

Ein Parameterschätzverfahren zur Defektdetektion an Balkenkonstruktionen

C.-D. Schmidt, L. Pust, H. Vesely

Die Publikation stellt die Nutzung gemessener Eigenfrequenzen zur Defektdetektion an Balkenkonstruktionen in den Mittelpunkt. Auf der Basis einer genauen Analyse des Einflusses der Strukturparameter – Längskräfte, Lagersteifigkeiten und Einschnittparameter – wird dafür ein hierarchisches Verfahren zur Lösung des entsprechenden nichtlinearen Quadratmittelproblems mit Gleichheitsrestriktionen entwickelt, dessen Anwendbarkeit an praktischen Beispielen nachgewiesen wird.

In this paper the use of measured eigenfrequencies for the detection of defects of beam structures is considered. On the basis of an exact analysis of the influence of the structural parameters – axial loads, bearingstiffnesses and crackparameters – is therefore developed a hierarchical method for solving a nonlinear least square problem with equality conditions, the applicability of which is demonstrated on practical examples.

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um schwingungsanalytische Methoden für die Detektion von Defekten in Konstruktionen nutzbar zu machen. Die vorliegende Arbeit stellt dabei die Anwendung der Biegeeigenfrequenzen als Diagnoseparameter, für die ein geschlossenes Konzept angegeben wird, in den Mittelpunkt. Motiviert wird das durch die Schwierigkeiten, mit denen gewöhnlich eine Festlegung der Dämpfungskennwerte der mechanischen Struktur verbunden ist (große Varianzen, lange Meßzeiten erforderlich) und dem Umstand, daß eine Vernachlässigung der viskosen Dämpfung in Stahlkonstruktionen nur zu minimalen Fehlern in den Eigenfrequenzen führt.

Den gemessenen Biegeeigenfrequenzen (EF) werden über eine Parameterschätzstrategie die aktuellen Werte von Schadensparametern p_1, \dots, p_N zugeordnet. Als Schadensparameter werden hier Längskräfte, Lagersteifigkeiten, Rißlage und einen Riß unmittelbar beschreibende Parameter aufgefaßt. Risse werden dabei als Dreifelder-Elemente modelliert, wobei in jedem Teilabschnitt die Biegetheorie gilt. Eine solche Modellierung liefert geringere EF-Driften gegenüber dem Gutzustand als in der Realität vorhanden sind. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten jedoch die Brauchbarkeit solcher Modellierungskonditionen. Möglicherweise kann durch bruchmechanische Ansätze für eine Rißmodellierung [2], [3] die Empfindlichkeit des dargestellten Verfahrens noch erhöht werden.

2. Theoretische Grundlagen

Bei der Verwendung von Parameterschätzmethoden werden die Werte für die Schadensparameter p_1, \dots, p_N direkt aus den Modellgleichungen und der Meßinformation geschätzt. Für die Parameteranpassung unter Nutzung von M gemessenen EF ist dabei das nichtlineare Quadratmittelproblem

$$\sum_{i=1}^M g_i (\bar{\omega}_i - \omega_i)^2 \Rightarrow \min_{p, \omega_1, \dots, \omega_M} \quad (1)$$

unter Beachtung der M Gleichheitsrestriktionen, die aus der Lösung des EWP für jede Iteration von p resultieren,

$$F(\omega, p) = 0 \quad i = 1, \dots, M, \quad (2)$$

mit $p = (p_1, \dots, p_N)^T$ – Vektor der Schadensparameter, $\bar{\omega}_i$ – gemessene EF und g_i – Wichtungsfaktoren (> 0), zu lösen. Bei Nutzung der exakten Lösungen kontinuierlicher Modellansätze (Euler-Bernoulli-, Rayleigh-, Rayleigh-Timoshenko-Modell für Balkenabschnitte) ist $F(\omega, p)$ eine Determinante der Dimension 2×2 (bei idealen Einspannbedingungen) bzw. 4×4 (bei elastischer Einspannung), die man durch Anwendung des Übertragungsmatrizenverfahrens erhält [1].

