

Bedeutung und Perspektiven der experimentellen Beanspruchungs- und Strukturanalyse

K.-H. Laermann

Die experimentelle Beanspruchungs- und Strukturanalyse gewinnt mit den technischen Entwicklungen der Meßtechnik, der enorm gesteigerten Präzision der Sensorik und der Meßgeräte, den hochentwickelten optischen Meßverfahren einschließlich der digitalen Bildauswertung, dem hohen Automatisierungsgrad in der elektronischen Datenerfassung, Datenüberwachung und Datenauswertung zunehmend an Bedeutung. Über die bisherigen Einsatzfelder in Forschung und Entwicklung hinaus finden meßtechnische Verfahren immer mehr praktische Anwendung in der Qualitätskontrolle, in der Überwachung von Maschinen und Anlagen, von Produktionsverfahren wie auch in der Sicherheitsüberwachung von Konstruktionen und Bauwerken.

Vor einigen Jahren schien es noch so, als ob die Entwicklungen in der Computertechnik, verbunden mit neuen Erkenntnissen in der theoretischen Mechanik und der angewandten Mathematik, die experimentellen Methoden in der Struktur- und Beanspruchungsanalyse verdrängen würden.

Entsprechend den raschen Entwicklungen in der Hardware wie im besonderen auch in der Software mit modernen, diskreten Rechenverfahren, wie z.B. der Finite-Element-Methode und der Randelement-Methode, wurde die Frage diskutiert, ob Verfahren der *experimentellen Mechanik* noch notwendig seien. Es wurde argumentiert, daß neue Generationen von Computern verfügbar seien mit immer größerer Kapazität und wachsender Rechengeschwindigkeit und daß die Möglichkeiten scheinbar unbegrenzt seien, Rechenprozeduren zu entwickeln, die an jedes mechanische oder strukturelle Problem angepaßt werden können, mit denen nahezu jedes Festigkeitsproblem gelöst werden könne.

Jedoch mit den modernen Errungenschaften in der Meßtechnik, mit dem hohen Auflösungsvermögen, der Präzision der Meßgeräte, mit neuen Verfahren und mit komplexen Meßsystemen zu kombinierter, automatisierter Datenerfassung, Datenauswertung und Steuerung der Meßprozesse erlangt die experimentelle Mechanik wieder zunehmend an Bedeutung, wie auch in der Vergangenheit Messen und Prüfen, wie beispielhaft durch die Feststellungen zweier Kronzeugen der Technikgeschichte (Galilei, Helmholtz) belegt werden möge, als wichtige, **die** wichtigsten Instrumente des Ingenieurs angesehen wurden (Bild 1, Bild 2).

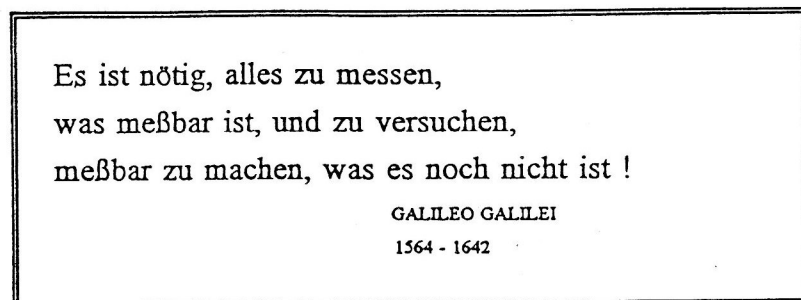


Bild 1

Zählen und Messen sind die Grundlagen der fruchtbarsten, sichersten und genauesten wissenschaftlichen Methoden, die wir überhaupt kennen.

HERMANN VON HELMHOLTZ
1821 - 1894

Bild 2

Heutzutage werden Meßtechniken und Verfahren der experimentellen Struktur- und Beanspruchungsanalyse in weitaus stärkerem Maße als je zuvor und mit zunehmender Tendenz in Forschungs- und Entwicklungslabors der Wissenschaft und der Industrie wie auch in den Produktionsbereichen der Industrie eingeführt, von Überwachungsinstitutionen und Versicherungsgesellschaften eingesetzt. Sie erlangen sogar größere Bedeutung gerade wegen der gesteigerten Nutzung neuer, verfeinerter numerischer Analysen und je weiter elektronische Daten- und Rechentechnik in die Meßverfahren integriert wird (Bild 3).

