TECHNISCHE MECHANIK, Band 18, Heft 1, (1998), 25-30
Manuskripteingang: 13. Oktober 1997

Über das inverse Problem der Bestimmung des aktuellen Zustandes von Tragwerken aus Verformungsmessungen

K.-H. Laermann

Herrn Univ.-Professor Dr. Franz Ziegler anläßlich der Vollendung seines 60. Lebensjahres gewidmet

Es wird ein Rechenverfahren zur Lösung sogenannter inverser Probleme in der Tragwerksanalyse entwickelt, um über Langzeitmessungen den jeweils aktuellen Zustand von Konstruktionen einschließlich des aktuellen Materialverhaltens aus gemessenen Wirkungen, den Verformungen und deren Änderungen über die Zeit, unter Berücksichtigung von Temperatureinflüssen zu berechnen. Das Verfahren ermöglicht die zerstörungsfreie Bestimmung der tatsächlichen Tragfähigkeit bzw. der Resttragfähigkeit und evtl. der Restnutzungsdauer von Konstruktionen aus Langzeitmessungen. Grundlage ist die Matrizentheorie der Baustatik, durch welche die gemessenen Wirkungen untereinander wie mit den Ursachen und mit den inneren Parametern verknüpft werden. Dies führt zu stark nichtlinearen Gleichungssystemen. In einem Iterationsverfahren wird der Grad der Nichtlinearität soweit reduziert, daß schließlich nur noch ein System quadratischer Gleichungen zu lösen ist.

1 Einleitung. Zweck der Messungen

Mit Bezug auf „kritische" Strukturen, das sind solche Strukturen mit hohen Schadens- und Risikopotentialen im Versagensfall, muß die Frage beantwortet werden, ob zur Berechnung der Beanspruchungen in der Entwurfsphase deterministische Methoden allein ausreichen, um zuverlässige Informationen über die Sicherheit gegen Verlust der Funktions- und Tragfähigkeit, gegebenenfalls über Resttragfähigkeit und Restnutzungsdauer im Verlaufe der Nutzung zu erhalten. Alterungseffekte, Materialermüdung, Umwelteinflüsse können z.B. die Tragfähigkeit eines Tragsystems nachhaltig beeinträchtigen. Es kann u.U. auch notwendig sein, die fertiggestellte Konstruktion zu Beginn der Nutzung daraufhin zu prüfen, ob die einer Berechnung immer zugrundliegenden Annahmen, die Materialparameter, das Rechenmodell, schließlich auch die Berechnungen selbst die Wirklichkeit tatsächlich abbilden. Deshalb ist es aus sicherheitstechnischen wie wirtschaftlichen Gründen wichtig, Verfahren und Strategien für die Kontrolle und Überwachung solcher „kritischen" Kontruktionen zu entwickeln, um Informationen über deren tatsächliches Verhalten über die Lebensdauer zu erhalten (Laermann, 1994; Schneider und Schlatter, 1994; Chong Ken et al., 1995; Sharma, 1995). Derartige Strategien basieren auf Messungen; die Meßtechniken für unterschiedliche Meßgrößen und Fragestellungen sind dazu heute verfügbar (siehe u.a. Laermann, 1997 a und b).

Für die Auswertung der Meßdaten sind jedoch geeignete mathematische Methoden zu entwickeln, um das durch die Messungen ermittelte Verhalten des untersuchten Systems zu den entsprechenden ursprünglichen Entwurfsdaten einschließlich der inneren Parameter und dem zugrundeliegenden theoretischen Berechnungsmodell in Beziehung zu setzen.

2 Definition inverser Probleme

Im konstruktiven Ingenieurbau werden üblicherweise je nach Modellbildung und mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren die Schnittkräfte, Spannungen und Verformungen, gegebenenfalls auch Verzerrungen also Wirkungen, infolge gegebener äußerer Belastungen, den Ursachen, berechnet; beide sind über eine Operatorenmatrix $\mathbf{L}$ miteinander verknüpft, in der die inneren Parameter, z.B. Geometrie des Systems und die Materialeigenschaften enthalten sind.

$$\mathbf{w} = \mathbf{L}\mathbf{u}$$

Dies ist eine direkte Aufgabe, die stets zu eindeutigen Lösungen führt.