Eine wichtige Frage für die Anwendung des Funktionals (1) ist die nach den EF, die als Meßinformation genutzt werden sollen. Aus Simulationsrechnungen folgt [1], daß die maximale Änderung der EF und damit deren Empfindlichkeit mit steigender Ordnung größer wird. Andererseits häufen sich die Stellen innerhalb der Konstruktion, die bei jeder einzelnen EF

- a) eine Unterscheidung des geschädigten vom ungeschädigten Zustand (innere Schwingungsknoten) und
- b) eine Rißlagenfeststellung (gleiche Driften der EF für ansteigende Anzahl unterschiedlicher Lagewerte)

unmöglich machen. Deshalb muß – auch wenn $\dim p = 1$ ist (das heißt, nur die Rißlage ist unbekannt) – mehr als eine EF mitgenommen werden. Weiter ist zu beachten, daß die EF-Berechnung mit den hier genutzten Prozeduren für kontinuierliche Modelle ab etwa der Ordnung 10 rundungsfehlerbehaftet ist. Bei der Nutzung von FEM-Modellen dagegen steigt wegen der höheren Vernetzung der Rechenaufwand stark an. Bei den praktischen Anwendungen des im folgenden noch darzustellenden Verfahrens hat sich außerdem gezeigt, daß bei der Rißortfeststellung mit der Nutzung von EF höherer Ordnung die Welligkeit des Zielfunktionals größer wird.

Beispielsweise konnten bei der Detektion der Lage eines symmetrischen Einschnittes (siehe unten, reale Position des Einschnittes $b = 0.5$ m) an einem Probekörper bei der Verwendung der EF

- 1 – 4 3 Minima, 1 – 6 4 Minima, 1 – 8 4 Minima,
- 3 – 8 5 Minima und 5 – 8 5 Minima

im untersuchten Bereich linke Einspannstelle/Balkenmitte festgestellt werden. Mit dem Anwachsen der Anzahl der Minima verschlechtert sich die Konvergenz der Prozedur. Für deren Sicherung ist in jedem Fall ein erhöhter Rechenaufwand notwendig. Es muß deshalb ein Kompromiß zwischen hoher Empfindlichkeit, Konvergenzsicherheit, Rechenaufwand und Rechengenauigkeit gefunden werden. Bei den eigenen Untersuchungen wurden jeweils die ersten sechs EF und die ersten acht EF mitgenommen. Die Nutzung der unteren EF wirkt sich dabei in einer Glättung des Zielfunktional bei der Rißortdetektion aus. Die Durchführung von zwei parallelen Rechnungen mit sechs und acht EF erhöht zusätzlich die Konvergenzsicherheit, der auch das hierarchische Konzept der Minimumsuchstrategie dient.

Von Bedeutung in unserem Zusammenhang ist auch die Gewährleistung einer eindeutigen Zuordnung von gemessenen und theoretisch ermittelten EF. Die Kenntnis der Eigenformen ist dabei eine Möglichkeit. Bei der Behandlung von Balkenstrukturen mit einer Reihenschaltung der einzelnen Elemente, deren Lagerpunkte sich nur in den Endpunkten der Struktur befinden, bleibt die Reihenfolge der EF konstant. Im speziellen kann dies für Balken, die in den Endpunkten in irgendeiner Form gelagert sind, nachgewiesen werden.

Hat man in diesem Fall eine beliebige EF eindeutig zugeordnet, sind im Algorithmus zur Parameteranpassung keine speziellen Prozeduren zur Zuordnungsüberprüfung notwendig.

Aus den in [1] dargestellten Ergebnissen folgt eine in großen Bereichen unterschiedliche Empfindlichkeit der EF auf Änderungen verschiedener Parameter. So führen Änderungen der Lagersteifigkeiten in Bereichen, die von der Zerstörung der Konstruktion noch weit entfernt sind, zu wesentlich größeren EF-Driften als etwa auftretende Einschnitte. Das vorgeschlagene Verfahren zur Minimumsuche ist deshalb hierarchisch aufgebaut, um diese unterschiedliche Sensibilität zu verwerten.

