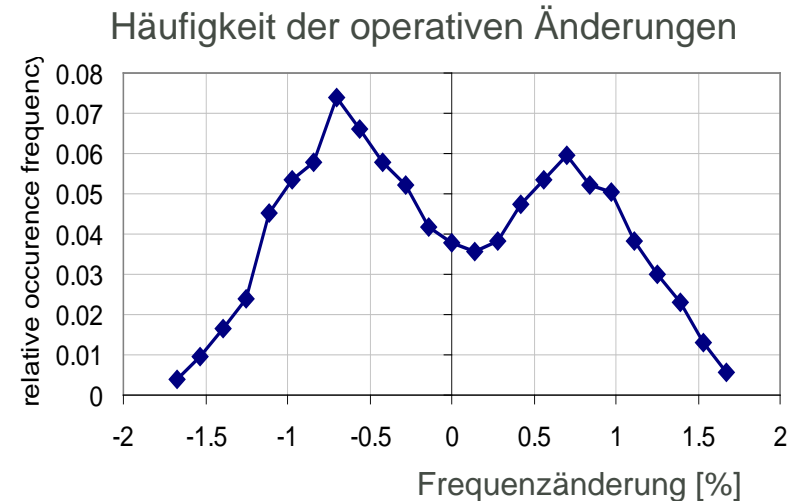
Zustandsanalyse

Stufen der Schadenserkennung

- I. Schadensauftritt (ja/nein)
 - Hat sich etwas geändert? Ist im Tragwerk ein Schaden entstanden?
- II. Schadenslokalisierung
 - Wo ist der Schaden aufgetreten?
- III. Erkennung vom Schadensausmaß
 - Wie groß ist der Schaden?
 - Wie groß ist der betroffene Bereich?
 - Ist im betroffenen Bereich zum Komplettausfall gekommen oder zum Teilschaden?
- IV. Prognose, Maßnahmen
 - Degradationsprognose
 - Planung von Instandsetzungsmaßnahmen

Zustandsanalyse – Datenbasiert

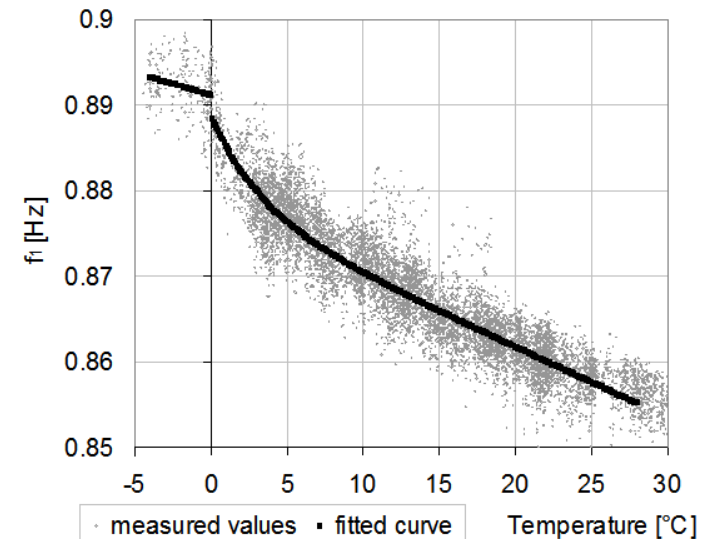
- Schadenserkennung Stufe I:
Schadensauftritt
- Fallstudie: Temperaturkompensationsmodell Reichsbrücke
- Betriebsbedingte Frequenzänderungen
 - Temperatureinfluss
 - Einfluss vom Verkehr
 - Zufällige oder unbekannte Einflüsse
- Schadensbedingte Frequenzänderungen (simuliert)
 - Rissentwicklung
 - Änderung der Randbedingungen



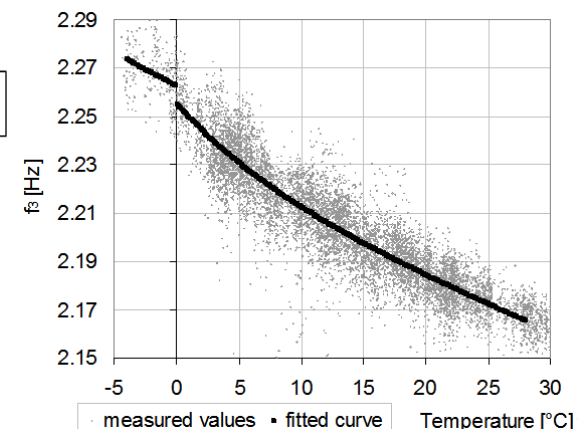
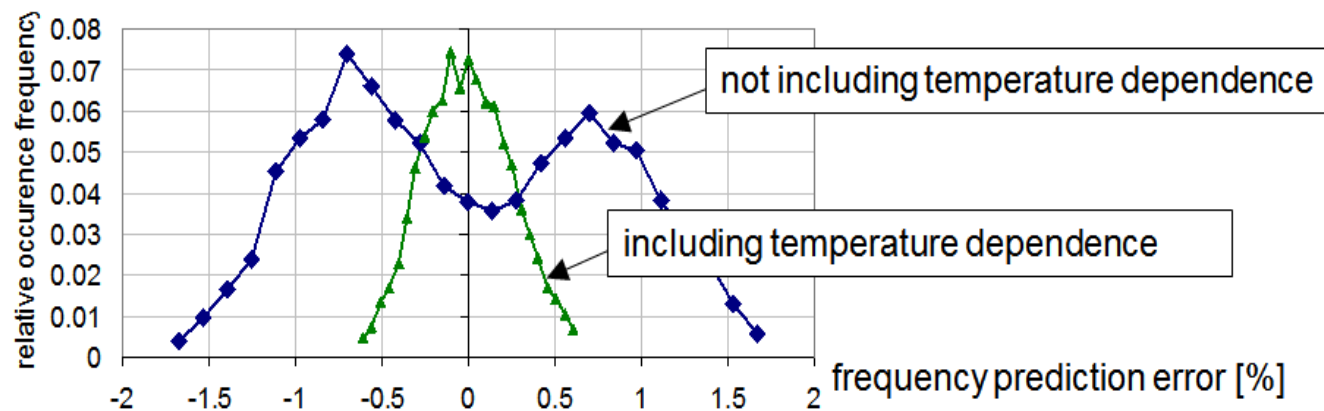
Zustandsanalyse – Datenbasiert