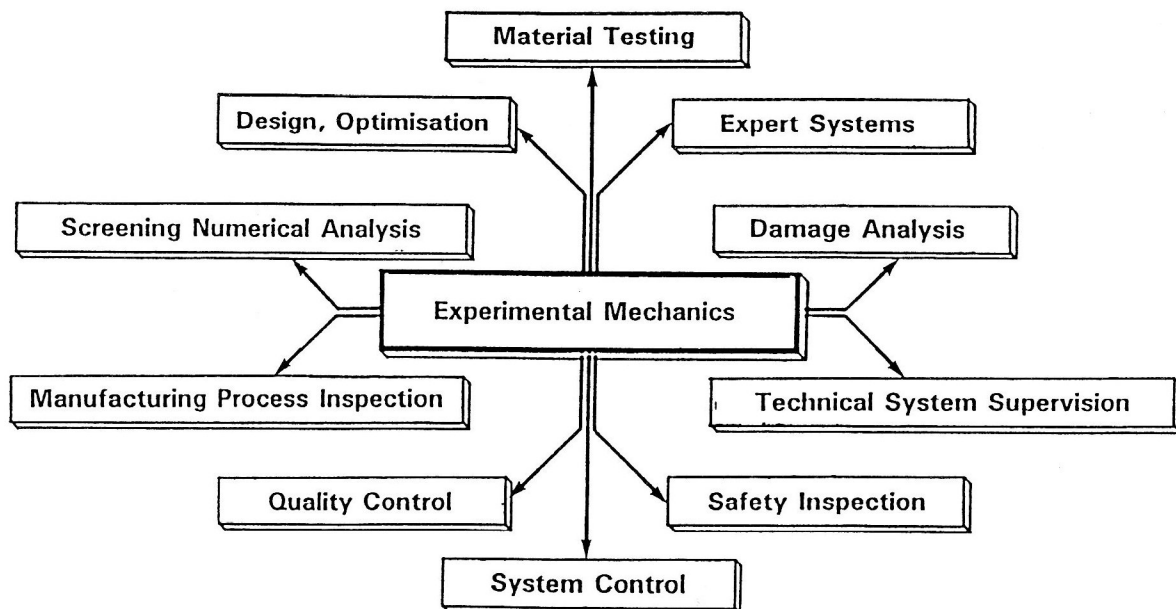


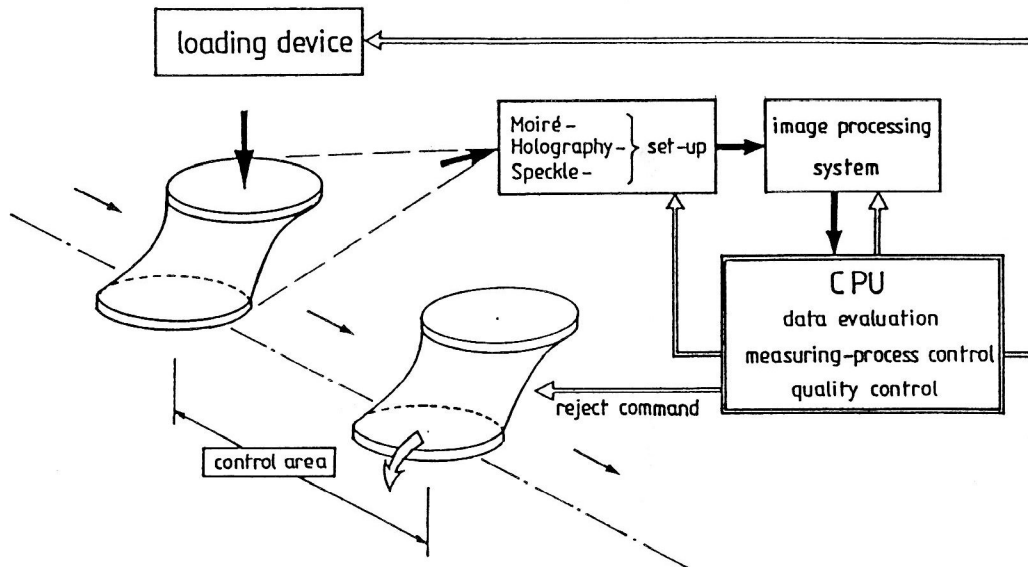
Bild 3

Neben statisch und dynamisch beanspruchten Strukturen, Stoßbelastungen und Wellen-Fortpflanzung, neben Stabilitäts-, Bruch- und Ermüdungsproblemen können nunmehr auch physikalisch und geometrisch *nicht-lineare Probleme* in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus kann der Einfluß von elastisch-plastischem, visko-elastischem, viskoplastischem wie auch anisotropem und inhomogenem Werkstoffverhalten einschließlich Verbundwerkstoffen auf den Beanspruchungszustand untersucht werden, für 2-D wie 3-D-Probleme gleichermaßen.

Methoden der experimentellen Festkörpermechanik werden nicht mehr länger nur eingesetzt, um in Materialtests das Verhalten der Werkstoffe zu ermitteln und um Verformungs- und Spannungszustände in Konstruktionen bzw. Konstruktionselementen vorherzusagen, sondern sie haben neue Funktionen zu erfüllen. Durch Experimente und Messungen sind theoretische Entwicklungen zu bestätigen, die Ergebnisse numerischer Analysen auf ihren Realitätsbezug hin zu überprüfen, weil solche Ergebnisse in besonderem Maße von der Gültigkeit der Annahmen und Voraussetzungen abhängen, die im allgemeinen erst die mathematische Formulierung komplexer Probleme ermöglichen.

Um die Qualität der Produkte zu verbessern und zu garantieren, werden Methoden der experimentellen Mechanik in zunehmendem Maße zur Überwachung und Kontrolle der Produktionsprozesse eingesetzt. Praktisch handhabbare und

verlässliche wie auch wirtschaftliche *Meß- und Prüfverfahren* werden heute seitens des produzierenden Gewerbes immer stärker nachgefragt; hier liegt eine Herausforderung zur wissenschaftlich-technischen Entwicklung solcher Verfahren, der Konzipierung entsprechender Gerätekonfigurationen und der zugehörigen Software. Dabei kommt der Automatisierung große wirtschaftliche Bedeutung zu (Bild 4).



Principle of Automatic NDT Quality Control by Optical Methods

Bild 4

Experimentelle Methoden werden heute weitgehend für *Schwingungsuntersuchungen* und zur *System-Identifikation* eingesetzt, um die dynamischen Antwortspektren komplexer Strukturen wie Automobile, Lastwagen, Schiffe, Flugzeuge usw. wie auch von ortsfesten Konstruktionen und Tragsystemen zu bestimmen. Meßtechnische Verfahren, auf den Prinzipien der experimentellen Festkörpermechanik beruhend, werden heute auch entwickelt und eingesetzt, um Maschinen und Industrieanlagen im Betriebszustand auf Zuverlässigkeit und Sicherheit gegen Versagen zu überwachen. Auch für das Monitoring, die Sicherheitsüberprüfung und Sicherheitsüberwachung von Konstruktionen der Infrastruktur wie Dämmen, Stauauern, Brücken, TV-Türmen, Silobauwerken, Großbehältern, Schornsteinen usw. werden zur Risikominimierung bei hohen Schadenspotentialen bei Verlust der Funktionstüchtigkeit oder Versagen und zur Feststellung der Restnutzungsdauer Meß- und Überwachungssysteme zunehmend entwickelt und installiert.