Diese Methode kann durch die folgenden Schritte skizziert werden:

- I. Minimierung des Funktional (1) ($g_i = 1, i = 1, \dots, M$), unabhängige Parameter sind nur die Lagersteifigkeiten und die Längskraft $p_1, \dots, p_k, k < N$
- II. Ermittlung der Minima von (1) für in I. gefundene p_1, \dots, p_k in Abhängigkeit vom Rißortparameter p_{k+1} ; die den Riß beschreibenden Parameter p_{k+2}, p_{k+3} sind konstant (die hier genutzten Rißmodelle sind zweiparametrig)
- III. Feiniterationen mit p_1, \dots, p_k für die ermittelten Minimawerte der Rißortparameter $p_{k+1}^1, p_{k+1}^2, \dots, p_{k+1}^l$
- IV. Korrektur der Rißortparameter, in deren unmittelbarer Umgebung bei konstanten p_1, \dots, p_k . Suche des Rißortparameters, der dem kleinsten Funktionalwert entspricht.
- V. Variation der Rißparameter p_{k+2}, p_{k+3}

Die Funktionalminimierung in den einzelnen Teilschritten erfolgte mit einem direkten, ableitungsfreien Suchverfahren.

Zur Konvergenzverbesserung im Startbereich wurde noch eine spezielle Prozedur implementiert, die auf der folgenden Eigenschaft basiert: Wenn alle gemessenen EF kleiner (größer) den ermittelten theoretischen Werten sind, kann nur eine Steifigkeitsabminderung (-erhöhung) erfolgen.

Als günstig für die Senkung der Rechenzeit erweist sich der Schritt I., da man hier auf ein computerzeiterhöhendes Rißmodell verzichten kann.

Um im 2. Schritt effektiv zu arbeiten, empfiehlt sich die Nutzung einer Methode mit Schrittweitensteuerung für p_{k+1} . Bei der Rißortdetektion an Balken wurden gewöhnlich in Abhängigkeit von den verwendeten EF in diesem Schritt drei bis fünf Minima ermittelt. Dies ist auch eine der Ursachen dafür, warum eine gleichzeitige Iteration aller Parameter p_1, \dots, p_{k+1} mit hoher Wahrscheinlichkeit „hängenbleiben“ wird. Man muß dann durch die Wahl unterschiedlicher Startvektoren versuchen, die Prozedur in das absolute Minimum zu lenken, was den Aufwand ansteigen läßt.

Um eine noch größere Konvergenzsicherheit und Verfahrensempfindlichkeit zu gewährleisten, wurden bei den Untersuchungen die ersten sechs und acht EF im Zielfunktional berücksichtigt. Erhält man ähnliche Resultate, gilt das Ergebnis als gesichert. Bei größeren Unterschieden werden die ermittelten Rißorte $p_{k+1,6EF}$ und $p_{k+1,8EF}$ jeweils mit den Lagerparametern der anderen Untersuchung kombiniert und Feiniterationen (Schritt III.) mit den Parametersätzen

$p_{1,6EF}, \dots, p_{k,6EF}, p_{k+1,8EF}$ und $p_{1,8EF}, \dots, p_{k,8EF}, p_{k+1,6EF}$ durchgeführt. Als Rißort gilt dann der Wert, der gegenüber der ursprünglichen Variante mit sechs oder acht EF die größte Verbesserung bringt.

Diese Vorgehensweise garantiert auch eine gewisse Nivellierung des Meßfehlerinflusses. Nimmt man acht EF in der Rechnung mit, können etwaige Meßfehler bei einigen EF noch ausgeglichen werden. Bei der Nutzung von sechs EF kann man den Einfluß von Meßungenauigkeiten bei der siebenten und achten EF auf die Rißortbestimmung eliminieren.

Bei genügend großen Defekten kann auf die Feiniterationen der Schritte III und IV verzichtet werden, d. h. diese zusätzlichen Iterationen dienen der Erhöhung der Empfindlichkeit des Algorithmus. Dies wird im folgenden Abschnitt noch deutlich.