Sollen allerdings aus Wirkungen, die Messungen zugänglich sind, wie z.B. Verformungen und Dehnungen die Ursachen, wie z.B. äußere Lasten oder innere Parameter, wie die Materialeigenschaften, z.B. die Elastizitätsmoduli und Querkontraktionszahlen bestimmt werden, so liegt eine inverse Aufgabe vor (Moritz, 1993; Anger, 1993). Nun ist die Operatorenmatrix $\mathbf{L}$ im allgemeinen nicht quadratisch und nicht regulär, sondern eine Rechteckmatrix; dann ist $\mathbf{L}^{-1}$ weder eindeutig definiert noch stabil. Das ist die typische, grundsätzliche mathematische Struktur vieler inverser Probleme. Es kann sich dabei um ein überbestimmtes System handeln, wenn z.B. die Meßdaten von mehr Wirkungen $\mathbf{w}$ vorliegen als unbekannte Ursachen $\mathbf{u}$ zu berechnen sind. Die Lösung einer solchen inversen Aufgabe, die in die Klasse der inversen Probleme 1. Art fällt, läßt sich dann mit bekannten statistischen Methoden der Fehlerausgleichsrechnung finden (siehe Abschnitt 3.2.). Meistens handelt es sich jedoch um unterbestimmte Systeme, und zwar immer dann, wenn die inneren Parameter der Operatorenmatrix gesucht sind, denn gerade diese sind oft direkten Messungen unzugänglich. In diesem Fall handelt es sich um inverse Probleme der 2. Art. Die Beobachtungen (Meßdaten) sind vielfach alleine nicht ausreichend, um diese Parameter eindeutig, wenn überhaupt bestimmen zu können. Es werden zusätzliche Informationen benötigt wie auch „Erfahrungen" eingebracht werden müssen.

Die Gefahr besteht, daß zwar „wunderschöne" Ergebnisse einer Auswertung, oder richtiger gesagt einer Interpretation von Meßdaten präsentiert werden, aber nicht mehr zu erkennen und zu bewerten ist, welche Informationen und von welcher Qualität zugrunde gelegt wurden und ob die präsentierten Lösungen tatsächlich zuverlässig und eindeutig sind.

Es bedarf, wie Anger (1992) postuliert, einer „Theorie des Messens" um inverse Probleme verläßlich und eindeutig lösen zu können; dies setzt eine Neuordnung des Verhältnisses von Theorie und Praxis voraus, eine Revitalisierung der These von Newton und Leibnitz „Theoria cum praxis".

3 Zustandsanalyse eines Tragwerkes

Diese einleitenden allgemeinen Feststellungen über inverse Probleme sollen im folgenden auf das konkrete Problem übertragen werden, für ein Tragsystem aus gemessenen Wirkungen die Ursachen einschließlich der inneren Parameter zu ermitteln. Der besseren Übersichtlichkeit wegen wird eine ideale Fachwerkkonstruktion gewählt, ohne daß damit die Allgemeingültigkeit des Verfahrens eingegrenzt wird. Das betrachtete Tragsystem bestehe aus s Elementen, sei mit r äußeren Kräften belastet und n-fach statisch unbestimmt.

3.1 Bestimmung der meßbaren Wirkungen im Ausgangszustand

Auf der Grundlage der Matrizentheorie lautet die direkte Aufgabe

$$\mathbf{v} = \mathbf{f}\,\mathbf{K}\,\mathbf{P} = \mathbf{L}\,\mathbf{P} \qquad (1)$$

mit dem Vektor der Wirkungen, hier den Verformungen $\mathbf{v}$, dem Vektor der Ursachen, hier dem Lastvektor $\mathbf{P}$ und der Operatorenmatrix $\mathbf{L}$, in der die Strukturmatrix $\mathbf{K}$ und über die sogenannte Nachgiebigkeitsmatrix $\mathbf{f}$, eine s x s-Matrix, die inneren Parameter, i.e. die Geometrie der Systemelemente und die Materialeigenschaften der einzelnen Elemente enthalten sind. Die Strukturmatrix mit der Dimension s x r ist wie folgt definiert:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 - \mathbf{K}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_0 \qquad (2)$$

mit

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{K}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{f}\,\mathbf{K}_1 \qquad \mathbf{D}_0 = \mathbf{K}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{f}\,\mathbf{K}_0 \qquad (3\ \mathrm{a/b})$$