In Zukunft werden deshalb Verfahren der experimentellen Mechanik noch wesentlich an Bedeutung für das Risiko-Management erlangen. Weiterhin werden Meßtechniken zukünftig auch erforderlich werden, um *Expertensysteme* zu entwickeln. Denn die sogenannte "künstliche Intelligenz" erfordert als zwingende Voraussetzung für computerorientierte, automatisierte Entscheidungsprozesse die Verfügbarkeit einer enorm großen Menge an "Erfahrungen", d.h. an absolut verlässlichen Informationen. Deshalb kann die Entwicklung von Expertensystemen nur auf Daten basieren, deren Realitätsbezug ausschließlich durch Messungen verifiziert werden kann. Entsprechendes gilt auch für die Computer-Simulation. Um solche Simulationsmodelle zu entwerfen, ist deren Bezug zur Realität durch Messungen an realen Objekten zu prüfen, und es ist schließlich unverzichtbar, "Erfahrungen" einzuführen, d.h. zahlreiche Datensätze, die wiederum nur durch Messungen, also durch Experimente im weitesten Sinne, gewonnen werden können.

Die neueren Entwicklungen in den Methoden, in den Meßgeräten bis hin zu komplexen Meßsystemen, ermöglichen eine hochgenaue Auflösung der zu messenden Größen; gleichzeitig wachsen die Datenmengen, die aufgenommen werden und auszuwerten sind, rapide an. Deshalb sind in der modernen experimentellen Mechanik für die Datenaufnahme und die Datenauswertung wie aber auch für die Steuerung der Meßsysteme und des Meßprozesses selbst heute leistungsfähige Computer unerlässlich. Es muß in diesem Zusammenhang auch verdeutlicht werden, daß im allgemeinen die beobachteten Phänomene nicht identisch mit den letztendlich gewünschten Informationen sind. So werden in aller Regel in der Festkörpermechanik *absolute Verformungen* gemessen, aus denen dann mittels entsprechender Auswertelgorithmen *Dehnungen* und *Spannungen* berechnet werden müssen. Das bedeutet wiederum, daß in der modernen experimentellen *Beanspruchungsanalyse* geeignete Theorien und fortgeschrittene mathematische Modelle, die experimentellen Methoden selbst wie auch die zu analysierenden Vorgänge betreffend,

konzipiert werden müssen. Die in der Vergangenheit weitgehend geübte Praxis, Beobachtungen spekulativ zu deuten und in Beziehung zu den konservativen, stark vereinfachenden Ansätzen der klassischen Elastizitätstheorie zu setzen, wird den heutigen Anforderungen nicht mehr gerecht. Nur eine sinnvolle Verbindung von fortgeschrittenen mathematisch/ numerischen ("heuristischen") und experimentellen ("ikonischen") Methoden, sogenannte "hybride Methoden" ermöglichen eine immer notwendigerer wirklichkeitsnahe Modellierung von Festigkeitsproblemen unterschiedlichster Art.

Hier liegt noch ein wichtiges Feld für die wissenschaftliche Erforschung der theoretischen Grundlagen zur optimalen Nutzung der bereits heute verfügbaren Meßtechnik. Fest steht, daß schon derzeit viele Probleme in der technischen Mechanik mit den "hybriden Methoden" realistischer analysiert werden können (Bild 5).

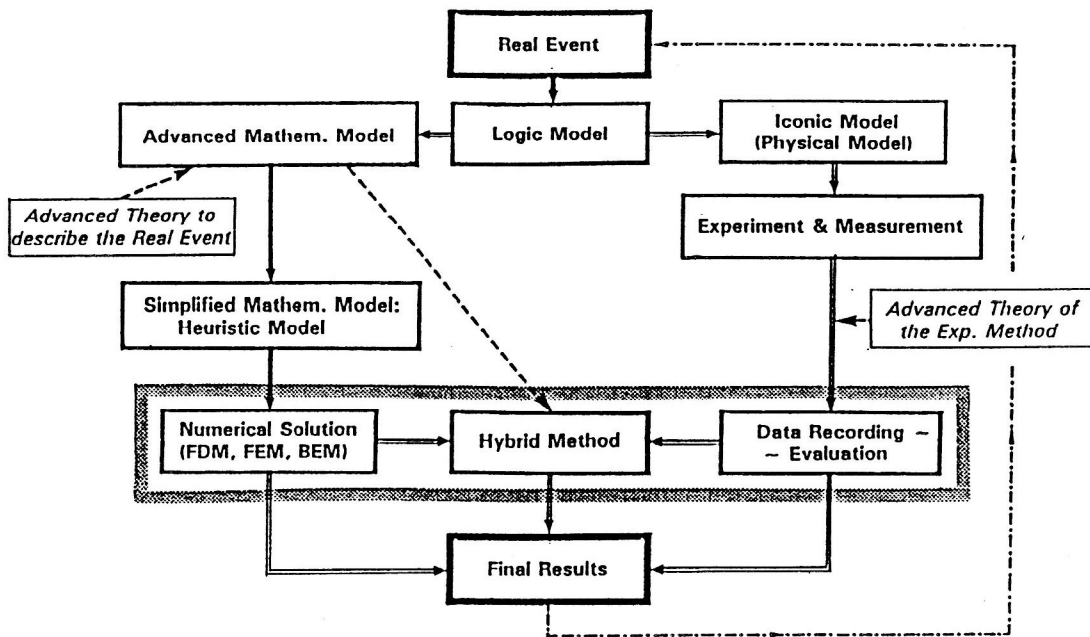


Bild 5

An einigen Beispielen möge das Prinzip der hybriden Technik demonstriert werden. Das erste Beispiel zeigt die Verbindung von spannungsoptischen Verfahren mit der Ranclement-Methode, um die Spannungsverteilung in einem Verbundquerschnitt zu ermitteln (Bild 6, Bild 7).