3. Praktische Anwendung des Verfahrens

3.1. Detektion der Lage einer Zusatzmasse

Die experimentellen Untersuchungen wurden am UT Prag durchgeführt. Die Parameter des verwendeten Probekörpers lauten:

Länge – 1.51 m, Höhe – 0.01 m, Breite – 0.045 m,

Dichte – 7850 kg m⁻³,

Elastizitätsmodul – 20.59 10¹⁰ kg m⁻¹ s⁻²,

Masse – 5.25 kg.

Es sei nun die Lage einer Zusatzmasse (ZM) auf einem elastisch eingespannten Balken zu detektieren. Einer solchen Zusatzmasse kann über Reißmodelle ein entsprechender Einschnitt zugeordnet werden, so daß die hier dargestellten Ergebnisse verallgemeinert werden können. Die Befestigung der Balkenenden ist in Bild 1 dargestellt, während die Modellparameter der elastischen Einspannung Bild 2 entnommen werden können. Da bei dieser Art der Einspannung die Einspannsteifigkeiten einen großen Einfluß auf die Höhe der Eigenfrequenzen haben, wurden diese Steifigkeiten mitidentifiziert. Details der Versuchsanordnung sind in Bild 3 dargestellt. Ein Stoß mit dem Impulshammer K auf den Balken bewirkt im am Hammer befestigten Kraftaufnehmer (von Bruel und Kjaer, Typ 8200) ein Signal, das dem Stoßkraftimpuls proportional ist. Gleichzeitig wird ein Signal vom Beschleunigungsaufnehmer (von Bruel und Kjaer, Typ 4374, Masse kleiner als 1g) aufgenommen. Mit einem Zweikanalanalysator (ebenfalls von Bruel und Kjaer, Typ 2034) wird der entsprechende Frequenzgang ermittelt, aus dem die EF relativ leicht bestimmt werden können (siehe Tab. 1).

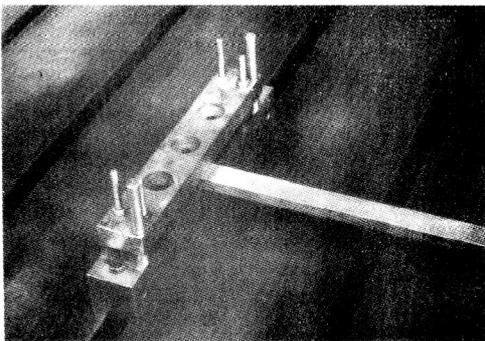


Bild 1
Einspannung des Probekörpers

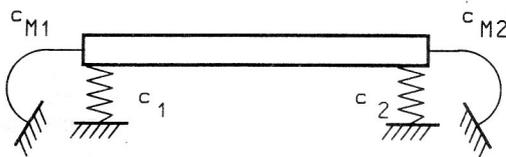


Bild 2
Elastisch eingespannter Probekörper mit den Lagersteifigkeiten c_1, c_2, c_{M1}, c_{M2}

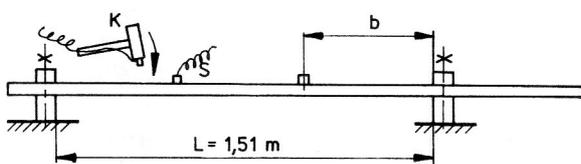


Bild 3
Versuchsanordnung für die Ortsdetektion einer Zusatzmasse

Wegen der relativ festen Einspannung haben die überstehenden Teile des Probekörpers nur einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Eigenfrequenzen.

Nach der Realisierung des zweiten Schrittes der oben angegebenen Strategie für eine ZM von 100 g (dies entspricht 1,87 Prozent der Gesamtmasse des Systems Balken-ZM) ergeben sich die Tabelle 2 zusammengefaßten Minima.

Für die Lage 0.5 m wurde der Funktionalverlauf in Abhängigkeit von einer angenommenen ZM-Lage in Bild 4 dargestellt. Es zeigt anschaulich die durch den Lageparameter hervorgerufene Welligkeit des Funktionalverlaufes, die numerisch schwierig zu behandeln ist und die oben skizzierte besondere Herangehensweise motivierte.

