

Dynamische Methoden zur Schadensidentifikation an einer kontinuierlich geschädigten vorgespannten Zweifeldbrücke

Dipl. Phys. **Jean Mahowald**, Prof. Dr. **Stefan Maas**, Dipl. Ing. **Frank Scherbaum**, Ass. Prof. Dr. **Danièle Waldmann**, University of Luxembourg, Luxembourg;

Prof. Dr. **Arno Zuerbes**, Fachhochschule Bingen, Bingen

1. Kurzfassung

Dieser Artikel beschreibt die Anwendung von dynamischen Methoden zur Schadensidentifikation an einer vorgespannten Zweifeldbrücke, die aufgrund einer geänderten Raumplanung abgerissen werden musste, obwohl sie völlig intakt war. Die dynamischen Kennwerte der Brücke wurden im unbeschädigten Zustand erstmals aufgenommen, um sie dann in mehreren Schritten definiert zu schädigen. Die Brücke wurde mit einem speziellen Schwingungserreger in einem swept-sine Modus angeregt, wobei die Kräfte gemessen und geregelt wurden. Mittels Modalanalyse mit feinem Messraster wurden die Eigenfrequenzen und die Eigenformen bestimmt. Diese Struktureigenschaften sind Indikatoren für Änderungen in der Steifigkeit oder der Dämpfung, wie sie zum Beispiel durch das Auftreten von Rissen entstehen. Die durchgeführten Untersuchungen an der vorgespannten Brücke zeigen solche Änderungen der Eigenfrequenzen mit dem Schädigungsgrad, insbesondere beim Anwachsen der Risse. Diese sind entstanden durch sukzessives lokales Zerschneiden einiger Vorspannkabel (Vorspannung mit nachträglichem Verbund) und durch wechselndes Aufsetzen und Abnehmen einer Versuchslast von 245t an Stahlgewichten. Mit den gemessenen modalen Parametern ist die Nachgiebigkeitsmatrix, also die Inverse der Steifigkeitsmatrix, berechnet worden. Die induzierte Schädigung verursachte Rissbildung, die man als Steifigkeitsverlust in der Matrix gezielt erkennen kann, wodurch sich die genannten Schäden sogar lokalisieren lassen.

2. Einleitung

Heutzutage werden immer mehr Forschungsaktivitäten zur Inspektionen von Baustrukturen gerichtet um die Nachhaltigkeit der hohen Anzahl an Bauten, insbesondere Brücken zu garantieren. Ein Schwerpunkt der Forschung sind Monitoring-Systeme an Bauwerken um eine kontinuierliche Zustandsbewertung zu erstellen [1]. Hierzu werden öfters dynamische Methoden herangezogen, da sie einfach zu montieren, und die analysierten Parameter Indikatoren für Änderungen der Strukturen sind. Desweiteren eignen sich die dynamischen Parameter insbesondere für Schadenserkennung an mechanischen und strukturellen Bauteilen [2], [3]. Diese Zustandswertung basiert auf den Änderungen modaler Parameter, wie den Eigenfrequenzen und den Eigenformen. Desweiteren lassen sich anhand dieser, die Nachgiebigkeitsmatrizen berechnen, dessen Analyse ein geeignetes Kriterium zur Schadenserkennung und Lokalisierung an Bauteilen, die im Labor getestet wurden, darstellt [4]. Anhand dieser Kenntnisse sind die untersuchten Methoden in situ auszuprobieren, da Umwelteinflüsse die genannten Methoden beeinträchtigen können [5]. Wegen einer geänderten Raumplanung in Luxemburg Kirchberg, ergibt sich die Gelegenheit an einer Zweifeldbrücke die Validierung der genannten dynamischen, sowie statische Methoden in situ zu untersuchen. Durch das Abreißen der Zweifeldbrücke (**Bild 1**), konnte die Brücke durch sukzessives Schneiden der Vorspannkabel geschädigt werden, was Änderungen der Struktur hervorbringt und so eine Validierung der Testmethoden möglich macht. Zusätzlich zu dem Schneiden der Vorspannglieder wird die Brücke auch mit einer Versuchslast von 245t anhand von 38 Stahlbrammen (Halbzeuge) von ArcelorMittal (**Bild 2**) belastet für die statischen und weiteren dynamischen Tests (Daten nicht gezeigt).



