Theme VIb: Model study for design

Objekttyp: **Group**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht**

Band (Jahr): **9 (1972)**

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

VIb

Modellversuche im Hinblick auf die Bemessung

Structural Models and Design

Essai sur modèles comme instrument de dimensionnement

HEINZ HOSSDORF
dipl. Ing. ETH
Basel, Schweiz

Schwerpunkt

Auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens war es im letzten Jahrzehnt um den Modellversuch als Mittel zur Bemessung etwas still geworden. Wenn auch verschiedene Institute die Entwicklung der Modellstatik weitergetrieben haben, so beeindruckt doch die Anzahl, vor allem kleinerer Privatlaboratorien, welche ihre Tätigkeit während dieser Zeitspanne völlig eingestellt haben. Die Gründe für diese relative Abwertung experimenteller Verfahren sind denn auch klar erkennbar:

Die Modellversuchstechnik war, von einigen wenigen Spezialanwendungsgebieten abgesehen, nirgends zu einem für den entwerfenden Ingenieur leicht und kurzfristig zugänglichen System entwickelt worden. Die Versuchsverfahren waren umständlich und improvisiert, die Messtechnik aus apparativen oder personellen Gründen oft unzuverlässig und die Deutung der Ergebnisse in der Folge vielfach unbefriedigend. Es hat sich daher unter Bauingenieuren die bis anhin begründete Gewohnheit eingebürgert, auf den Modellversuch nur in ausgesprochenen Notfällen zurückzugreifen. Man zog vor, so lange als immer möglich mit theoretischen, wenn auch oft gröblich vereinfachenden Modellvorstellungen zur Beurteilung des Tragverhaltens einer Struktur auszukommen.

In Anbetracht der bekannten Schwächen der Modellstatik war es nur natürlich, wenn der Ingenieur, unter dem Eindruck der neuen, scheinbar unbegrenzten Zukunftsmöglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung, seine unbegrenzten Hoffnungen auf den Computer setzte und sich in der Folge von den experimentellen Methoden für die Bemessung noch weiter abwandte.

Es ist Hauptanliegen dieses Beitrages aufzuzeigen, dass diese Situation heute einem grundlegenden Wandel unterworfen ist.

Der ursprüngliche Wunderglaube an den Computer macht, da sich dessen Leistungsfähigkeit als Rechengerät für den Ingenieur heute übersehen lässt, einer nüchternen Beurteilung Platz, welche hier kurz zusammengefasst sei:

Der Ingenieur hat mit dem Computer tatsächlich ein neues, mächtiges Werkzeug zur Berechnung von Tragwerken in die Hand bekommen. Aufgaben aus dem für die Praxis so überaus wichtigen Gebiet der elastischen Stabstatik werden durch ihn beinahe ohne Einschränkung mit, gegenüber früher, unvergleichlicher Leichtigkeit bewältigt. Die auf das elektronische Rechnen zugeschnittene Methode der Finiten Elemente hat bis anhin numerisch nicht erfassbare statische und dynamische Probleme aus dem Bereich der Flächentragwerke und der räumlichen, elastischen Körper der Berechnung zugänglich gemacht. Zudem bestehen eine Reihe von schönen Ansätzen zur Beschreibung von nicht-linearen oder elasto-plastischen Vorgängen. Der Computer ist daher auf einigen klar umrissenen Gebieten zu einem selbstverständlichen Hilfsmittel des Praktikers für die Lösung baustatischer Probleme geworden.

Ebensogut wie sich der Erfolg des Computereinsatzes auf dem Gebiet der Baustatik beurteilen und weitgehend überblicken lässt, ist heute auch die tatsächliche, quantitative Begrenzung der Fähigkeiten dieser Rechengeräte sowie die mutmassliche Entwicklungsrichtung der elektronischen Datenverarbeitung genügend klar erkennbar, um feststellen zu dürfen, dass dem weiteren Vordringen der Computerstatik, gemessen an den in sie gesetzten Hoffnungen, äus-

serst enge Grenzen gesetzt sind.