Es sei noch einmal darauf verwiesen, daß gerade dieser Umstand eine Zusatzmassen- bzw. Reißortbestimmung sehr erschwert und begründete Zweifel an der stabilen

Tabelle 1

Gemessene EF des Probekörpers mit Zusatzmasse. Hierbei sind b-Lage der Zusatzmasse (Abstand von der Einspannstelle), OZM-EF des Balkens ohne Zusatzmasse. Die Angabe der Werte bis auf drei Stellen nach dem Komma täuscht über deren Genauigkeit hinweg, denn die Frequenzschrittweite betrug nur 0.0625 Hz.

Zusatzmasse (ZM) = 100 g

EF	b = 0.3m	b = 0.5 m	b = 0.755 m	OZM
1	21.125	20.500	20.562	20.750
2	59.500	58.687	60.062	59.812
3	117.437	119.062	117.562	119.312
4	196.187	196.937	198.812	198.625
5	297.125	293.437	293.375	298.062
6	416.500	415.687	416.687	416.750
7	550.312	549.937	546.687	555.375
8	701.687	701.687	708.875	712.375

Tabelle 2

Ergebnisse der Parameterschätzung für die ersten sechs EF (Euler-Bernoulli-Modell) nach Schritt II der Schätzstrategie. In der dritten Spalte sind die zu den Minimalwerten gehörenden Funktionalwerte eingetragen. Die Lagersteifigkeiten der letzten Spalte bezeichnen von oben nach unten c_1, c_{M1}, c_2, c_{M2} .

reale Lage	Lage Minimum	Fu-Wert	Lagersteifigkeit
0.3 m	0.30 m	9.9296	0.12620E+09
	0.07 m	10.222	0.14710E+08.
	0.56 m	12.255	0.23103E+10
	0.75 m	14.178	0.17147E+05
0.5 m	0.52 m	13.551	0.18642E+09
	0.76 m	13.896	0.52695E+05
	0.26 m	15.509	0.61005E+10
	0.06 m	15.520	0.31374E+05
0.755 m	0.755 m	16.457	0.88962E+08
	0.50 m	19.702	0.51379E+05
	0.27 m	21.519	0.51473E+10
	0.05 m	21.587	0.38229E+05

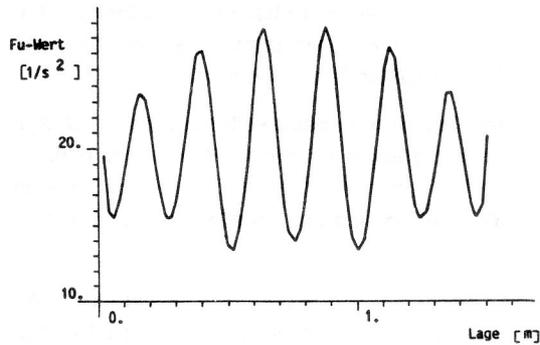


Bild 4
Verlauf des Zielfunktional in Abhängigkeit von einer angenommenen Einschnittlage

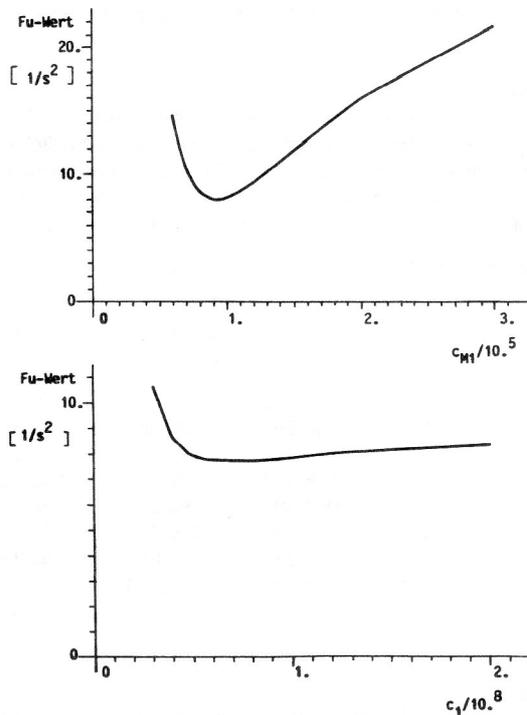


Bild 5
Verlauf des Zielfunktional in Abhängigkeit von den Lagerparametern c_1 und c_{M1}