Bild 1: Bild der Brücke im Winter 2010



Bild 2: 31 von 38 Stahlbrammen (Halbzeuge) als Versuchslast

3. Versuchsaufbau

3.1. Beschreibung der Struktur

Die zu untersuchende Brücke, benannt Champangshiehl, befand sich im Wirtschaftsviertel Kirchberg in Luxemburg Stadt (**Bild 1**). Sie wurde zwischen 1965 und 1966 gebaut und ist unterteilt in zwei Feldern mit unterschiedlichen Längen von 37 m und 65 m. Der Überbau besteht aus Beton B450 und ist vorgespannt mit 32 parabolische, 24 geradlinigen in der oberen Platte und 20 geradlinigen in der unteren Platte verlaufenden Spanngliedern (**Bild 3**, **Bild 4** und **Bild 5**). Die Vorspannkabel mit einem Querschnitt von 1120mm^2 sind aus Stahl ASTM A.416 57T gefertigt und sind mit 165t pro Kabel vorgespannt. Die obere Platte hat eine Breite von 12.5 m und der Hohlkasten eine Breite von 6.5 m mit einer Höhe von 2.62 m (**Bild 4**). In 1987 wurden aus Sicherheitsgründen zusätzlich 56 freie Vorspannkabel in den Hohlkasten im großen Feld hinzugefügt [6].

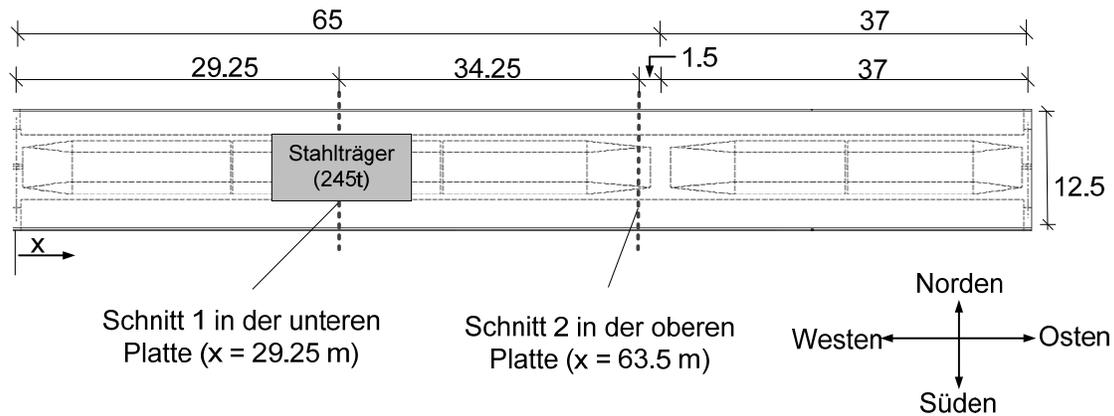


Bild 3 Draufsicht der Brücke Champangshiehl mit den beiden Schnitten und der Position der Versuchslast.

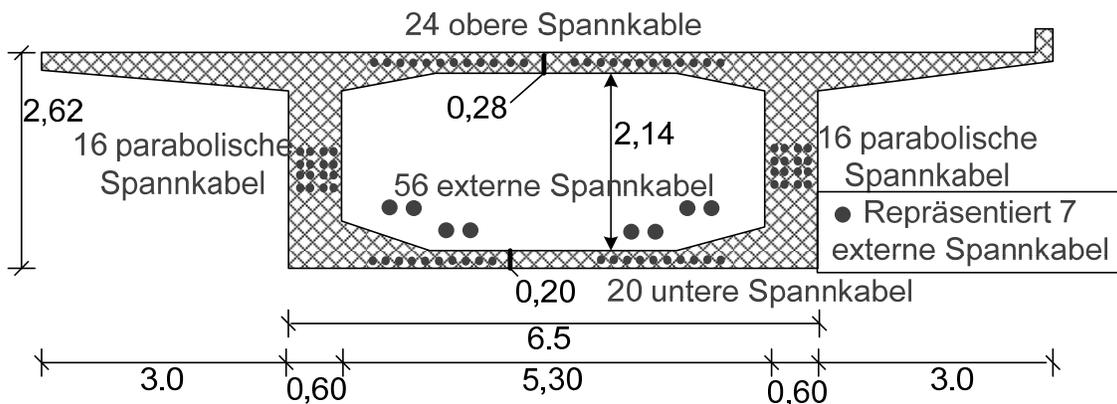


Bild 4: Schematischer Querschnitt mit der Lage der Vorspannkabel.