$${}^1\Omega \quad \sum_{i=1}^I [{}^iH] ({}^i u) = \sum_{i=1}^I [{}^iG] ({}^i q); \quad i \in [1/I] \quad (a)$$

$${}^i\Omega \quad [{}^iH] ({}^i u) = [{}^iG] ({}^i q); \quad i \in [2/I] \quad (b)$$

Contact conditions, constant along ${}^i\Gamma$, $i \neq 1$

$$({}^i u) = {}_i a ({}^i u), \quad ({}^i q) = {}_i b ({}^i q), \quad i \neq 1$$

from equ.(b) it follows

$$({}^i q) = \frac{{}_i a}{{}_i b} [{}^iG]^{-1} [{}^iH] ({}^i u), \quad i \neq 1$$

Bild 6

Value of the harmonic function S in point M
in domain ${}^1\Omega$

$${}^1S_M = \sum_{i=1}^I \{ ({}^1h_{Mv})^T \cdot ({}^1S) + ({}^1g_{Mv})^T \cdot ({}^1S_{,n}) \} + ({}^1h_{Mv}^{(m)})^T \cdot ({}^1S^{(m)}); \quad i \in [1/I]$$

in domain ${}^i\Omega$

$${}^iS_M = ({}^ih_{Mv})^T \cdot ({}^iS) + ({}^ig_{Mv})^T \cdot ({}^iS_{,n}); \quad i \in [2/I]$$

from photoelastic experiment

$${}^i\Delta_M = (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{i\hat{S}}{d} i\delta_M; \quad i \in [1/I]$$

$$\begin{aligned} 2^i\sigma_{1M} &= {}^iS_M + {}^i\Delta_M \\ 2^i\sigma_{2M} &= {}^iS_M - {}^i\Delta_M \end{aligned}$$

Bild 7

Das Blockdiagramm (Bild 8) verdeutlicht den Zusammenhang zwischen "ikonischer" und "heuristischer" Modellbildung.

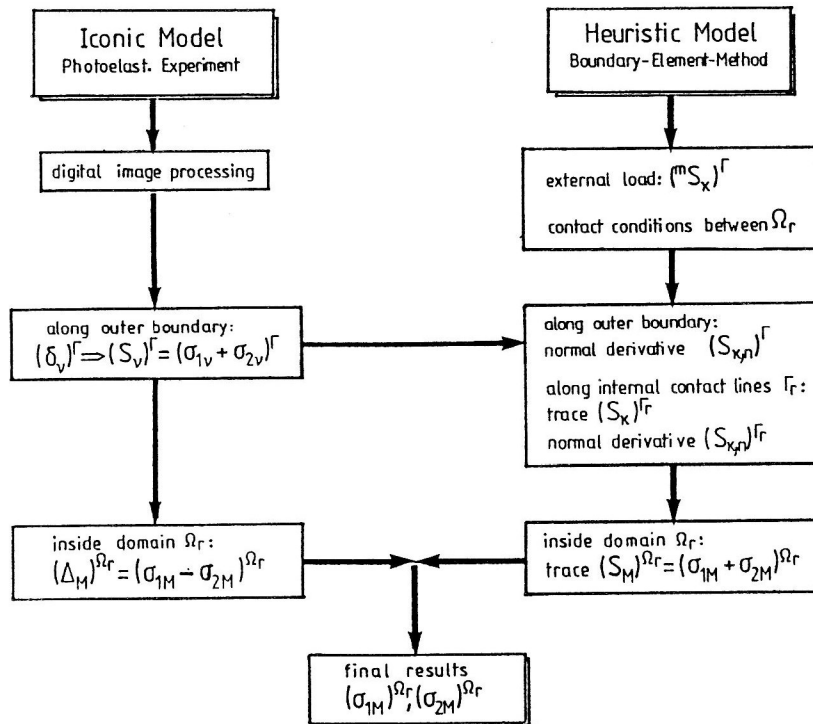


Bild 8

Im zweiten Beispiel wird der interne Verformungszustand eines dreidimensionalen Festkörpers mittels eines diskretisierten Randintegralverfahrens, verbunden mit einem Reduktionsalgorithmus, aus den mit der holografischen Interferometrie ermittelten Oberflächenverformungen berechnet. Dieses Verfahren kann auch zur Qualitätskontrolle in der industriellen Produktion eingesetzt werden (Bild 9 und 10).