Konvergenz der üblicherweise für solche nichtlinearen Optimierungsaufgaben genutzten Gauß-Newton-Verfahren läßt.

In Bild 5 ist dagegen der Funktionalverlauf in Abhängigkeit von den Lagerparametern c_1 und c_{M1} für das Beispiel ohne Zusatzmasse dargestellt. Die jeweils nicht variierten Parameter hatten die Werte $c_1 = 0.46556E+08 \text{ N m}^{-1}$, $c_{M1} = 0.93927E+05 \text{ N m}$, $c_2 = 0.16574E+10 \text{ N m}^{-1}$, $c_{M2} = 0.38606E+05 \text{ N m}$.

Der konvexe Funktionalverlauf ist hier gut zu erkennen. Offenbar ist dies eine Ursache der mit wachsender Ordnung der EF größer werdenden Empfindlichkeit gegenüber Lageränderungen. Ist diese Eigenschaft nicht erfüllt, können durchaus mehrere Minima auftreten. Auf jeden Fall ist der Funktionalverlauf an seinen Rändern immer monoton

steigend (dies entspricht den Steifigkeitswerten, für die alle EF kleiner oder größer den gemessenen sind).

Wie Tabelle 2 verdeutlicht, sind die richtigen Lagewerte hier gleichzeitig die absoluten Minima, so daß auf Feiniterationen verzichtet werden kann. Diese müssen nur durchgeführt werden, wenn die genauen Werte der Lagersteifigkeiten von Interesse sind.

3.2. Detektion der Lage eines symmetrischen Einschnittes

In einer weiteren Versuchsreihe sollte ein beidseitig symmetrisch bezüglich der neutralen Linie eingebrachter Einschnitt in seiner Lage nachgewiesen werden. Die experimentell gemessenen EF sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3

Gemessene EF für einen Balken mit symmetrischem Einschnitt. Hierbei entspricht b der Lage der Mitte des Einschnittes (Gesamttiefe 0.004 m, Breite 0.002 m). Im Versuch wurde dazu ein Balken mit einem Einschnitt genutzt, der zur Variation der Einschnittlage mehrfach neu eingespannt wurde. Die überstehenden Enden hatten dabei wegen der relativ festen Einspannung einen vernachlässigbaren Einfluß auf die EF.

EF	$b = 0.4 \text{ m}$	$b = 0.5 \text{ m}$	$b = 0.6 \text{ m}$	$b = 0.7 \text{ m}$
1	22.562	22.687	22.312	22.187
2	61.625	61.937	61.250	61.437
3	120.437	121.750	120.062	119.937
4	199.375	200.312	197.187	198.937
5	296.562	298.125	295.687	296.312
6	412.500	418.312	41.375	415.187
7	550.000	555.125	547.687	551.312
8	706.250	708.187	703.250	704.687

Tabelle 4

Ergebnisse der Parameterschätzung für die ersten acht EF (Euler-Bernoulli-Modell)

reale Lage	Lage Minimum	Fu-Wert	Lagersteifigkeit
0.4 m	0.40 m	0.69443	0.36423E+08 0.67619E+05 0.12708E+09 0.44301E+05
0.5 m	0.49 m	1.65300	0.30824E+08 0.12486E+09 0.57675E+10 0.40503E+05
0.6 m	0.60 m	1.17380	0.36629E+08 0.50656E+05 0.13592E+11 0.37482E+05
0.7 m	0.26 m	1.31020	0.82115E+09 0.80439E+05 0.26750E+08 0.41700E+05