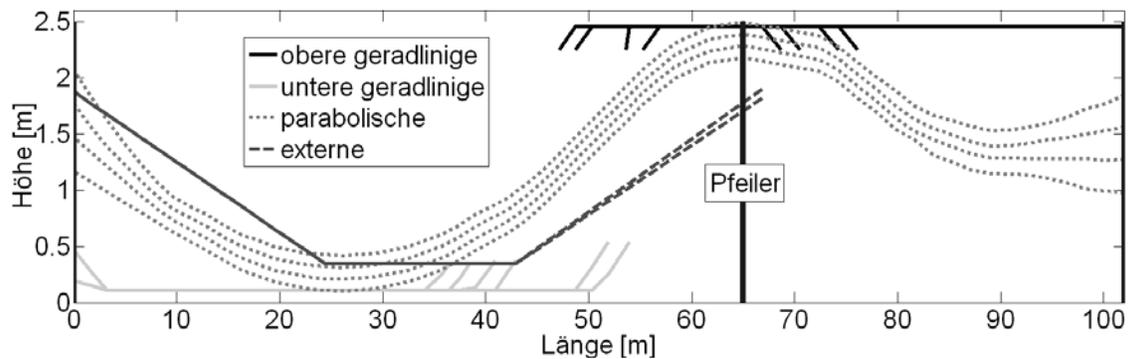


Bild 5: Schematischer Längsschnitt mit der Lage der Vorspannkabel.

3.2. Schädigungsstufen und Rissbildung

Um die genannten Testmethoden validieren zu können sind in diesem Kapitel die Schädigungsstufen dargestellt. Hierfür müssen diese vorerst definiert werden für welche Risse entstanden sind, die bei den Ergebnissen eine zentrale Rolle spielen. **Tabelle 1** beschreibt die 4 verschiedenen Schädigungsstufen. Das sukzessive Schneiden wurde an 2 Schnitten der Brücke getätigt, einmal im großen Feld an der unteren Platte bei $x=29.25$ m und dreimal an der oberen Platte über dem Pfeiler bei $x=63.5$ m (**Bild 3**)

Tabelle 1: Beschreibung der vier verschiedenen Schadenszenarien und ihre Schnittpositionen

Schädigungsstufe	Geschnittene Vorspannkabel	Prozentuale Schädigung (100% repräsentiert die Anzahl aller Kabel im gegebenem Querschnitt)	
		$x=29.25$ m	$x=63.5$ m
# 0	Intakter Zustand	0%	0%
# 1	20 geradlinige Kabel in der unteren Platte ($x=29.25$ m), Bild 6	33.7%	0%
# 2	8 geradlinige Kabel in der oberen Platte über dem Pfeiler ($x=63.5$ m) Bild 7	33.7%	12.6%
# 3	56 externe Kabel, Bild 8	46.1%	24.2%
# 4	16 geradlinige Kabel in der oberen Platte über dem Pfeiler ($x=63.5$ m), Bild 9	46.1%	62.12%

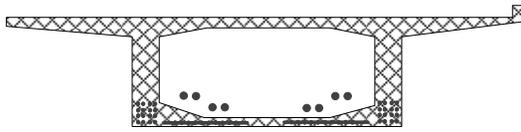


Bild 6: Schädigungsstufe #1 (x=29.25 m).

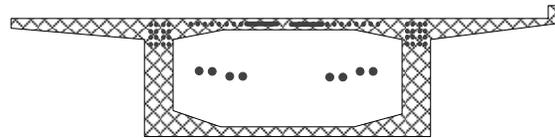


Bild 7: Schädigungsstufe #2 (x=63.5 m).

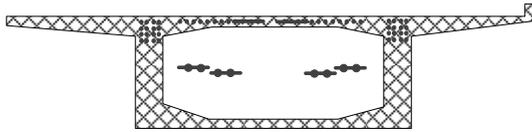


Bild 8: Schädigungsstufe #3 (x=63.5 m).