Ohne hier auf die an sich sehr verwickelten Einzelheiten der Problematik grosser Computersysteme eingehen zu wollen, sei nur erwähnt, dass diese Schwierigkeit vor allem mit der in allen modernen numerischen Methoden der Baustatik notwendigen Operation der Matrizeninversion selbst und der bei der Berechnung grosser Gleichungssysteme auftretenden numerischen Instabilitäten zu tun hat. Die Rechenzeit steigt mindestens mit der dritten Potenz der Anzahl von Unbekannten. Aehnlich verhält es sich mit der erforderlichen Grösse der Rechenanlage. Es gibt keine Anzeichen dafür, dass kommende Computergenerationen diese grundlegende Schwierigkeit überwinden werden.

Die Computerstatik wird sich daher in einer voraussehbaren Zukunft darauf beschränken müssen, die Berechnungsmethoden auf den schon eroberten Gebieten (Stabstatik, Flächentragwerksstatik angewandt auf relativ einfache Geometrien etc.) zu verfeinern, und für den Ingenieur leichter zugänglich zu machen. Denn auch die Verfahren des In- und Outputs lassen bei schwierigen Programmen noch vieles zu wünschen übrig.

Ganz anders steht es auf dem Gebiet der Modellstatik. Sie ist auf bestem Wege, durch sinnvolle Integration der elektronischen Rechenmaschinen als Prozessrechner in den Versuchsablauf, ihre herkömmliche Schwerfälligkeit zu überwinden und durch Einsatz moderner Messtechnik die Zuverlässigkeit der experimentell erfassten Daten bis zur Perfektion zu steigern. Die mit mühsamen Rechengängen verbundene Umdeutung der Messwerte in die den Ingenieur interessierenden Aussagen wird vom Computer spielend bewältigt.

Die Modellstatik wird durch diesen Wandel endlich aus einer überwiegend handwerklichen Technik heraus zu einer neuen Art selbständigen Berechnungssystems entwickelt, in welchem das Modell, als das die Lösung tragende Analogon, über die Messtechnik mit dem Computer in direkter Verbindung steht. Dieses neue Konzept ermöglicht nicht nur die Simulation beliebig vieler und vielartiger Lastfälle

und Randbedingungen sowie die Erfassung einer unbegrenzten Anzahl von zuverlässigen Messwerten in kürzester Zeit, sondern sie eröffnet zudem auch von der Theorie her bisher unbeschrittene, wesentlich elegantere Wege zur Behandlung baustatischer Probleme.

Wegen dieses Wesensunterschiedes der neuen, auf dem Experiment beruhenden Bemessungsverfahren drängt es sich auf, sie durch einen neuen Begriff, die Hybridstatik, von der klassischen Modellstatik zu unterscheiden.

Da das Modell die Lösung des elastischen Problems selbst beinhaltet, ist der Computer nicht mit dem für seine innere Struktur widernatürlichen Problem ausgedehnter Matrizeninversionen belastet. Die Hybridstatik ist daher, bei sinnvoller Arbeitsteilung zwischen Modell und Computer in der Lage, jede noch so verwickelte Aufgabe mit vernünftigem Aufwand kurzfristig und exakt zu lösen. Es wäre wünschenswert, wenn diesem neuen Durchbruch der Modellstatik als mächtiges Mittel zur Bemessung des Schwergewichtes Beiträge aus der Praxis gewidmet würden. Es ist das Denken in Systemen, welches erlauben wird, in Zukunft ganz allgemein weit mehr und sinnvollere Aussagen aus dem Experiment zu gewinnen als bis anhin. Die Erkenntnis, dass die Zukunft experimenteller Verfahren in der Symbiose mit dem elektronischen Computer liegt, hat auch eine neue Bewertung der Messverfahren zur Folge, da nur Methoden, welche erlauben, die mechanische Information in Form elektrischer Signale darzustellen, in die Hybridstatik integriert werden können.

Die bleibenden Aufgaben der Modellstatik

Im Gegensatz zur analytischen Baustatik, wo das Gesamtverhalten eines Tragwerkes durch mathematische Verknüpfung (Integration der Differentialgleichung) einer Modellvorstellung über das örtliche Materialverhalten ermittelt wird, besteht die Aufgabe der Modellstatik darin, das physikalische Modell, welches das Verhalten des Tragwerkes als Kontinuum simuliert und damit die Lösung des gestellten Problems a priori enthält, durch geschickte Versuchsver-

fahren unter möglichst vielfältigen Belastungsbedingungen über sein Verhalten auszufragen und die gemessenen Wirkungen in für den Ingenieur brauchbarer Form darzustellen.