- Einfluss und Auswirkungen von Unsicherheiten (Modellierung und Messung)
- Temperatureffekte
- Regressionskurve $f_i(T)$ – Erwartungswert der Eigenfrequenzen

$$f_i(T) = a \cdot T + b + \exp(c(T - d))$$



Distribution of frequency prediction errors

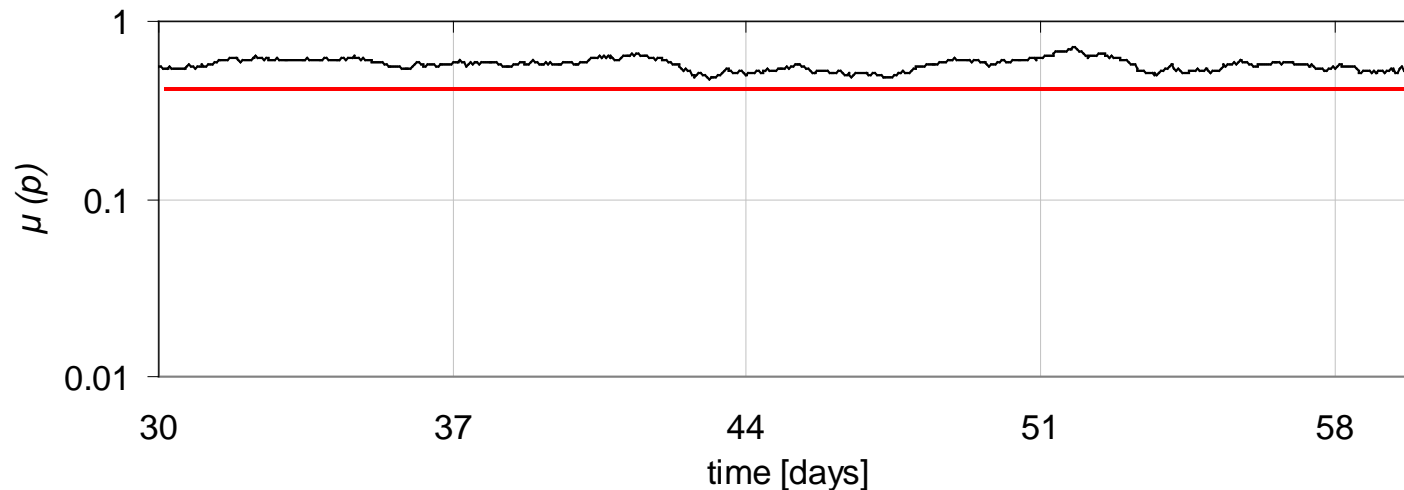


Zustandsanalyse – Datenbasiert

Basiert auf der Wahrscheinlichkeit, dass die Abweichungen vom Erwartungswert größer als die, die aktuell gemessenen sind

Mittelwert des $p(\Delta)$ von letzten 48 Stunden → Indikator der Zustandsänderung

$$p(\Delta) = \iiint_{pdf(\Delta_r) < pdf(\Delta)} pdf(\Delta_r) \cdot d\Delta_r$$