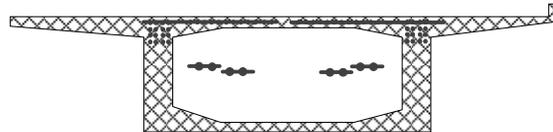


Bild 9: Schädigungsstufe #3 (x=63.5 m).

Durch die Schädigungen der Vorspannkabel, die die Tragfähigkeit der Brücke stark reduziert, und durch das Belasten mit 245t an Stahlträgern entstanden Risse. **Tabelle 2**, sowie **Bild 11** resümieren das Auftreten dieser für die verschiedenen Schädigungsstufen.

Tabelle 2: Beschreibung der Rissbildung für alle Schädigungsstufen und Belastung

Schädigungsstufe	Risse (Bild 10, links: untere Platte und rechts: obere Platte)
#1	Schubrisse durch die neue Verankerung der unten geradlinigen Spannglieder
#1-belastet (L)	Wie bei #1 + erster durchgängiger Riss an der Unterplatte bis 1.5 m hoch auf der Nordseite und 1 m hoch auf der Südseite im Steg des Hohlkastens
#3	Wie bei #1-belastet (L) + wachsen der Risse und Bildung neuer Risse bei x=29.25 m + kleine Risse zwischen den gebohrten Löchern (zum Zerschneiden der externen Vorspannkabel) auf der oberen Platte.
#4	Wie bei #3 + durchgängiger Riss über dem Pfeiler

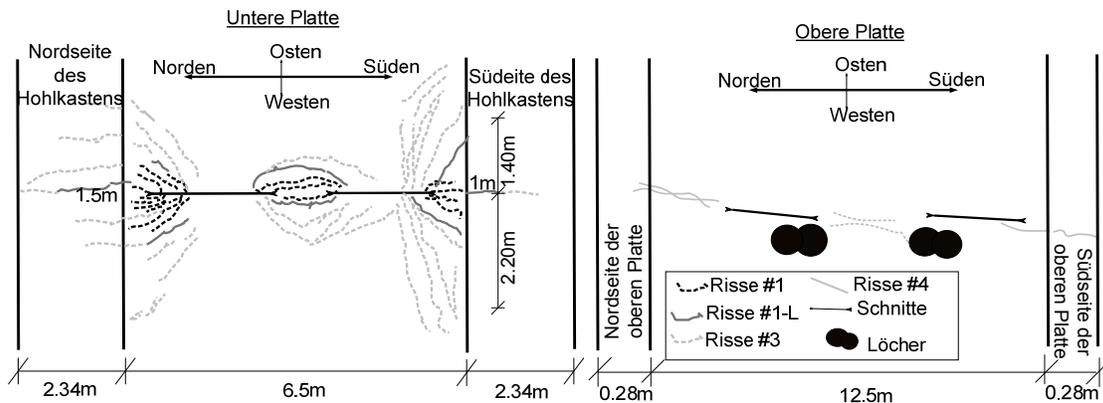


Bild 10: Schematische Darstellung der Rissbildung für die verschiedenen Schadensszenarien in der unteren Platte bei x=29.25 m (links) und auf der oberen Platte bei x=63.5 m (rechts)

3.3. Versuchsaufbau

Die 22 Beschleunigungssensoren vom Typ PCB393B04 und der Krafterreger (Shaker, Typ TIRA 2.7) sind wie in **Bild 11** dargestellt auf der Brücke positioniert. Das Frequenzband läuft mit einer Laufgeschwindigkeit von 0.02Hz/s von 1.25 bis 20Hz mit einer Abtastrate von 1000Hz. Für das dichte Messraster mit 100 Punkten werden für jede Schadensstufe 5 Messungen durchgeführt, wo jeder Beschleunigungssensor pro Messung um 2.1 m verschoben wurde um alle Punkte abzutasten und die Eigenformen klar zu ermitteln. Die Positionen sind nummeriert von 1 bis 50, von West nach Ost.