Dabei bezeichnet $\mathbf{K}_0$ die Matrix der inneren Kräfte im statisch bestimmten Grundsystem infolge der äußeren Lasten (Einheitslasten), $\mathbf{K}_1$ die Matrix der Schnittkräfte infolge der Einheitslastzustände der statisch Unbestimmten.

Die Operatorenmaterix $\mathbf{L}$ hängt demzufolge also ab von der Geometrie der Elemente (Länge, Querschnitt) und den Materialeigenschaften (Elastizitätsmoduli, Querkontraktionszahl), die für die einzelnen Systemelemente durchaus unterschiedlich sein können; es ist eine s x r-Matrix.

3.2 Inverses Problem 1. Art: Bestimmung der Ursachen

Es sei nun angenommen, die inneren Parameter (Geometrie, Materialeigenschaften) seien bekannt, damit auch **L**; gemessen werde **v** für die einzelnen Elemente, zu berechnen ist dann **P** aus der Gleichung (1).

Da im allgemeinen $r < s$ liegt ein überbestimmtes System vor, **L** ist nicht invertierbar. Weil aber alle Meßwerte mit Meßfehlern ε behaftet sind, wird Gleichung (1) erweitert

$$\mathbf{v} = \mathbf{L}\,\mathbf{P} + \varepsilon \qquad (4)$$

Diese Gleichung ist nunmehr unterbestimmt, denn das „Rauschen“, d.h. die Meßfehler sind unbekannt. Die klassische Lösung für dieses Problem nach Gauss, die Fehlerausgleichsrechnung nach der Methode des Minimums der Fehlerquadrate liefert eindeutige Ergebnisse:

$$\mathbf{P} = \left(\mathbf{L}^T\mathbf{L}\right)^{-1}\mathbf{L}\,\mathbf{v}_{\text{gem}} \qquad (5)$$

3.3 Inverses Problem 2. Art: Bestimmung innerer Parameter

Vorausgesetzt Geometrie der Elemente und äußere Lasten seien bekannt (wenn letztere nicht bekannt sind, können sie durch Messungen bestimmt werden), die Verformungen **v** werden gemessen, gesucht sind die Materialparameter, im Fall des betrachteten Fachwerks die Elastizitätsmoduli E_σ der einzelnen Elemente; dann ist die Nachgiebigkeitsmatrix und damit **L** unbekannt. Es liegt ein inverses Problem der 2. Art vor.

Im allgemeinen sind inverse Probleme der 2. Art ohne zusätzliche Informationen in Ergänzung der gemessenen Wirkungen, also den Verformungen, nicht eindeutig lösbar.

Die Matrix **L** enthält s x r Elemente, unbekannt aber sind im betrachteten Fall, unter der Voraussetzung kleiner Formänderungen, nur die aktuellen Werte der Elastizitätsmoduli der s Systemelemente bzw. die s aktuellen Werte der Nachgiebigkeiten f_σ. Es stehen mithin s Gleichungen zur Bestimmung der s unbekannten Parameter f_σ zur Verfügung; das vorliegende inverse Problem 2. Art ist im Prinzip lösbar, denn die mathematische Struktur ist bekannt.

Angenommen es liege ein Grundzustand der untersuchten Systemstruktur vor. Zusätzlich werden r äußere Lasten $\hat{\mathbf{P}}$ aufgebracht, u. U. als Probebelastung, und die daraus resultierenden Verformungen **v** gemessen. Dann gilt nach Gleichung (1), (2) und (3 a/b)

$$\mathbf{v}_{\text{gem}} = \mathbf{f}\left\{\mathbf{I} - \mathbf{K}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{K}_1^T\mathbf{f}\right\}\mathbf{K}_0\hat{\mathbf{P}} \qquad (6)$$

In dieser Gleichung ist die Definition von $\mathbf{D}_1$ gemäß Gleichung (3) zu beachten; sie ist stark nichtlinear in **f**.