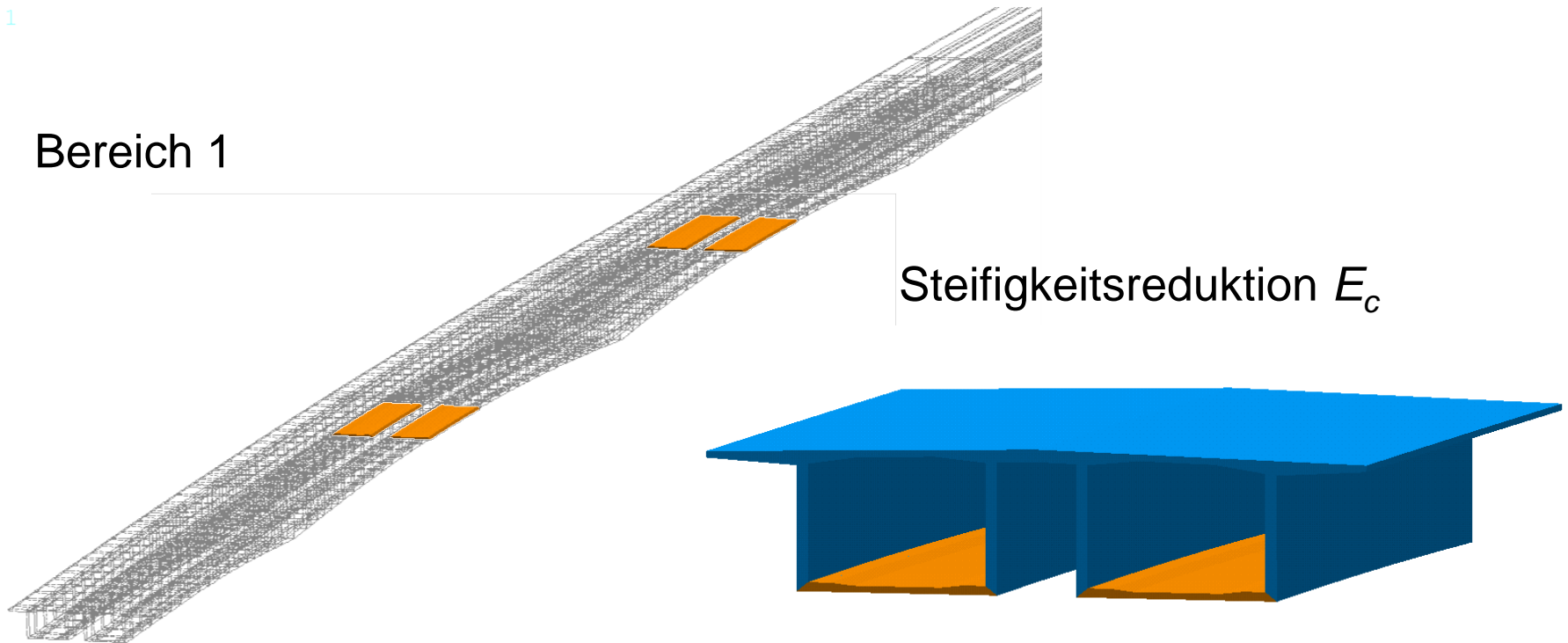


Schadensszenarien

- Feldmitte, 16% der Feldlänge
- Bottom slab of box girders

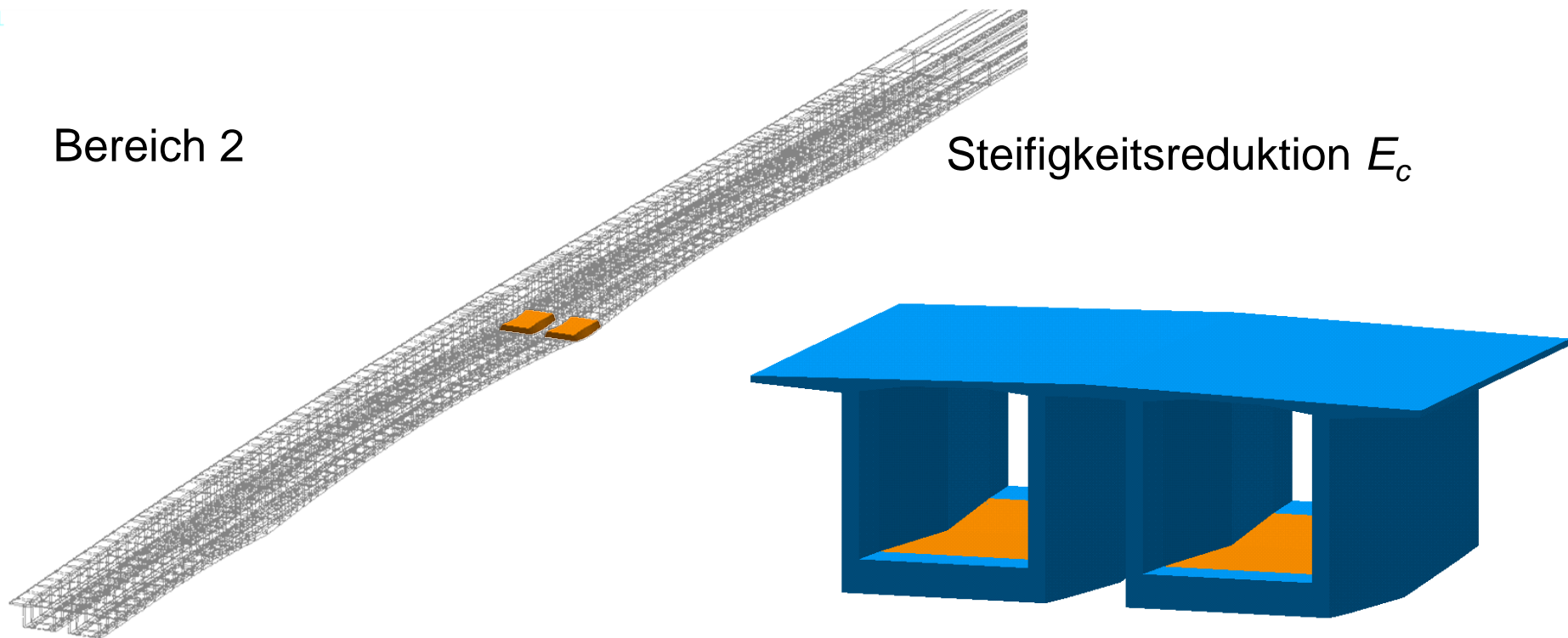
1

Bereich 1



Schadensszenarien

- Stützenbereich
- Bottom slab of box girders

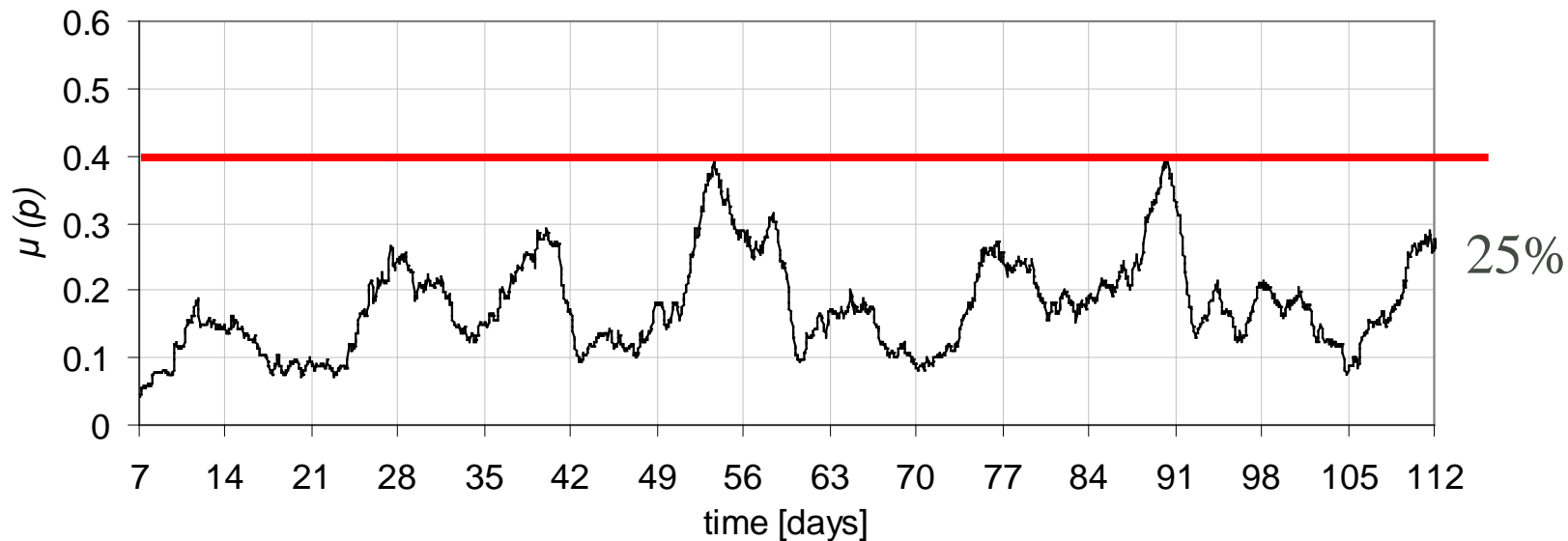


Schadensszenarien

geschädigter Bereich No.	E _b Reduktion	Wahrscheinlichkeit eines Schadens [%]	
		Temperaturmodell	Temperatur+DMS Modell
1	10%	0.3	0.9
1	25%	28.8	48.9
1	50%	91.4	96.9
2	10%	5.1	9.8
2	25%	63.8	80.2
2	50%	99.8	99.1
2	100%	100.0	100.0

Schadensszenarien

E_c reduction	Δf_1 (%)	Δf_2 (%)	Δf_3 (%)	
10 %	-0.14	-0.14	-0.04	<u>not identifiable</u>
25 %	-0.37	-0.38	-0.58	<u>identifiable</u>
50 %	-0.91	-0.92	-1.67	identifiable