MULTI-HOLOGRAM-ANALYSIS

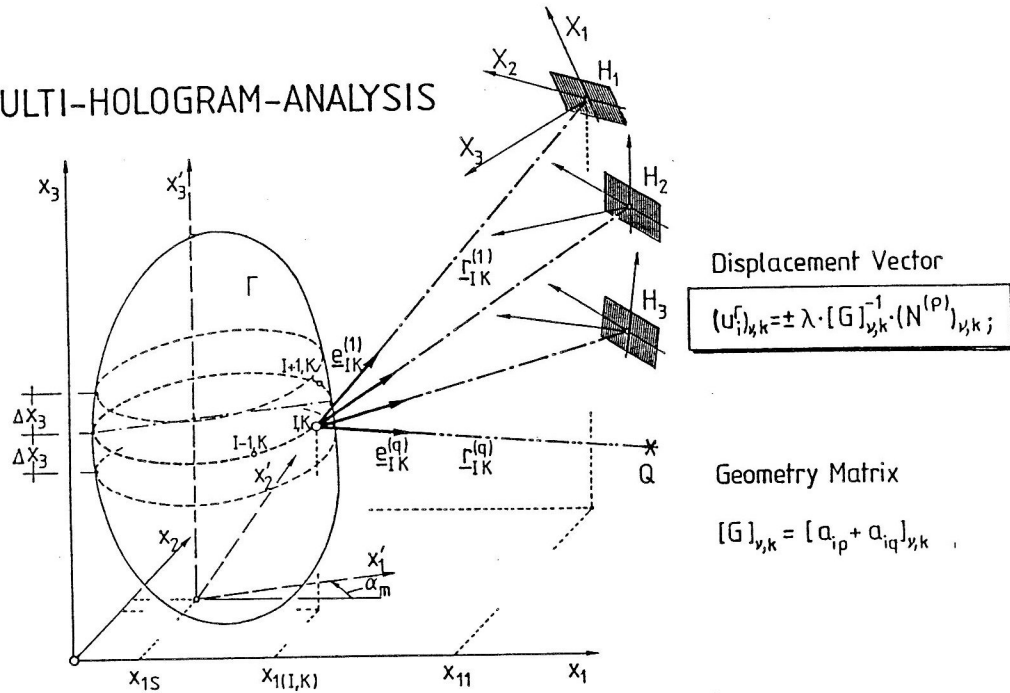


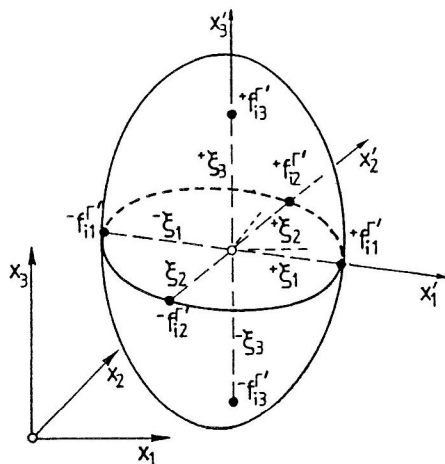
Bild 9

LAMÉ-NAVIER's diff. eq.

$$\nabla^2 [u_i + \frac{1}{2} \frac{1}{1-2\mu} (x_i \phi)] = \nabla^2 f_i = 0 \quad \phi \equiv u_{k,k}$$

$$u_i' [w_{jj} + m w_i] \approx w_j (\overset{+}{u}_{ij} h_k + \overset{-}{u}_{ij} h_k) \delta_{jk} + m w_i (\overset{+}{u}_{ii} h_i + \overset{-}{u}_{ii} h_i) + m (\overset{+}{u}_{ji,j} - \overset{-}{u}_{ji,j}) (1 - \delta_{ij}) / l_j$$

(not summing up over i)



$$w_j := [|\overset{+}{\xi}_j| + |\overset{-}{\xi}_j|]^{-1}$$

$$\overset{\pm}{h}_j := \overset{\pm}{f} \xi_j \cdot l_j^{-1}, \quad l_j := |\overset{+}{\xi}_j| + |\overset{-}{\xi}_j|$$

$$m = \frac{1}{2} \frac{1}{1-2\mu}$$

$$u_k(p_0) = \sum_{\nu} [a_{k\nu}] \cdot (K'_{\nu}) \cdot (\sum_{\nu} W_{\nu})^{-1}$$

Bild 10

Schließlich sei noch auf die Bedeutung der experimentellen Beanspruchungs- und Strukturanalyse für das Monitoring und die Überwachung von Großkonstruktionen hingewiesen (Bild 11 und 12).