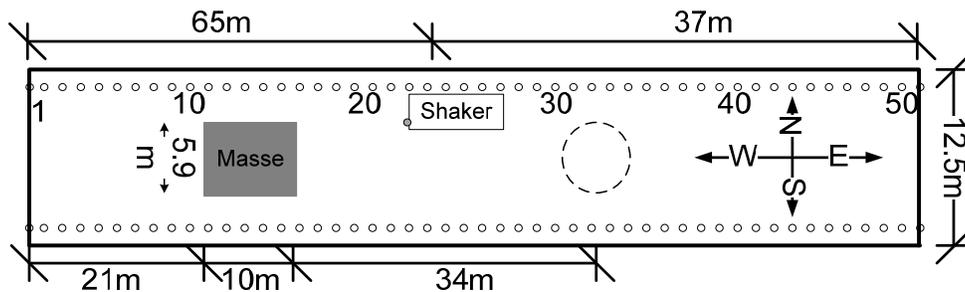


Bild 11: Experimenteller Aufbau der Sensoren und Schwingerreger: Weiße Kreise: Beschleunigungssensoren.

Für die Evaluation der modalen Parameter wird das Software Programm Mescopce benutzt mit dem Global Polynomial Method Algorithmus um aus den Übertragungsfunktionen die modalen Parameter zu berechnen.

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der dynamischen Methoden für die verschiedenen Schadensszenarien präsentiert. **Bild 12** zeigt die Übertragungsfunktionen der Sensoren 1-50 auf der Nordseite. Hier sieht man klar, dass verschieden Eigenfrequenzen hervorstehen, welche auch im Folgenden ausschließlich ausgewertet und beschrieben werden.

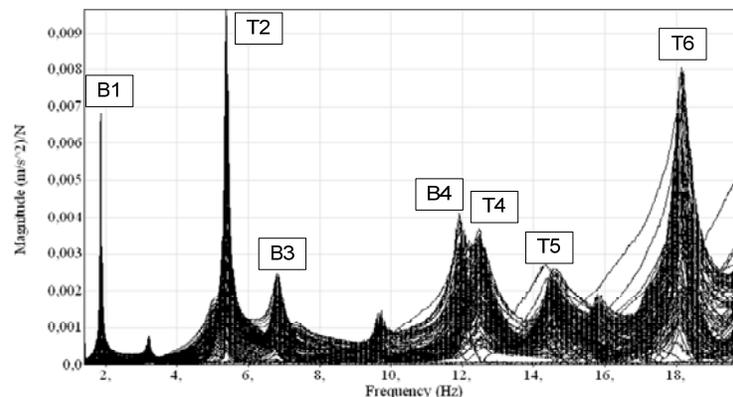


Bild 12: Übertragungsfunktionen für den intakten Zustand.

Desweiteren sind auch nur die Eigenformen dieser Eigenmoden zur Analyse der Nachgiebigkeitsmatrizen sowie die Änderung derer zur Schadenserkennung berücksichtigt worden. Bei der Anschauung der Eigenfrequenzen auf den folgenden Graphen, wobei hier nur die erste Eigenfrequenz der ersten Biegeform (B1) dargestellt ist, sieht man dass die Eigenfrequenzen schadensabhängig sind. Für manche Stufen ist die Abnahme grösser als für andere Stufen. Für Schadenszenario #3 und #4 steigt die Abnahme zum intakten Zustand auf 10%, beziehungsweise 16%. Daraus kann man schließen, dass die Eigenfrequenz ein Kriterium zur Schadensanalyse sein kann, da größere Steifigkeitsänderungen gemessen werden können.