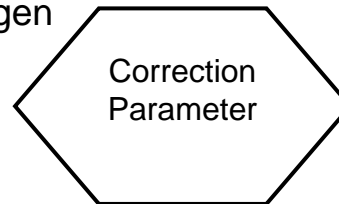


Zustandsanalyse – Modellbasiert

Computergestütztes iteratives Lösungsverfahren

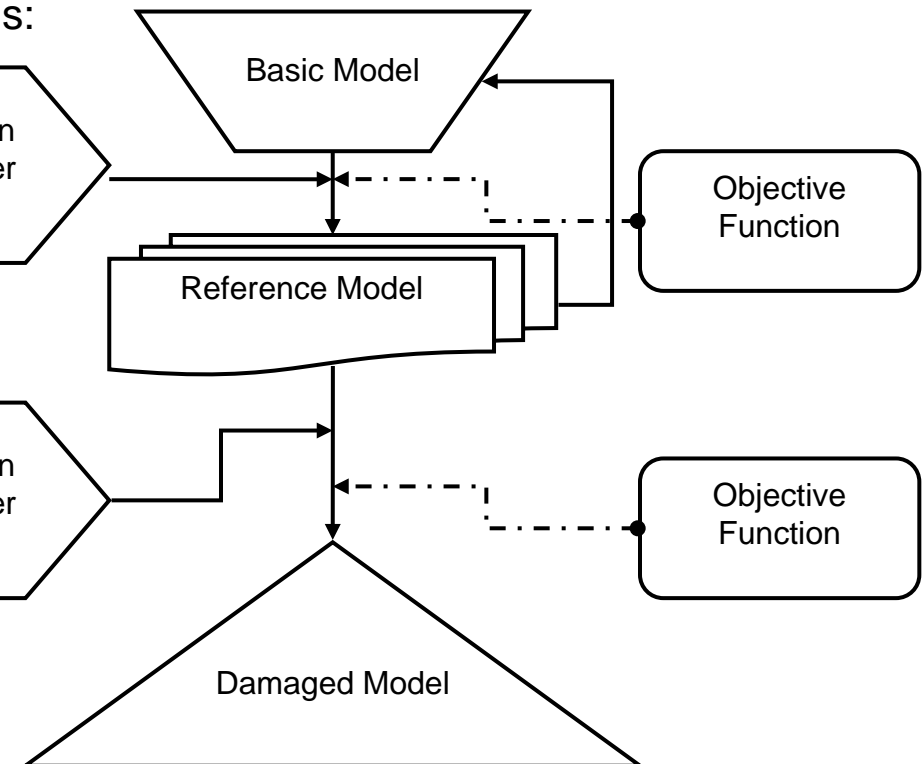
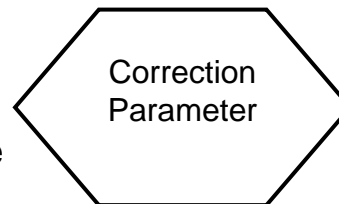
- Korrekturparameter des Referenzmodells:

- Steifigkeit der Randbedingungen
- Elastizitätsmodulus
- Mitwirkung nichttragender Elemente



- Korrekturparameter in der Schadenserkennung:

- Steifigkeit einzelner Bereiche
- Steifigkeit einzelner Elemente



Zustandsanalyse – Model Updating

- Stufe II und III
- parametrisches FE-Model: $K^t(p), M^t(p) \rightarrow \omega^t, \phi^t$

- Optimierung der Modelparameter mit dem Ziel:

$$\omega^t = \omega^m, \phi^t = \phi^m$$

- Optimierungsalgorithmus (eine mögliche Variante):

- kompliziert, rechenaufwendig
- Iterativ, ca. 50-500 Iterationen nötig
- In jeder Iteration werden die dynamischen Eigenschaften des Modells ca. 5-50 x Berechnet
- Für kleine FE-Modelle gut anwendbar

$$R_r = (K^t - \omega_r^{m2} \cdot M^t) \cdot \phi_r^m$$

$$B_{G,r}(p) = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial R_{G,r}(p)}{\partial p_1} & \frac{\partial R_{G,r}(p)}{\partial p_2} & \dots \frac{\partial R_{G,r}(p)}{\partial p_n} \end{array} \right]$$

$$L = \sum_{r=1}^m B_{G,r}(p)^T \cdot B_{G,r}(p)$$

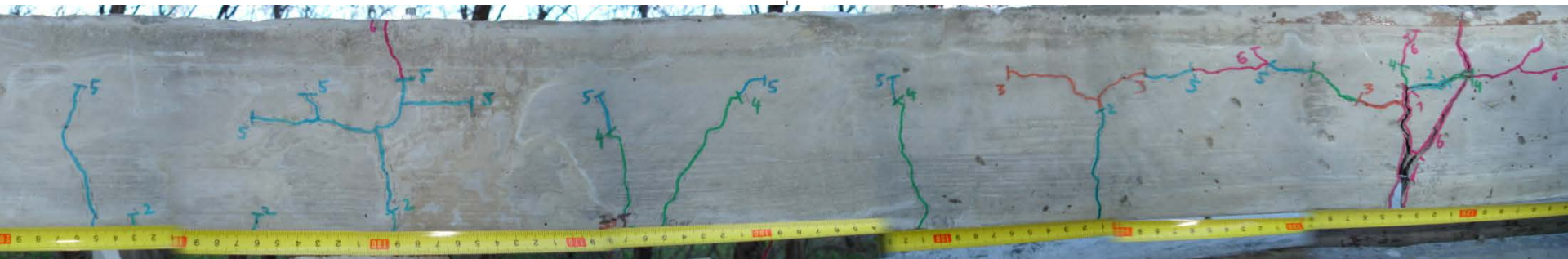
$$P = - \sum_{r=1}^m B_{G,r}(p)^T \cdot R_{G,r}(p)$$

$$L \cdot \Delta p = P$$

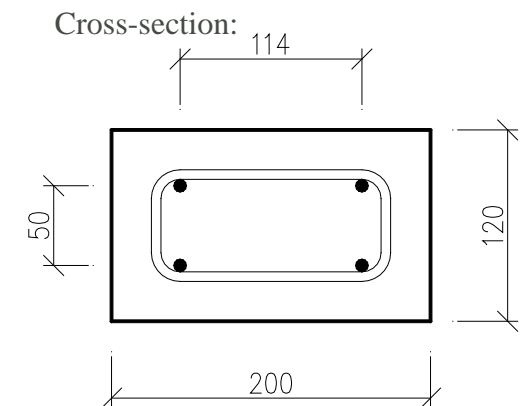
Optimierungsproblem

- Gut gewählte Modellparameter
 - Stabilität des Algorithmus
- Qualität des Basis Modell
 - Wenn das Basis Model fehlerhaft ist, erhält man keine physikalisch korrekte Lösung
- Randbedingungen
 - Evt. Reibungen in den Lagern, Steifigkeit vom Untegrund
- Lokale Minima / Globales Minimum
- Berücksichtigung der Messdatenstreuungen
 - Messfehler und Modellfehler werden durch den Prozess fortgepflanzt
 - Lösung durch Implementierung vom 2-stufigen Verfahren:
 1. Minimierung der Messung-Modell-Differenzen innerhalb der Datenstreuungen
 2. Berechnung der Modellkorrekturparameter

Laborversuch – Stahlbetonträger

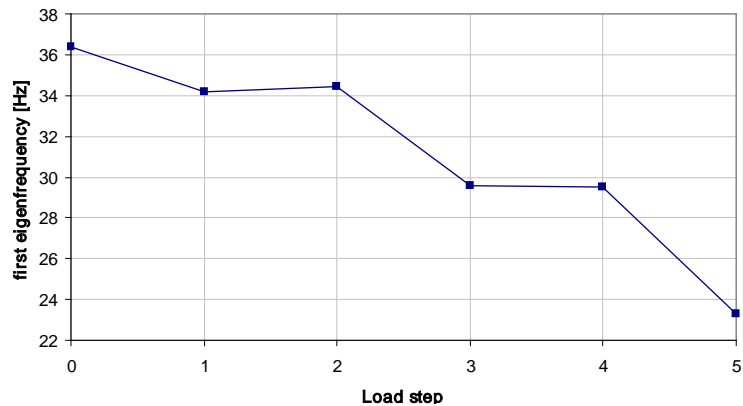


Load step	Description	Applied force
0	No damage	0
1	First cracks	3.5 kN
2	Medium stiffness reduction	4 kN
3	Complete stiffness reduction at maximum bending moment position	5 kN
4	Cracks > 0.3 mm, yielding of reinforcement	6.5 kN
5	Predicted collapse	13 kN