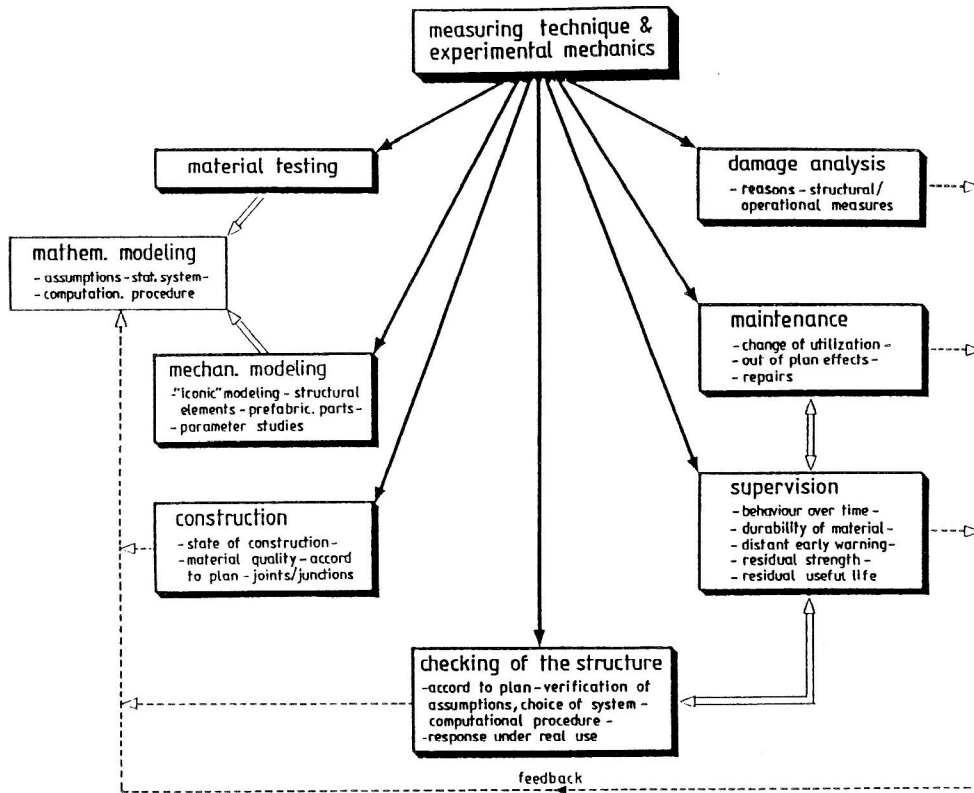


Bild 11

Remote Supervising System

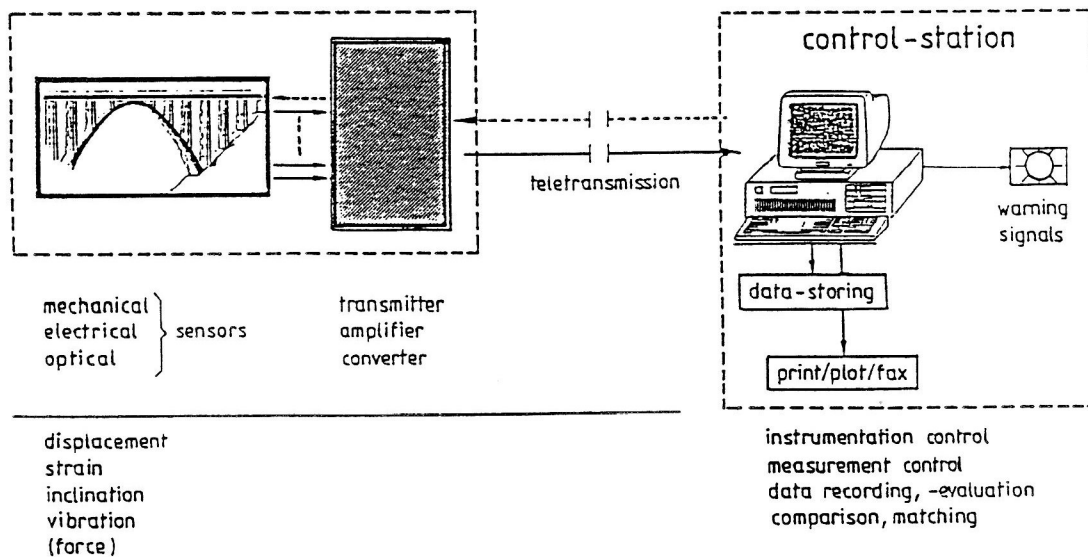


Bild 12

Um Aussagen über die Sicherheit gegen Versagen und die Lebensdauer bzw. Restnutzungsdauer treffen zu können, genügt es nicht, lediglich Verformungen und deren Änderungen über die Nutzungszeit zu beobachten, sondern es müssen auch Verfahren entwickelt werden, um aus diesen gemessenen Daten Informationen über die Änderungen im Materialverhalten zu gewinnen (Bild 13).

Auswertung der Meßwerte

2. $f = f(t)$ Änderung der Materialfestigkeit über die Zeit

$$v + \int_{t_0}^{t_n} \frac{dv}{dt} dt = \left(f + \int_{t_0}^{t_n} \frac{df}{dt} dt \right) \cdot \left(S + \int_{t_0}^{t_n} \frac{dS}{dt} dt \right)$$

diskretisiert, im Intervall t_i/t_{i+1} : $\underline{f}(t_{i+1}) = \underline{f}(t_i) + \Delta \underline{f}(t_i)$; $\underline{S}(t_{i+1}) = \underline{S}(t_i) + \Delta \underline{S}(t_i)$

$$\Delta \underline{v}(t_i) = \Delta \underline{f}(t_i) \cdot \underline{S}(t_i) + \underline{f}(t_{i+1}) \cdot \Delta \underline{S}(t_i)$$

2.1 Stat. best. Systeme

$$\Delta \underline{S}_i = 0 : \boxed{\Delta \underline{v}_i = \Delta \underline{f}_i \cdot \underline{S}_i} \Rightarrow \Delta f_\sigma = \frac{\Delta v_{\sigma \text{ gen}}}{S_{0\sigma}}$$

2.2 Stat. unbestimmte Systeme

$$\Delta \underline{S}(t_i) = \underline{S}(t_{i+1}) - \underline{S}(t_i) = (\underline{K}(t_{i+1}) - \underline{K}(t_i)) \underline{P}; \quad \underline{K}(t_i) = \underline{K}_0 - \underline{K}_1 (\underline{K}_1^T \underline{f}(t_i) \underline{K}_1)^{-1} \cdot (\underline{K}_1^T \underline{f}(t_i) \underline{K}_0)$$

$$\boxed{\Delta \underline{v}(t_i) = [\Delta \underline{f}(t_i) \cdot \underline{K}(t_i) + (\underline{f}(t_i) + \Delta \underline{f}(t_i)) \cdot (\underline{K}(t_{i+1}) - \underline{K}(t_i))] \underline{P}} \Rightarrow \text{S nichtlineare Gleichungen in } \Delta f_\sigma(t_i)$$

$$\Rightarrow \Delta \underline{f}(t_i) \Rightarrow \Delta \underline{S}(t_i) \underline{S}(t_{i+1})$$