Tabelle 5

Ergebnisse der Parameterschätzung für die ersten sechs EF (Euler-Bernoulli-Modell)

reale Lage	Lage Minimum	Fu-Wert	Lagersteifigkeit
0.4 m	0.07 m	0.19435	0.11714E+08 0.23952E+06 0.55200E+09 0.38042E+05
0.5 m	0.51 m	0.46210	0.33217E+08 0.77589E+10 0.18235E+09 0.34970E+05
0.6 m	0.59 m	0.21438	0.65148E+10 0.77213E+10 0.13264E+08 0.22605E+05
0.7 m	0.75 m	0.33618	0.21763E+08 0.82838E+08 0.14862E+09 0.27045E+05

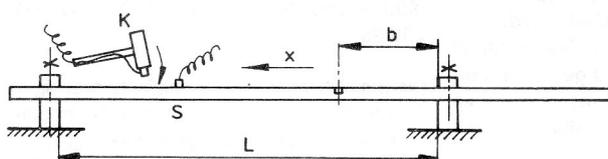
Sowohl bei der Nutzung von sechs als auch acht EF waren Feiniterationen erforderlich, da die gesuchten Lagewerte nach dem zweiten Schritt nicht dem absoluten, sondern in der Regel einem lokalen Minimum entsprachen. Die Endergebnisse beinhalten Tabelle 4 und 5.

Die Ergebnisse für acht EF, Lage 0.7 m, und sechs EF, Lage 0.4 m, sind offenbar fehlerhaft. Hier liefert ein Überkreuzvergleich die richtigen Werte. In allen anderen Fällen wurde die Defektlage korrekt bestimmt.

3.3. Detektion der Lage eines unsymmetrischen Einschnittes

Eine weitere Versuchsreihe wurde mit einem einseitig eingeschnittenen Balken (Bild 6) durchgeführt (Einschnittparameter: Tiefe = 0.004 m, Breite = 0.002 m), wobei bei den theoretischen Untersuchungen der Einschnitt wie im vorangegangenen Abschnitt symmetrisch modelliert wurde. Die gemessenen EF sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Bei der numerischen Behandlung waren auch hier wiederum Feiniterationen erforderlich. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7 und 8 zu finden.

**Bild 6**

Versuchsanordnung für den einseitig eingeschnittenen Balken

Tabelle 6

Gemessene EF für einen Balken mit einem unsymmetrischen Einschnitt.

EF	b = 0.4 m	b = 0.5 m	b = 0.6 m	b = 0.7 m
1	22.562	22.500	22.312	22.250
2	61.187	61.187	61.375	61.750
3	120.000	121.000	120.500	119.875
4	199.500	198.437	197.062	199.375
5	296.375	294.625	297.375	296.187
6	410.625	415.625	411.500	412.937
7	549.687	549.875	549.000	551.750
8	708.187	700.437	706.500	704.250

Tabelle 7

Ergebnisse der Parameterschätzung für einen Probek balken mit unsymmetrischem Einschnitt unter Verwendung der ersten acht EF (Euler-Bernoulli-Modell).

reale Lage	ermittelte Lage	Fu-Wert
0.4 m	0.40 m	6.6850
0.5 m	0.50 m	5.9411
0.6 m	0.61 m	4.1811
0.7 m	0.67 m	1.6554

Tabelle 8

Ergebnisse der Parameterschätzung für einen Probek balken mit unsymmetrischem Einschnitt unter Verwendung der ersten sechs EF (Euler-Bernoulli-Modell).

reale Lage	ermittelte Lage	Fu-Wert
0.4 m	0.08 m	0.90768
0.5 m	0.50 m	4.3428
0.6 m	0.64 m	7.4205
0.7 m	0.73 m	0.37348

Bei der Nutzung von acht EF kann damit die Lage eines Einschnittes auch ohne Berücksichtigung der realen Einschnittform (Exzentrizität) gefunden werden. Ein fehlerhaftes Ergebnis erhält man für die reale Lage 0.4 m bei Verwendung von nur sechs EF. Durch einen Überkreuzvergleich der ermittelten theoretischen Lagen und Durchführung des dritten Schrittes im Parameterschätzalgorithmus findet man jedoch das richtige Resultat. Die in einigen Fällen recht großen Funktionalwerte sind auf die Startvektoren zurückzuführen, die einer sehr steifen (elastischen) Einspannung entsprechen.