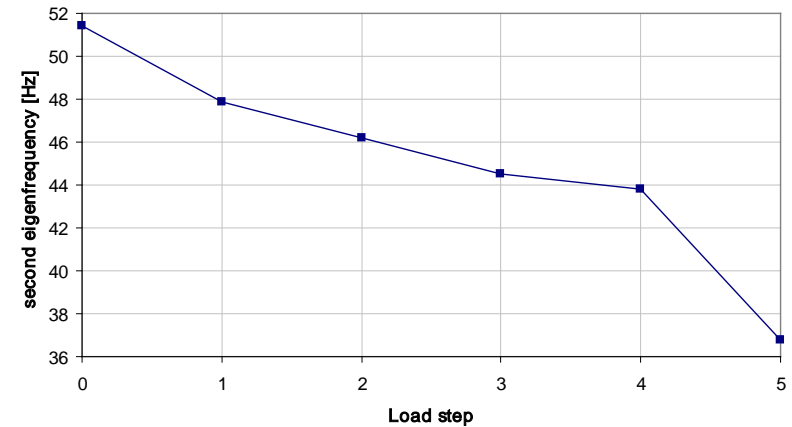


Änderungen der Frequenzen und Eigenformen

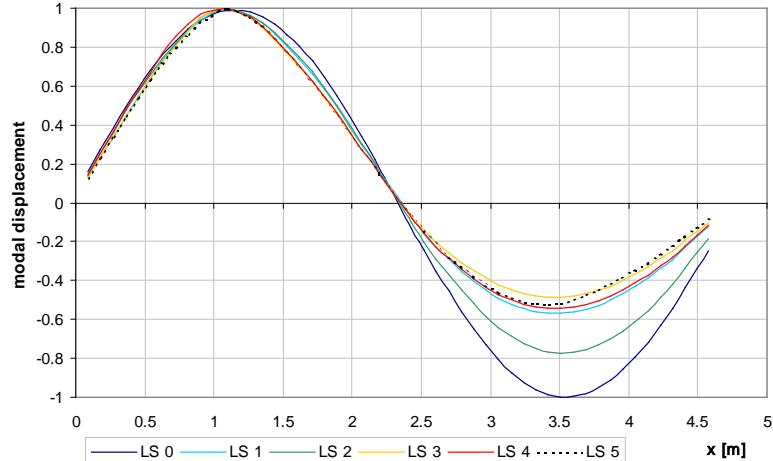
Degradation of first eigenfrequency



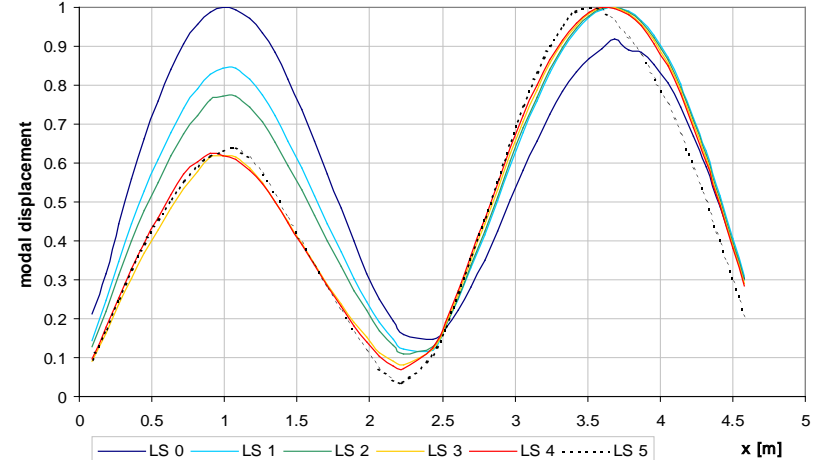
Degradation of second eigenfrequency



Degradation of mode shape 1

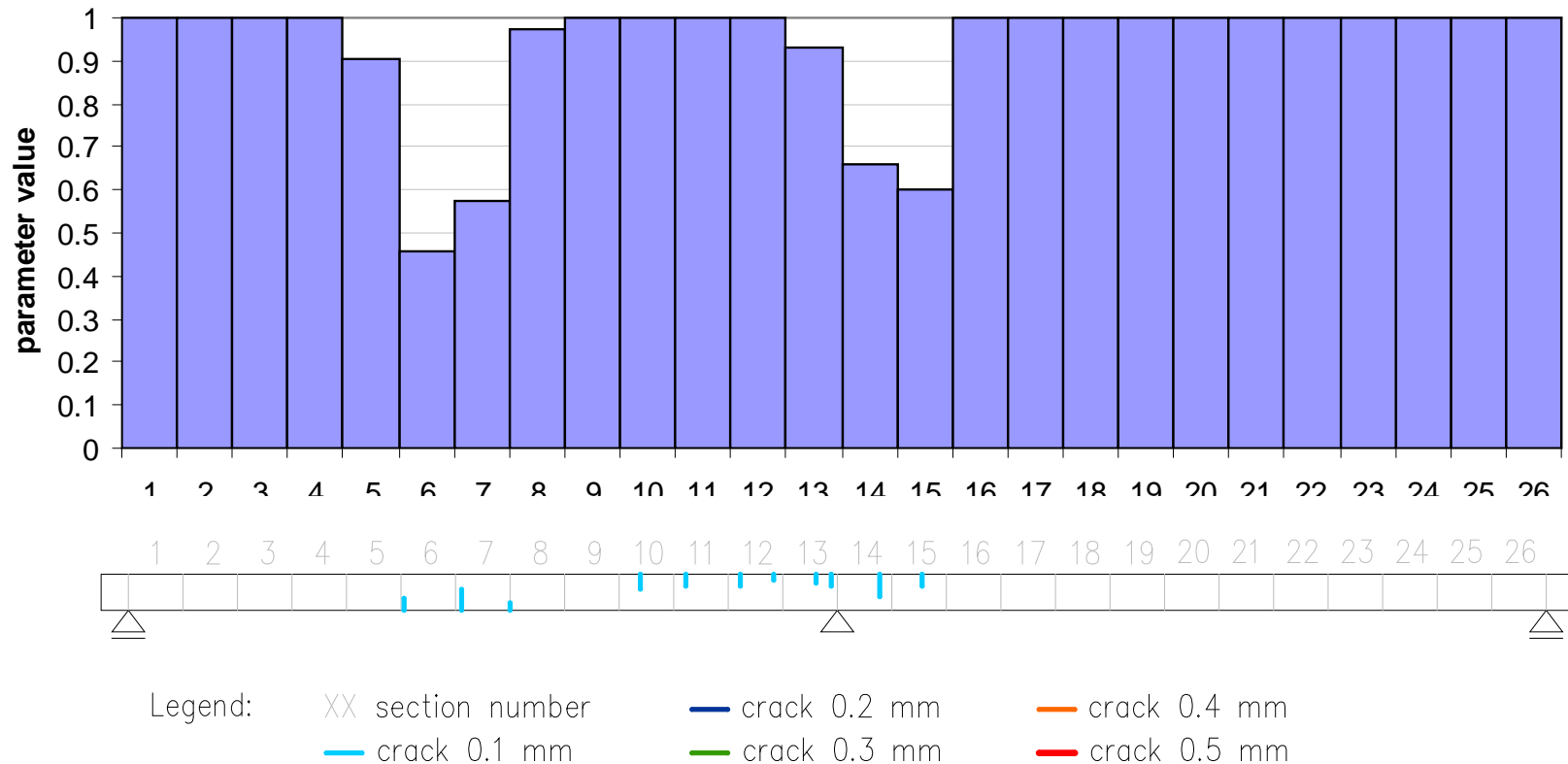


Degradation of mode shape 2