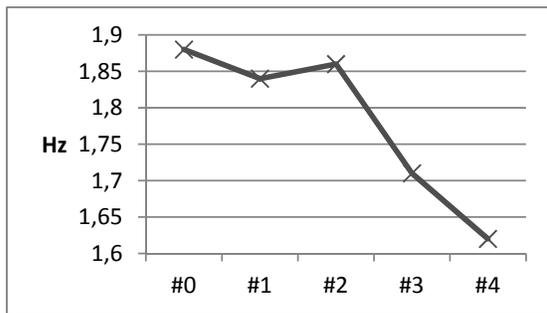


Bild 13: Eigenfrequenz der ersten Beigeform B1

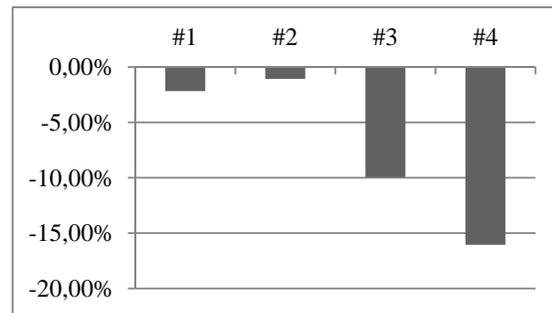


Bild 14: Prozentuale Änderung der Eigenfrequenz der ersten Beigeform B1

Außerdem mit den gemessenen Eigenfrequenzen ω_k und den modalen-massennormierten Eigenmoden Φ_k lassen sich die Nachgiebigkeitsmatrizen $[F]$ nach folgender Formel berechnen:

$$[K]^{-1} = \sum_{k=1}^N \{\Phi_k\} \cdot \frac{1}{\omega_k^2} \{\Phi_k\}^T = [F]$$

Diese können den Steifigkeitsverlust pro Schädigungsstufe aufzeigen. Die Nachgiebigkeitsmatrix beschreibt nämlich die Inverse der Steifigkeitsmatrix $[K]$ und kann Strukturänderungen sichtbar machen. Wie schon erwähnt, werden auch für die Berechnung der Nachgiebigkeitsmatrizen pro Schädigungsstufen nur die sieben dominanten Moden aus **Bild 12** benutzt. **Bild 15** zeigt die 3D Ansicht und **Bild 16** die Profil-Ansicht dieser Matrix für den intakten Zustand.

Ferner, um die einzelnen Matrizen jeder Schädigungsstufe besser miteinander vergleichen zu können, werden die Differenzen dieser ermittelt. Alle Matrizen werden nach folgender Formel mit dem intakten Zustand verglichen:

$$\Delta F_{0i} = |F_i - F_0|$$

Diese Differenzmatrizen ΔF_{0i} sind auf folgenden Bildern (**Bild 17** bis **Bild 20**) dargestellt mit Normierung zur größten Differenz, erfasst für Schadenszustand #4.

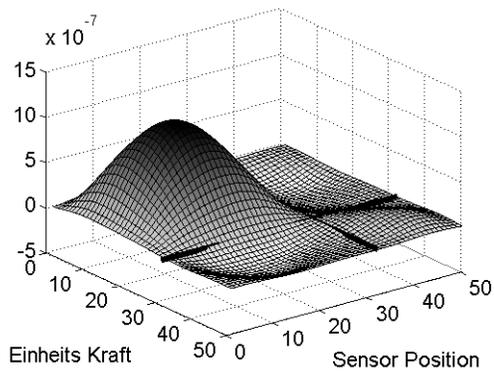


Bild 15: 3D-Ansicht der Nachgiebigkeitsmatrix für den intakten Zustand

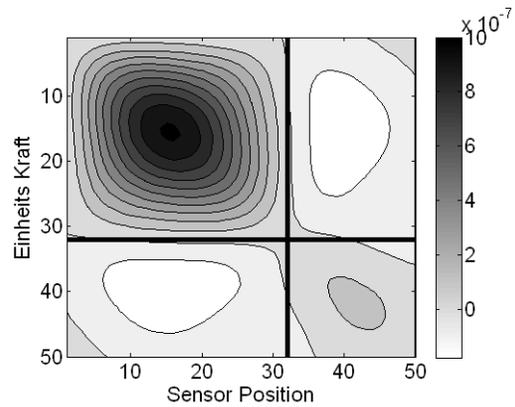


Bild 16: Profil-Ansicht der Nachgiebigkeitsmatrix für den intakten Zustand

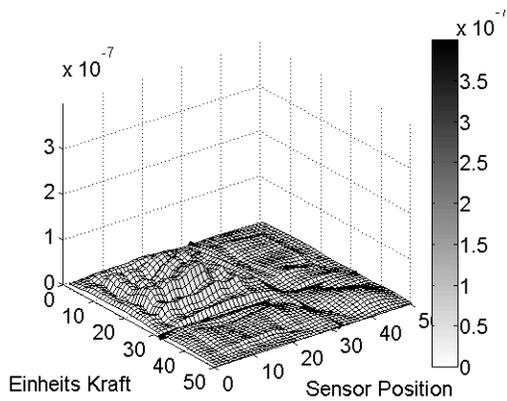


Bild 17: Differenz der Nachgiebigkeitsmatrizen von Zustand #1 zum intakten Zustand #0