Wenn das System statisch bestimmt ist, vereinfacht sich Gleichung (6) zu

$$\mathbf{v}_{\text{gem}} = \mathbf{f}\,\mathbf{K}_0\hat{\mathbf{P}} = \mathbf{f}\,\hat{\mathbf{R}} \qquad (7)$$

und die eindeutige Lösung lautet z.B. für das einzelne Systemelement eines idealen Fachwerks

$$f_\sigma = v_{\sigma\text{gem}}\hat{R}_\sigma^{-1} \qquad \hat{R}_\sigma = \sum_{\rho=1}^{r} K_{0\sigma\rho}\hat{P}_\rho \qquad (8)$$

Daraus folgt der Elastizitätsmodul für ein Systemelement σ

$$E_\sigma = l_\sigma\left(A_\sigma f_\sigma\right)^{-1} = \frac{l_\sigma}{A_\sigma}\frac{\hat{R}_\sigma}{v_{\sigma\text{gem}}} \qquad (9)$$

3.4 Auswertung von Langzeitmessungen

Das Materialverhalten und damit die Nachgiebigkeitsmatrix sind unbekannte Zeitfunktionen $\mathbf{f} = \mathbf{f}(t)$. Damit sind auch die inneren Kräfte wie auch die Verformungen von der Zeit abhängig, also auch die Meßwerte.

$$\mathbf{v} + \int_{t_0}^{t} \frac{d\mathbf{v}}{dt} dt = \left(\mathbf{f} + \int_{t_0}^{t} \frac{d\mathbf{f}}{dt} dt \right) \left(\mathbf{S} + \int_{t_0}^{t} \frac{d\mathbf{S}}{dt} dt \right) \tag{10}$$

Diskretisiert gilt im Zeitintervall $\Delta t_\nu = t_{\nu+1} - t_\nu$ in verkürzter Schreibweise:

$$\Delta \mathbf{v}_\nu = \Delta \mathbf{f}_\nu \mathbf{S}_\nu + \left(\mathbf{f}_\nu + \Delta \mathbf{f}_\nu \right) \Delta \mathbf{S}_\nu \tag{11}$$

Angenommen **P** sei konstant über die Zeit, dann verändern sich bei einem statisch bestimmten System die Schnittkräfte nicht über die Zeit.
Damit ergeben sich im Zeitintervall Δt_ν die Veränderungen der Nachgiebigkeitsmatrix zu

$$\Delta \mathbf{v}_{\nu \mathrm{gem}} = \Delta \mathbf{f}_\nu \mathbf{R} \tag{12}$$

Für statisch unbestimmte Systeme hingegen gilt mit

$$\Delta \mathbf{S}_\nu = \mathbf{S}_{\nu+1} - \mathbf{S}_\nu = \left(\mathbf{K}_{\nu+1} - \mathbf{K}_\nu \right) \mathbf{P} \tag{13}$$

und der Strukturmatrix **K** nach Gleichung (2) und (3) nach einiger Umrechnung

$$\Delta \mathbf{v}_{\nu \mathrm{gem}} = \left\{ \Delta \mathbf{f}_\nu \left[\mathbf{I} - \mathbf{A}_{\nu+1} \mathbf{f}_\nu - \mathbf{A}_{\nu+1} \Delta \mathbf{f}_\nu \right] + \mathbf{f}_\nu \left[\left(\mathbf{A}_\nu - \mathbf{A}_{\nu+1} \right) \mathbf{f}_\nu - \mathbf{A}_{\nu+1} \Delta \mathbf{f}_\nu \right] \right\} \mathbf{R} \tag{14}$$

mit den Bezeichnungen

$$\mathbf{A}_\nu = \mathbf{K}_1 \mathbf{D}_{1,\nu}^{-1} \mathbf{K}_1^T$$

$$\mathbf{A}_{\nu+1} = \mathbf{K}_1 \mathbf{D}_{1,\nu+1}^{-1} \mathbf{K}_1^T$$

Die Gleichung (14) ist stark nichtlinear wegen der Inversen von $\mathbf{D}_1$ und in der vorliegenden Form nicht eindeutig lösbar. Also sind auch hier wiederum zusätzliche Informationen notwendig.