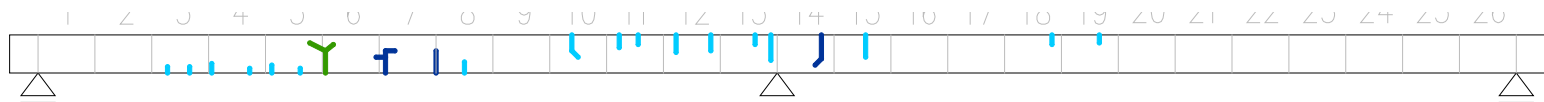
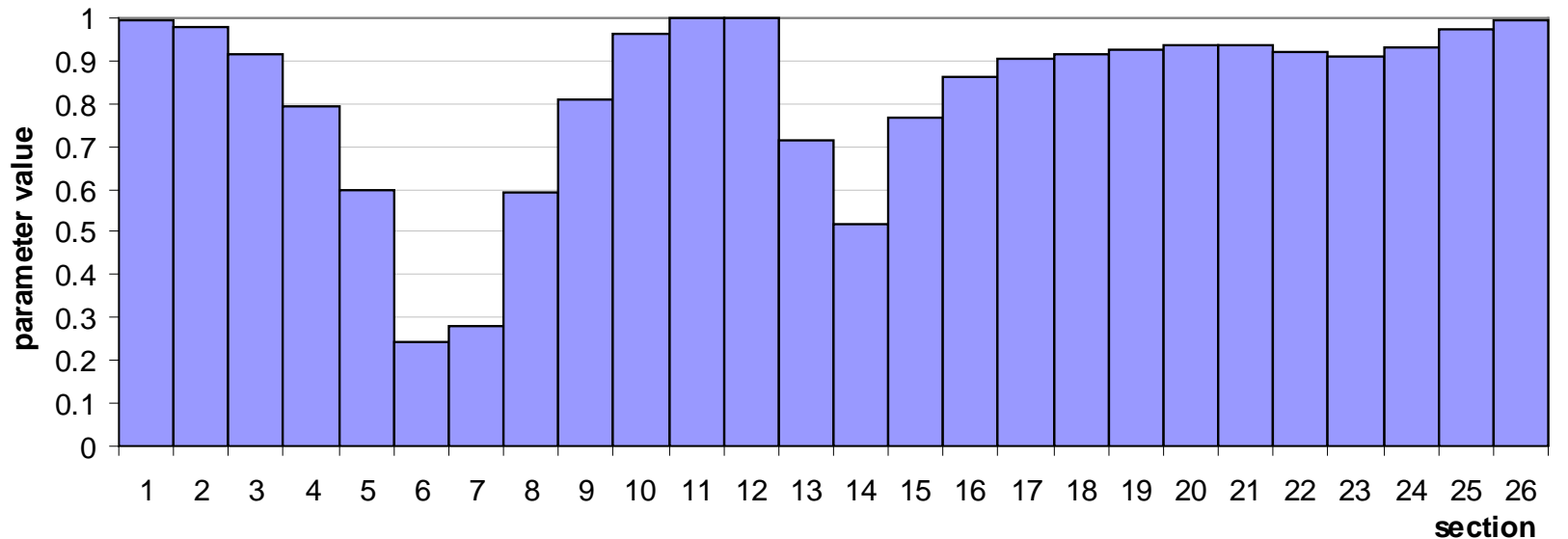
Identification result in load step 1

greatest slope approach after 273 iterations, load step 1



Identification result in load step 3

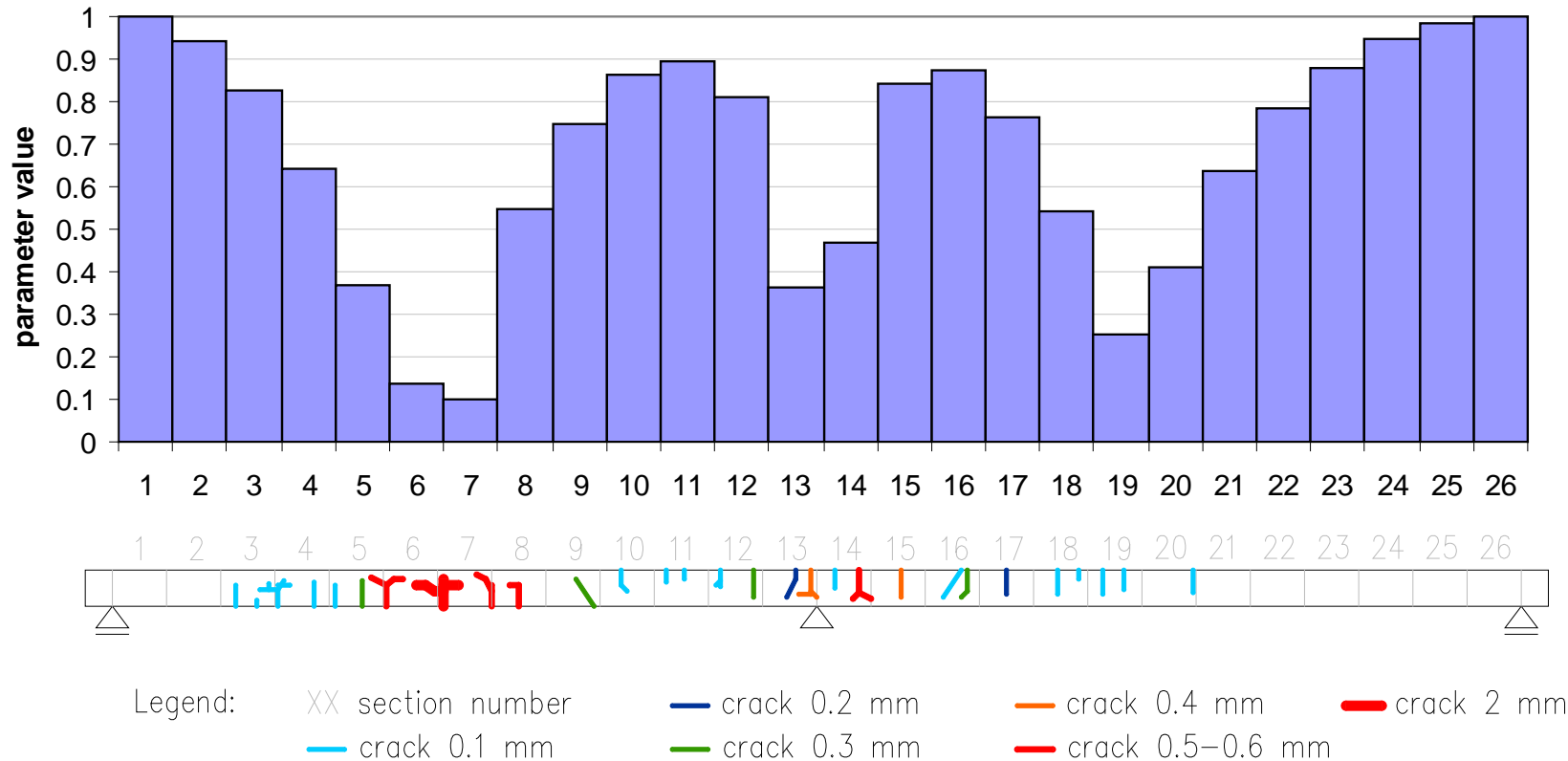
greatest slope approach after 275 iterations, load step 3