Zusammenfassend kann damit festgestellt werden, daß die vorgeschlagene hierarchische Strategie zur Detektion der Einschnitt(Riß-)lage geeignet ist. Betrachtet man die relativ geringen EF-Verschiebungen, die mit dem Drei-Felder-Modell beschriebene Einschnitte gegenüber den möglichen Lagersteifigkeitseinflüssen bewirken, ist dieses Ergebnis bemerkenswert. Eine Modellierung von Einschnitten mit dem Drei-Felder-Modell liefert damit durchaus brauchbare Resultate. Ergebnisse zur Anwendbarkeit der

Methode an größeren Konstruktionen werden in [4] publiziert.

Das dargestellte Konzept wurde am Institut für Mechanik Chemnitz im Programmpaket DEFDEK in einer FORTRAN-Version implementiert.

4. Zusammenfassung

Auf der Basis einer genauen Analyse des Einflusses verschiedener Parameter – Längskräfte, Lagersteifigkeiten, Rißparameter – an Balkenkonstruktionen wird eine neue Methode zur Ermittlung von Strukturparametern entwickelt und an praktischen Beispielen getestet. Dabei werden die gemessenen EF als Meßinformation genutzt.

Mit einem hierarchischen Konzept zur Parameterschätzung, das die unterschiedliche Sensitivität der Einflußparameter ausnutzt und sich prinzipiell von den üblicherweise für solche Aufgaben genutzten verschiedenen Modifikationen der Gauß-Newton-Verfahren unterscheidet, können Längskräfte, Lagersteifigkeiten, Rißlage und Rißparameter direkt geschätzt werden. Dabei wurde herausgearbeitet, daß man vor allem bei der Rißlagendetektion mit einer Welligkeit des Zielfunktionalen rechnen muß, die aber vom vorliegenden Verfahren gut gemeistert wurde.

Die erzielten Ergebnisse zeigen weiter, daß eine Rißmodellierung mit einem Drei-Felder-Modell durchaus brauchbare Resultate liefert, wobei möglicherweise eine Rißmodellierung mit bruchmechanischen Beziehungen (s. u. a. [2], [3]) eine weitere Erhöhung der Genauigkeit/Empfindlichkeit des Verfahrens bringen kann.

LITERATUR

- [1] Schmidt, C.-D.: Defektdetektion an Balkenkonstruktionen auf der Basis gemessener Eigenfrequenzen unter Anwendung eines hierarchischen Konzeptes zur Parameterschätzung. Report Nr. 27, Institut für Mechanik, Karl-Marx-Stadt, 1990.
- [2] Papadopoulos, C. A.; Dimarogonas, A. D.: Kopplung zwischen Biege- und Torsionsschwingungen einer Welle vom Timoshenko-Balkentyp mit Riß. Ing.-Archiv 57 (1987) 4, S. 257 – 266.
- [3] Freund, A.; Meltzer, G.: Finites Rißelement für Balken mit Rechteckquerschnitt. Tagungsbände der 8. Tagung Festkörpermechanik, Beitrag II, Dresden, 1991.
- [4] Schmidt, C.-D.: Anwendung von Identifikationsalgorithmen zur Lösung praktischer Probleme. Tagungsbände der 8. Tagung Festkörpermechanik, Beitrag VII, Dresden, 1991.

Anschrift der Verfasser:

Dr. C.-D. Schmidt
Institut für Mechanik
Postfach 408
O-9010 Chemnitz

Dr. sc. L. Pust
Institut für Thermomechanik
UT ČSAV
Dolejšková 5
Praha 8 – Libeň
18200

H. Vesely
Institut für Thermomechanik
UT ČSAV
Dolejšková 5
Praha 8 – Libeň
18200