Bild 13

Die Nutzungsmöglichkeiten der "hybriden Methoden" setzen die Verfügbarkeit von Meß- und On-line-Prozeß-Systemen voraus. So sind z.B. Vielstellen-Meßanlagen auf hohem technischem Niveau heute verfügbar, nicht nur für die Datenerfassung und -verarbeitung, sondern auch für die weitgehend automatisierten, *vom Rechner kontrollierten und gesteuerten Versuchsabläufe*, also für die gesamten Meß- und Auswertprozesse. Ein solches Meßsystem besteht jedoch nicht nur aus der Hardware, der Gerätetechnik, sondern umfaßt auch die Software, das sind die Algorithmen und die daraus entwickelten Computerprogramme für die Prozeßsteuerung, die Übertragung, die Konvertierung und Auswertung der Eingangssignale bis zu den endgültigen Ergebnissen. So muß heute festgestellt werden, daß eine geeignete Software im umfassenden Sinne von wachsender Bedeutung ist und die operationellen Möglichkeiten des gesamten Meßsystems in starkem Maße von dieser abhängen. Mechanische Größen wie Verformungen, Dehnungen und Temperatur werden als elektrische Signale an einigen hundert Meßstellen in Millisekunden aufgenommen, die Eingangssignale verstärkt, in digitale Signale umgewandelt und im Rechner gespeichert. Hier stehen sie für die weitere Evaluierung wie auch, wenn notwendig, für einen späteren Rückruf zur Verfügung, denn alle Meßdaten wie auch die übrigen, für den Meßvorgang relevanten Daten sollten zu jeder Zeit während der gesamten Untersuchung akkurat reproduzierbar sein.

Komplexe Gerätekonfigurationen sind in den letzten Jahren auch entwickelt worden, um *optische Informationen* direkt durch einen Rechner zu erfassen und auszuwerten. TV-Kameras mit hohem Auflösungsvermögen und CCDs stehen zur Verfügung, um z.B. Interferenzlinienfelder zu erfassen, wie sie mittels der Spannungsoptik, der Moiré-Technik, der holografischen Interferometrie oder anderer interferometrischer Verfahren entstehen. Die Verfahren der automatischen, digitalen Bildauswertung haben inzwischen weitgehend Eingang gefunden in der experimentellen Mechanik und insbesondere den optischen Methoden zu einer Renaissance in wissenschaftlicher Anwendung und in der industriellen Praxis verholfen (Bild 14).

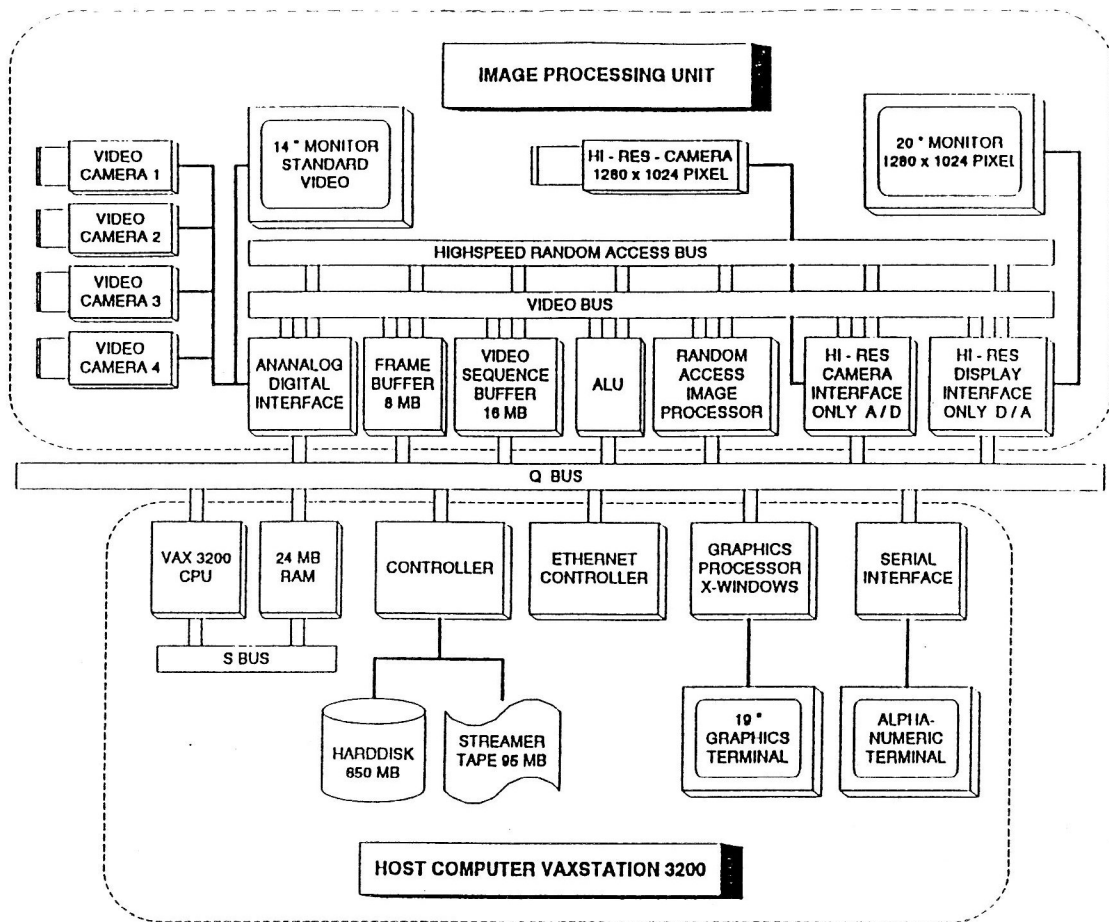
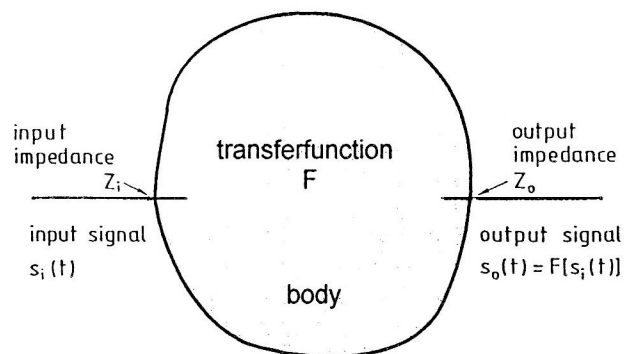