4 Iteratives Lösungsverfahren

Nach allen Erfahrungen sind die Veränderungen der Materialeigenschaften im Zeitintervall der Beobachtung gering und damit die Änderungen $\Delta \mathbf{f}$ der Nachgiebigkeitsmatrix erwartungsgemäß klein. Mithin verändert sich die Matrix $\mathbf{A}_{\nu+1}$ nur geringfügig gegenüber $\mathbf{A}_\nu$.

$$\mathbf{A}_{\nu+1} = \mathbf{K}_1 \left[\mathbf{K}_1^T \left(\mathbf{f}_\nu + \Delta \mathbf{f}_\nu \right) \mathbf{K}_1 \right]^{-1} \mathbf{K}_1^T \tag{15}$$

Deshalb wird die Gleichung (14) in einem iterativen Verfahren gelöst, indem im jeweiligen Iterationsschritt die Matrix ${}^{(\mu-1)}\mathbf{A}_{\nu+1}$ des vorhergehenden Schrittes eingesetzt wird. Als Startwert ${}^{(0)}\mathbf{A}_{\nu+1}$ wird $\mathbf{A}_\nu$ gleich Endwert der Iteration im vorhergehenden Zeitintervall $\Delta \mathbf{t}_{\nu-1}$ gewählt.

Für den ersten Iterationsschritt ergibt sich die Beziehung

$$\Delta \mathbf{v}_{\nu \mathrm{gem}} = \Delta^{(1)} \mathbf{f}_\nu \left[\mathbf{I} - \mathbf{A}_\nu \mathbf{f}_\nu - \mathbf{A}_\nu \Delta^{(1)} \mathbf{f}_\nu \right] + \mathbf{f}_\nu \left[\mathbf{0} - \mathbf{A}_\nu \Delta^{(1)} \mathbf{f}_\nu \right] \mathbf{R} \tag{16}$$

für alle weiteren Schritte gilt

$$\Delta \mathbf{v}_{\nu\text{gem}} - \left\{ \overset{(\mu)}{\Delta} \mathbf{f}_\nu \, {}^{(\mu-1)}\mathbf{A}_{\nu+1} \overset{(\mu)}{\Delta} \mathbf{f}_\nu + \overset{(\mu)}{\Delta} \mathbf{f}_\nu \left(\mathbf{I} - {}^{(\mu-1)}\mathbf{A}_{\nu+1} \mathbf{f}_\nu \right) + \mathbf{f}_\nu \, {}^{(\mu+1)}\mathbf{A}_{\nu+1} \overset{(\mu)}{\Delta} \mathbf{f}_\nu - \mathbf{f}_\nu \overset{(\mu-1)}{\Delta} \mathbf{A}_{\nu+1} \mathbf{f}_\nu \right\} \mathbf{R} = \mathbf{0} \tag{17}$$

$$\overset{(\mu-1)}{\Delta} \mathbf{A}_{\nu+1} = {}^{(\mu-1)}\mathbf{A}_{\nu+1} - \mathbf{A}_\nu$$

Dies sind s nichtlineare Gleichungen in $\Delta \mathbf{f}_\sigma$, $\sigma \in 1/s$].