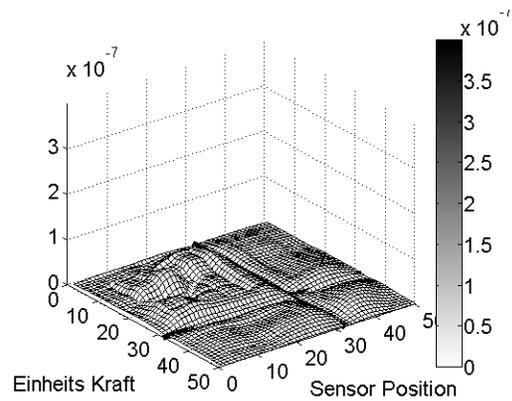


Bild 18: Differenz der Nachgiebigkeitsmatrizen von Zustand #2 zum intakten Zustand #0

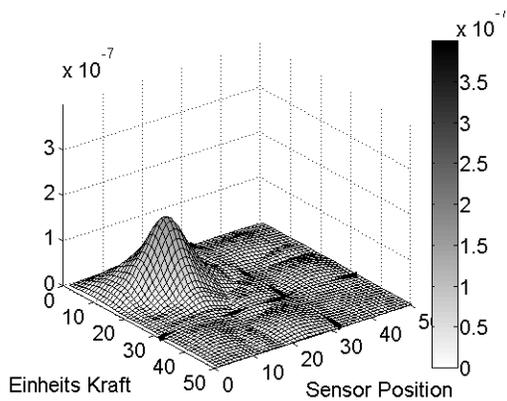


Bild 19: Differenz der Nachgiebigkeitsmatrizen von Zustand #3 zum intakten Zustand #0

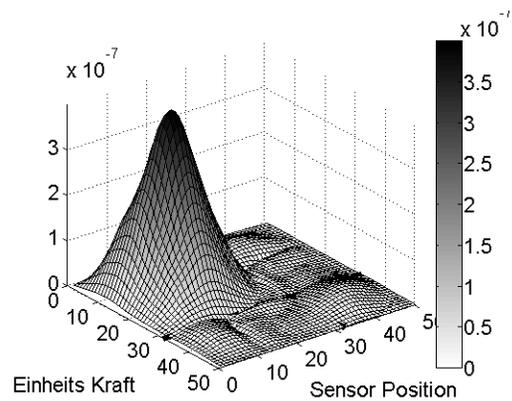


Bild 20: Differenz der Nachgiebigkeitsmatrizen von Zustand #4 zum intakten Zustand #0

Man kann einen klaren Unterschied für Schadenszustand #3 und #4 erkennen. Dieser befindet sich zwischen Sensorposition 10 und 20, wo auch die meisten Risse entstanden sind. Die Differenz der Nachgiebigkeitsmatrizen scheint also auch ein adäquater Parameter für Schadensidentifikation und sogar Schadenslokalisierung zu sein. Desweiteren, um die Unterschiede deutlicher zu präsentieren, ist auf dem folgenden Graph die maximale Differenzen jeder Kolonne der ΔF_{0i} Matrizen gezeigt. Diese Analyse bewertete sich schon in der Literatur bei beschädigten Balken und anderen Baustrukturen [7], [8] und wird wie folgt berechnet:

$$\delta_l = \max_k |\delta f_{kl}|$$

δf_{kl} sind Elemente von ΔF_{0i} . Der Wert δ_l repräsentiert also die maximale Änderung der Nachgiebigkeit für jede Sensorposition j . Diese sind auf folgendem **Bild 21** gezeigt:

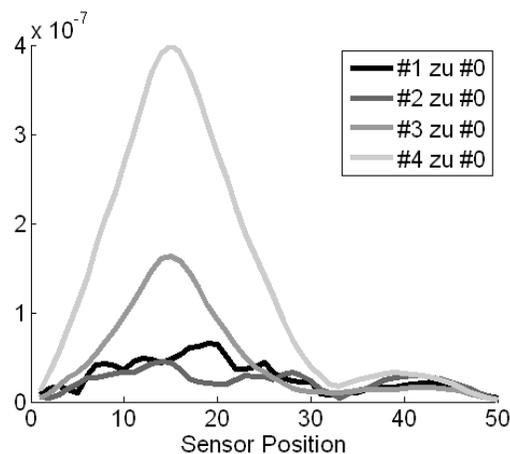


Bild 21: Maximale Differenz der Nachgiebigkeitsmatrizen nach [7].