- Legend:
- XX section number
 - crack 0.2 mm
 - crack 0.4 mm
 - crack 0.1 mm
 - crack 0.3 mm
 - crack 0.5 mm

Identification result in load step 5

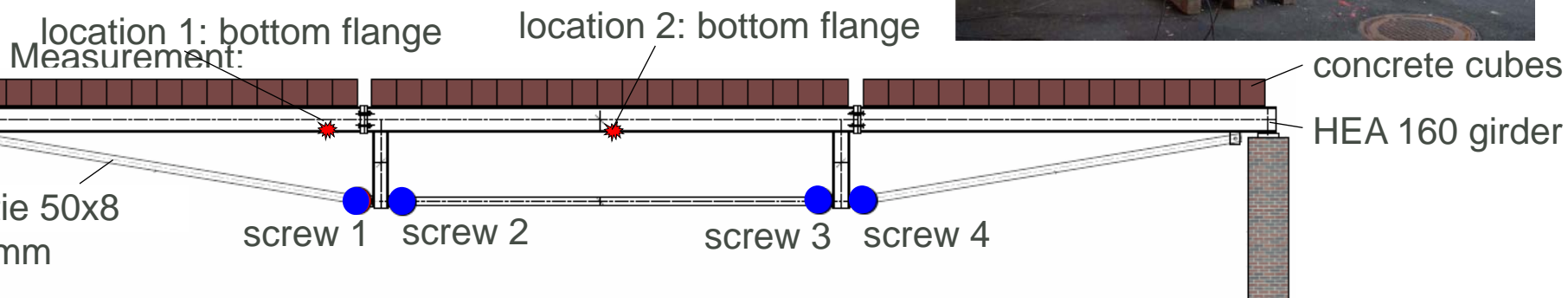
greatest slope approach after 467 iterations, load step 5



Laborversuch - Stahlkonstruktion

Schadensszenarien:

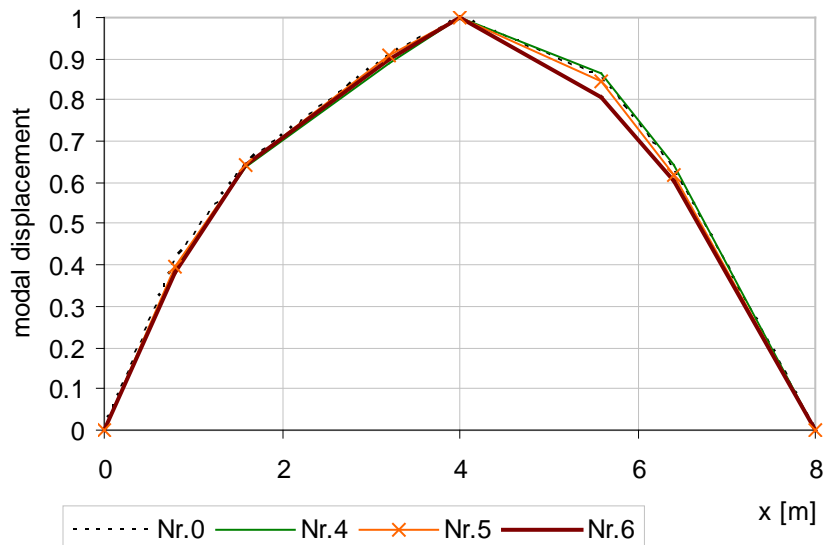
- Schraubenlockerung
- Einschnitte im Flansch



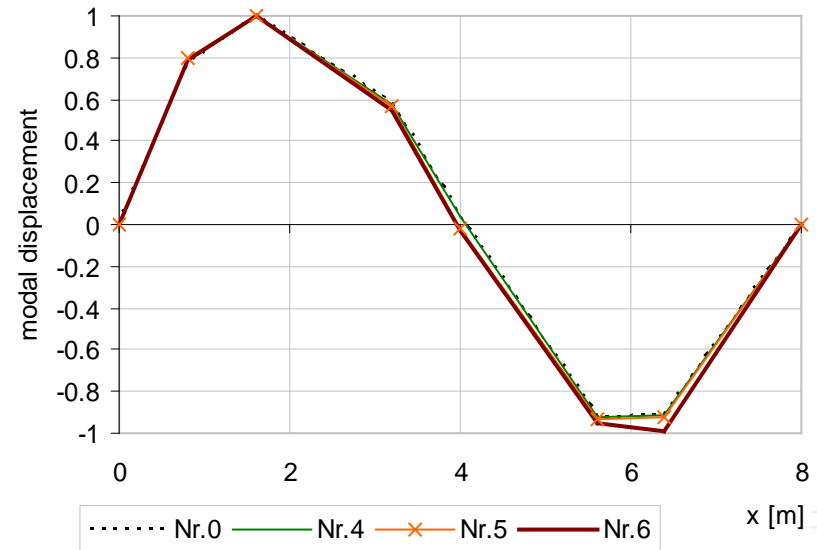
Änderungen der modalen Parameter

Nr.	Damage description	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	
0	Initial state	8.31	19.31	
1	Loosened screw 1	6.23	18.20	gut erkennbar
2	Loosened screws 1 and 4	5.53	17.06	gut erkennbar
3	Loosened screws 1, 4 and 2	4.74	17.32	gut erkennbar
4	Location 1 and 2: 5 cm cut each	8.27	19.30	nicht erkennbar
5	Location 1 and 2: 10 cm cut each	8.15	19.23	erkennbar
6	Location 1 and 2: cut through	7.71	19.00	gut erkennbar