Bild 14

Es ist nun von substantieller Bedeutung, daß solche Meßsysteme nicht insgesamt als eine "black box" betrachtet werden. Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der endgültigen Ergebnisse von Messung und Auswertung zu garantieren, müssen die Beziehungen zwischen den originären Input-Signalen und den Output-Signalen, d.h. muß der Energiefluß im System, bekannt sein. Die realen Transferfunktionen, die Impedanzen und die Signal-Rausch-Verhältnisse, wie auch die Meßbereiche der einzelnen Geräte in einer solchen Meßkette wie deren Relationen zueinander, müssen sehr sorgfältig verfolgt werden. Dies ist notwendig, um unkontrollierte Veränderungen oder Störungen der ursprünglichen Eingangssignale zu vermeiden. Es ist extrem wichtig, den Ablauf der Signalübertragung sorgfältig Schritt für Schritt zu verfolgen (Bild 15 und 16).



$$\text{operational transfer function } F = \frac{S_o(t)}{S_i(t)} = \frac{b_m D^m + \dots + b_1 D + b_0}{a_n D^n + \dots + a_1 D + a_0}$$

$$\text{operator } D^p := \frac{d^p s}{dt^p}$$

(acc. J. T. Pindera)

Bild 15

System Transfer Function

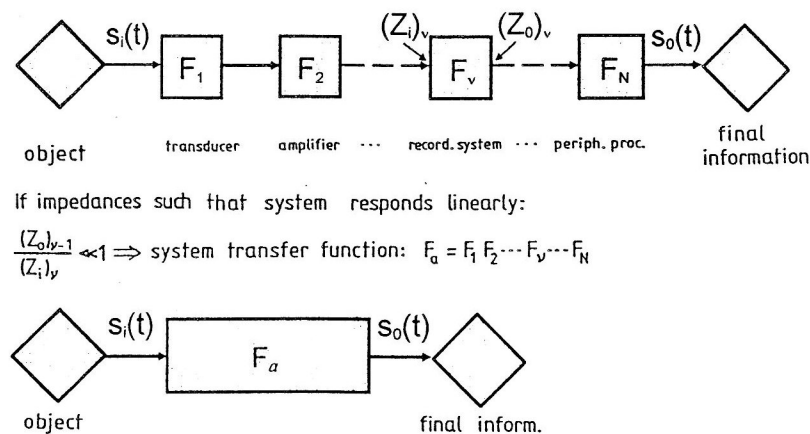


Bild 16

Mancher mag nun der Meinung sein, daß die jüngsten und wahrscheinlich zukünftig noch zu erwartenden Entwicklungen in der Meßtechnik und in den experimentellen Analyseverfahren, mithin die Tendenz zu immer komplizierteren Meßsystemen sich kaum für die industrielle Praxis eignen würden; mancher mag befürchten, daß sich solche sophistischen Konzeptionen, solche mehr oder weniger "akademischen Orchideen" von den Erfordernissen der Praxis entfernen könnten. Nun, diese Gefahr existiert tatsächlich, dies ist nicht zu leugnen. Aber es ist eine Herausforderung für alle, die sich mit der experimentellen Mechanik befassen: Sie müssen sich intensiv darum bemühen, neue wissenschaftliche Erkenntnisse und neue experimentelle Verfahren für die praktische Nutzung leicht handhabbar zu machen, sonst ist ihr Wissen nutzlos und überflüssig. Deshalb müssen Wissenschaftler und Forscher eng zusammenarbeiten mit den Praktikern in den verschiedenen Bereichen, in denen mit Hilfe der experimentellen Mechanik praktische Probleme gelöst werden sollen. Dies schließt die Forderung ein, die Ausbildung in theoretischer wie in praktischer Hinsicht zu verstärken. Es ist bedauerlich, daß die Ausbildung in der experimentellen Mechanik trotz deren wachsender Bedeutung vor allem in europäischen Ländern immer noch unterentwickelt ist. Die Meßtechnik und die Verfahren der experimentellen Mechanik müssen entsprechend ihrer wachsenden Bedeutung dringend in den Curricula für die Ingenieurausbildung verankert werden.

Wie in nur wenigen Bereichen der Wissenschaft wird in der heutigen modernen experimentellen Mechanik ein breites Spektrum von Fachwissen verlangt. Neben der theoretischen Mechanik ist die Beherrschung der physikalischen Grundlagen der verschiedenen Meßverfahren, der Datenerfassung, Datenanalyse, Datenauswertung, der dazu erforderlichen Kenntnisse in numerischer Mathematik und der Informatik bis hin zu den Methoden der Fuzzy Logic vorauszusetzen, also ein hohes Maß an Interdisziplinarität gefordert.

Meine Damen und Herren,

ich hoffe, es möge mir gelungen sein, zumindest einen Eindruck von der Bedeutung und den Perspektiven der experimentellen Mechanik - oder richtiger gesagt - der experimentellen Beanspruchungs- und Strukturanalyse für Forschung, Entwicklung und Praxis sowie ihren Möglichkeiten aufgrund ihres hohen Entwicklungsstandes zu vermitteln.

Schließlich möchte ich der Fachrichtung Angewandte Mechanik und dem Institut für Mechanik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg herzlich gratulieren für 40 Jahre international hoch anerkannte Leistungen, Glückwunsch an alle diejenigen, die in diesen vier Jahrzehnten mit ihrer wissenschaftlichen Kompetenz maßgeblich zu den bisherigen Erfolgen beigetragen haben. Ich wünsche ein weiterhin erfolgreiches wie ertragreiches Wirken auf hohem wissenschaftlichem Niveau in Lehre und Forschung.

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