Auch hier sind die Unterschiede zum intakten Zustand klar zu erkennen. Desweiteren ist eine Lokalisierung der Schäden ab Schadensstufe #3 deutlich erkennbar. Zwischen Schadensstufe #1 und #2 sind keine großen Unterschiede bemerkbar, da keine große Schädigung vorgenommen wurde (8 geschnittene Kabel in der oberen Platte, im Vergleich zu 56 externe Spannkabel für Schadensstufe #3 und weitere 16 Spannkabel für #4). Daraus folgt dass die Analyse der maximalen Differenz der Vergleichsmatrizen auch bei diesem Versuch mit der gezeigten Schädigung als ein geeignetes Kriterium für Schadenserkenkung dienen kann.

5. Schlussfolgerung

Anhand von den dargestellten Resultaten für die Nachgiebigkeitsmatrizen und deren Änderungen, sowie die Abnahme der Eigenfrequenzen für die gezeigten Schadensstufen an

einer vorgespannten Zweifeldbrücke kann man erkennen, dass die untersuchten dynamischen Methoden mit den dargestellten Auswerteanalysen sich als geeignet erweisen zur Schadenserkenkung und Zustandsbewertung von Baustrukturen bei in situ Messungen. Nichtsdestotrotz muss man hinzufügen, dass die gezeigten Schädigungen im Vergleich zur Praxis sehr umfangreich sind (bei $x=29.25$ m 46.1% geschnittene Kabel und bei $x=63.5$ m 24.2% geschnittene Kabel für Schädigungsstufe #3 und 62.12% für Schädigungsstufe #4) und wahrscheinlich in der Art nicht auftreten. Ein weiterer Ausblick gilt demnach der Prüfung der Verwendbarkeit der gezeigten dynamischen Methoden und dessen Analyse für kleinere Schäden unter Rückbehalt der Umwelteinflüsse, die einen großen Einfluss bei in situ Messungen haben können [5].

6. Literatur

- [1] F. Magalhães, A. Cunha, E. Caetano, *Dynamic monitoring of a long span arch bridge*, Engineering structures, Vol. 30, Issue 11 (November 2008), pp. 3034-3044, 2008
- [2] O.S. Salawu, *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*, Engineering Structures, Vol. 19, No. 9, Elsevier Science Ltd, pp.718-723, 1998
- [3] M. Waltering, D. Waldmann, S. Maas, A. Zuerbes, *Untersuchung nichtlinearer Schwingungseigenschaften zur zerstörungsfreien Zustandsprüfung am Beispiel von Stahlbetonbalken*, Beton- und Stahlbetonbau 9/2007, Vol. 102, No. 9, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften (2007), pp 615-621, 2007
- [4] J. Mahowald, V. Bungard, S. Maas, D. Waldmann, A. Zuerbes, *Schadensidentifikation an Stahl- und Spannbetonplatten anhand von linearen und nichtlinearen Schwingungsanalysen*, 6.VDI-Fachtagung Schwingungsüberwachung 2011 VDI Berichte 2151, Leonberg, Germany, pp.207-218, 2011
- [5] Peeters, B & De Roeck, G., *One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, pp. 149-171, 2001
- [6] Scherbaum, F., Mahowald, J, *Report Bridge Champangshiehl 2*, University of Luxembourg, nicht veröffentlicht, 2011
- [7] A.K. Pandey, M. Biswas, *Experimental Verification of Flexibility Difference Method for locating damage in structures*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 184 (2), pp.311-328, 1995
- [8] A. Lenzen, *Markov-Parameter als Schädigungsindikator bei der Systemidentifikation in der Baudynamik*, VDI-Berichte 2063, 3.VDI-Fachtagung: Baudynamik, Kassel 14-15.Mai 2009, pp109-120, 2009