Die Zeile σ des Gleichungssystems (17) lautet (zur übersichtlicheren Darstellung wurde auf die Bezeichnung der Iterationsschritte und des Zeitintervalls verzichtet)

$$\Delta \mathbf{f}_\sigma \sum_{\tau=1}^{s} a^*_{\sigma\tau} \Delta \mathbf{f}_\tau - \Delta \mathbf{f}_\sigma \sum_{\tau=1}^{s} \left(\delta_{\sigma\tau} - a^*_{\sigma\tau} \mathbf{f}_\tau \right) - \mathbf{f}_\sigma \sum_{\tau=1}^{s} a^*_{\sigma\tau} \Delta \mathbf{f}_\tau + \mathbf{f}_\sigma \sum_{\tau=1}^{s} \Delta a^*_{\sigma\tau} \mathbf{f}_\tau - \Delta v_{\text{gem}} = \mathbf{0} \tag{18}$$

Mit * sind die Elemente der jeweils mit **R** multiplizierten Matrizen **A**, Δ**A** und **I** bezeichnet. Dieses Gleichungssystem läßt sich nach den bekannten Verfahren lösen. Als zweckmäßig hat sich das Verfahren nach Newton-Kantorowitsch erwiesen. Das Iterationsverfahren konvergiert rasch; es sind nur einige wenige Iterationsschritte erforderlich. Die Wurzeln sind allerdings auf ihre Eindeutigkeit hin zu überprüfen; hier ist wiederum „Erfahrung" einzubringen.

Unterstellt, daß die Längenänderungen der einzelnen Stäbe des betrachteten Fachwerks wesentlich kleiner sind gegenüber den planmäßigen Längen $\boldsymbol{l}$ und die Querschnittsveränderungen vernachlässigt werden können, lassen sich aus den ermittelten aktuellen Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix die realen Werte der Elastizitätsmoduli berechnen:

$$E_\sigma = l_\sigma \left(A_\sigma f_\sigma \right)^{-1} \tag{19}$$

5 Einfluß von Temperaturänderungen

Zu berücksichtigen ist auch der Einfluß der Temperatur und der Temperaturänderungen auf die Verformungen. Gemessen werden nämlich in den Zeitintervallen Δt_ν die Gesamtverformungen, also die Wirkungen der Belastung, der Temperaturänderungen und u.U. der Änderung der Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T\sigma}$, zusammengefaßt in der Diagonalmatrix $\boldsymbol{\alpha}_T$, wenn diese in den jeweiligen Temperaturbereichen nicht konstant, sondern Funktionen der Temperatur sind. Das setzt natürlich neben der Messung der Verformungen auch die Messung der Temperatur und deren Änderung im jeweiligen Zeitintervall voraus

$$\Delta \mathbf{v}_{\nu\text{gem}} = \Delta \mathbf{v}_\nu^P + \Delta \mathbf{v}_\nu^{\textbf{Temp}} \tag{20}$$

Die Gleichung (17) ist also zu erweitern um den Term

$$\Delta \mathbf{v}_\nu^{\text{Temp}} = \left[\mathbf{I} - \left(\mathbf{f}_\nu + \Delta \mathbf{f}_\nu \right) \mathbf{A}_{\nu+1} \right] \Delta \mathbf{v}_{0\,\nu}^{\text{Temp}} \tag{21}$$

mit

$$\Delta \mathbf{v}_{\nu 0}^{\text{Temp}} = \boldsymbol{\alpha}_T \Delta \mathbf{T}_\nu \mathbf{I} \boldsymbol{l} \tag{22}$$

In der Gleichung (21) sind mithin weitere innere Parameter, die Wärmeausdehnungskoeffizienten enthalten. Zu ihrer Lösung sind weitere Informationen erforderlich. Für die meisten praktischen Fälle kann aufgrund von „Erfahrungen" angenommen werden, daß sich die $\alpha_{T\sigma}$ nur vernachlässigbar geringfügig über die Zeit ändern; die Abhängigkeit von der Temperatur kann in Materialtests, also a priori, festgestellt werden.

6 Schlußfolgerungen

In den vorstehenden Abschnitten wurde auf die Notwendigkeit meßtechnischer Überwachung von Tragkonstruktionen mit hohen Schadens- und Risikopotentialen im Versagensfall hingewiesen; die Meßtechniken liegen dafür vor. Die Aufgabe besteht nun darin, aus den am Tragwerk gemessenen Wirkungen die Ursachen und die inneren Parameter zu ermitteln, die erst zu Aussagen über den aktuellen Zustand des Tragsystems führen. Dies ist ein inverses Problem, wie im 2. Abschnitt erläutert wurde, für das in dem darauf folgenden Abschnitt ein Lösungsverfahren entwickelt wurde. Das Verfahren wurde zwar für eine Fachwerkkonstruktion beschrieben, ist aber im Prinzip auf alle ebenen und räumlichen Stabtragwerke übertragbar.