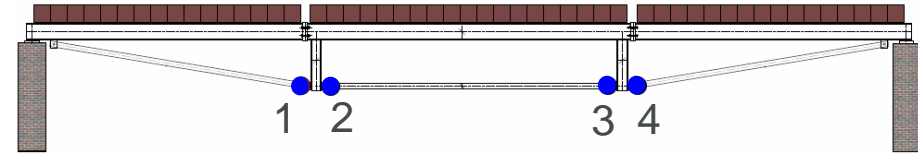
Mode shape 1



Mode shape 2



Schraubenlockerung



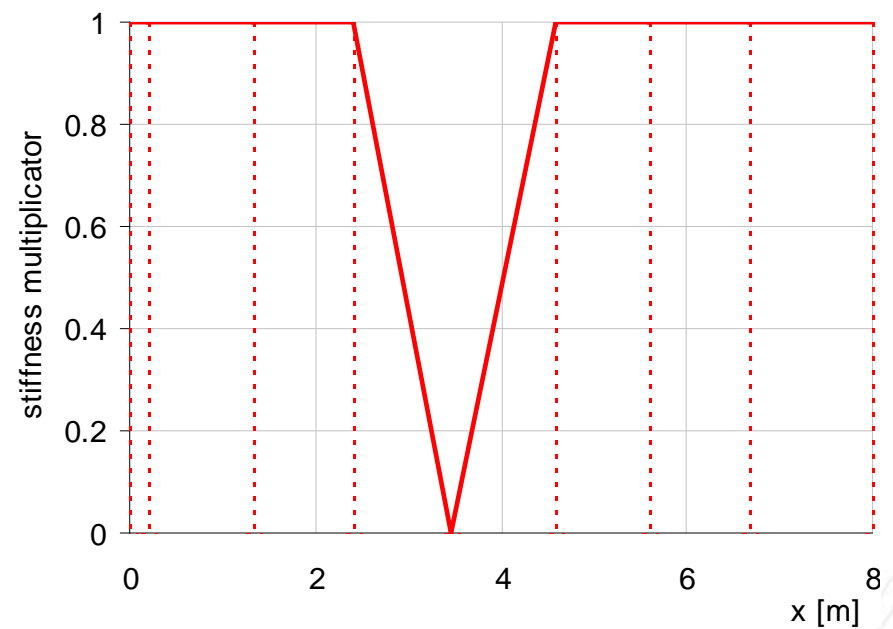
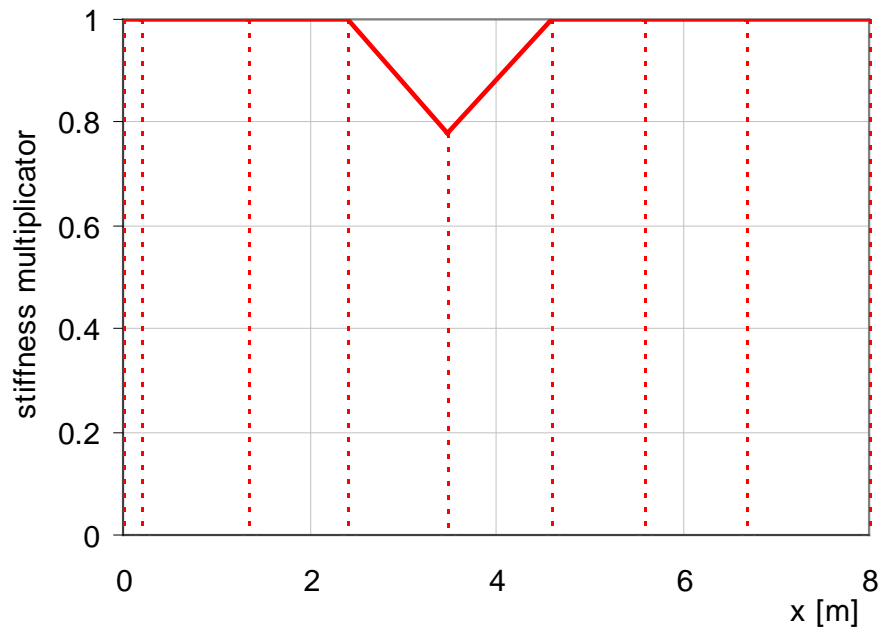
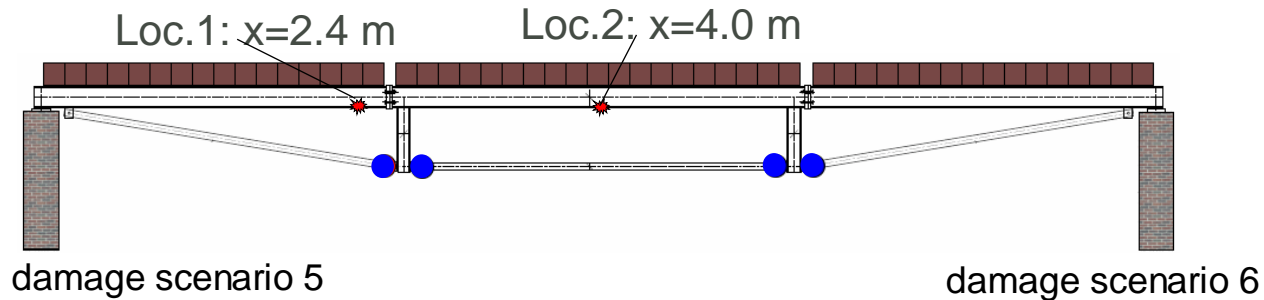
- Screw loosening – identified tie stiffnesses

Nr.	Loosened screws	$p_{t,1}$	$p_{t,2}$	$p_{t,3}$
1	1	0.00	0.47	0.63
2	1 and 4	0.00	0.18	0.11
3	1, 4 and 2	0.00	0.00	0.14

- Screw loosening – ideal tie stiffnesses

Nr.	Loosened screws	$p_{t,1}$	$p_{t,2}$	$p_{t,3}$
1	1	0.00	1.00	1.00
2	1 and 4	0.00	1.00	0.00
3	1, 4 and 2	0.00	0.00	0.00

Einschnitte im Flansch



Schlussfolgerungen

- Monitoringbasierte Analysen bieten ein Tool zur Zustandsanalyse
- Die Messdatenstreuungen sollen berücksichtigt werden
 - Zwischen erkennbaren und nichterkennbaren Schäden unterscheiden
- Probabilistische Berechnungen bieten mehr Zuverlässigkeit auf der Ergebnisseite
 - Frequenzbasierter Indikator des Schadensauftritts
 - 2-stufiges Model Updating Verfahren
- Genaue Lokalisierung des Schadens ist nicht immer eindeutig
 - Monitoringbasierte Zustandsanalyse bietet Hinweise, die überprüft werden sollten

**Wurden alle Ihre Fragen
beantwortet?**

Kontakt

DI Marian Ralbovsky, PhD.

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 2 | 1210 Wien
Austria

T: +43 50550-6363

F: +43 50550-6599

M: +43 664 8157964

E: marian.ralbovsky@ait.ac.at