Die Interpretation von Meßwerten - es handelt sich dabei immer um die Lösung inverser Probleme - erfordert über die rein rechnerische Auswertung hinaus zusätzliche, a-priori-Informationen. Von diesen hängt oft die mathematische Modellbildung ab und von dieser wiederum die Festlegung der zu messenden Größen, der dafür geeigneten Meßverfahren, der Meßstellen wie auch des ganzen Meßsystems. Rein rechnerische Routinen reichen aber nicht aus, es sind „Erfahrungen" einzubringen, die nur in der Praxis gewonnen werden können. So kann z.B. auf die üblichen Inspektionen der Tragwerke durch Augenschein nicht verzichtet werden, um lokale Schädigungen wie Risse, Korrisionsschäden und dergl. feststellen und beurteilen zu können, was u.U. zu Konsequenzen in der Durchführung der Messungen, zu Änderungen und Ergänzungen des Überwachungssystems führen kann. Auch ist zu berücksichtigen, daß Unsicherheiten im Bereich des Messens und der Meßwerte liegen, selbst bei der inzwischen erreichten Präzision und dem hohen Auflösungsvermögen der Meßgeräte; Rauschen, in nahezu gleicher Größenordnung wie die intelligenten Signale, überlagert die Meßwerte. Ebenso kann die Signalübertragung in den komplexen Meßsystemen von der Meßwertaufnahme, über die Verstärkung, Konvertierung in digitale Daten, deren Übertragung in elektronische Rechenanlagen die Genauigkeit der letztendlich auszuwertenden Daten beeinflussen. Das Meßsystem darf nicht als eine „Black Box" betrachtet werden, sondern der Transfer der Meßwerte und Daten muß nach aller Erfahrung genauestens verfolgt werden (Pindera, 1981).

Literatur

1. Anger, G.: Zur Weiterentwicklung des Verhältnisses Theorie-Praxis, GAMM-Mitteilungen, (1992), Heft 2

2. Anger, G.: Basic Principles of Inverse Problems, Akademie-Verlag, Math. Research, Vol. 74, Berlin (1993)

3. Chong Ken P. et al.: Nondestructive Evaluation of Civil Infrastructures Proc. Nondestructive Evaluation of Aging Structures and Dams; SPIE-Proc., Vol. 2457, (1995)

4. Laermann, K.-H.: Über die Sicherheitsbeurteilung von Baukonstruktionen mit Methoden der Experimentellen Mechanik, Bautechnik, 71, (1994), Heft 1

5. Laermann, K.-H.: Sicherheitsüberwachung von Großkonstruktionen mit Methoden der Experimentellen Struktur- und Beanspruchungsanlage, Jahrbuch 1997, VDI/VDE-GMA, VDI-Verlag Düsseldorf, (1997 a)

6. Laermann, K.-H.: Remonte Control and Safety Valuation of Large Engineering Structures by Optical Methods, Proc. ATEM ´97 , Wakayama (1997 b)

7. Moritz, H.: General Considerations Regarding Inverse and Related Problems, in: Inverse Problems: Principles and Applications in Geophysics, Technology and Medicine, ed. Anger, G. et al., Akademie-Verlag, Math. Research, Vol. 74, Berlin (1993)

8. Pindera, J.T.: New Physical Trends in Experimental Mechanics CISM Courses and Lectures, No. 264, Springer-Verlag, Wien/New York, (1981)

9. Schneider, I.; Schlatter, H.-P.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, Hochschulverlag A.G. an der ETH Zürich, B.G. Teubner, Stuttgart, (1994)

10. Sharma, D.K.: Perspective of Nondestructive Evaluation for the Transportation Enterprise, SPIE-Proc., Vol. 2456, (1995)

Anschrift: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c.mult. Karl-Hans Laermann, Fachbereich 11 Bauingenieurwesen, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Pauluskirchstraße 7, D-42285 Wuppertal