Der Aufgabenbereich der Modellstatik lässt sich daher in drei bleibende Hauptgebiete aufteilen, auf welchen allen noch grosse Entwicklungsarbeit zu leisten ist:

1. Die Problematik des Modelles als Analogon selbst d.h. die Erfüllung der von den Aehnlichkeitsgesetzen geforderten Bedingungen an die physikalischen Eigenschaften des Modelles.

2. Die Versuchs- und Messtechnik, welche erlaubt, allgemeine Lastfälle und Lastarten, also Ursachen zu erzeugen und die Wirkung durch Messung zu erfassen.

3. Die sinnvolle Deutung der gemessenen Grössen, d.h. deren Umrechnung in für den entwerfenden Ingenieur sinnvolle Aussagen, aufgrund welcher er in die Lage versetzt wird, seinen Prototyp richtig zu bemessen.

Das physikalische Modell als Analogon

Die Anforderungen, welche an die physikalischen Eigenschaften des Modelles zur Simulierung des Tragverhaltens des Prototyps gestellt werden müssen, sind durch die Aehnlichkeitsgesetze der Mechanik determiniert. Die gleichzeitige Erfüllung aller denkbarer Aehnlichkeitsbedingungen ist technisch nicht möglich und in vielen Fällen auch nicht erforderlich. Man beschränkt sich daher darauf, je nach Versuchsart und Zielsetzung des Modellversuches verschiedene Gruppen von Modellbedingungen einzuhalten. Bei allen im folgenden aufgeführten Beispielen wird geometrische Aehnlichkeit des Modelles zum Prototyp vorausgesetzt, eine Bedingung, deren Erfüllung nur in unwesentlichen Ausnahmefällen umgangen werden kann.

Versuchstyp	Aehnlichkeitsbedingung
- Statische Modelle	
Elastische Modelle im linearen Kraftdeformationsbereich	Hooke'sches Gesetz Poisson'sche Zahl
Elastische Modelle im nichtlinearen Kraftdeformationsbereich	zusätzlich: Aehnlichkeit der Verformung
Plasto-elastische Modelle, Bruchmodelle	zusätzlich: Aehnlichkeit der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie
Verbundmaterialien (z.B. bewehrter Mikrobeton)	relative Aehnlichkeit zwischen den Eigenschaften der Verbundmaterialien Aehnlichkeit der Verbundwirkung
- Dynamische und Hydro- oder Aeroelastische Modelle Die Modelle für diese Versuchsarten entsprechen einem der oben aufgeführten Typen für statische Versuche und müssen (oder sollten) je nach Zielsetzung des Versuches zusätzliche Aehnlichkeitsbedingungen erfüllen, welche beispielsweise sein können:	Bedingung an die Materialdichte Druckkoeffizient Reinold'sche Zahl Froud'sche Zahl Strouhal Zahl Mach'sche Zahl etc.

Die gleichzeitige Erfüllung von mehreren Aehnlichkeitsbedingungen stösst oft auf grosse technische Schwierigkeiten und ist in anderen Fällen gar nicht erreichbar. Viel Erfindungsgabe wurde auf die Entwicklung von exakten Simulationsmodellen aufgewendet und es ist zu erwarten, dass zu diesem Thema am Kongress wertvolle technische Lösungen beigetragen werden.

Wandel in Versuchs- und Messtechnik

Die Versuchstechnik hat die Aufgabe, Wirkungen auf dem Modell zu verursachen, d.h. allgemeine Lastfälle zu erzeugen, seien dies

nun Belastungen durch äussere oder innere Kräfte (wie z.B. Temperatur), oder Verschiebungen. Die Messtechnik ermöglicht die quantitative Erfassung der Wirkung der Lastfälle auf das Modell, die Registrierung von statischen oder dynamischen Deformationen und Kräften.

Im letzten Dezenium hat die elektronische Messtechnik eine ähnlich spektakuläre Entwicklung wie der elektronische Computer durchgemacht. Mechanisch-elektrische Wandler (Messaufnehmer), welche die Erfassung aller interessierenden mechanischen Wirkungen mit hoher Präzision und in kürzester Zeit in Form eines elektrischen Signals gestatten, sind heute überall erhältlich.

Messabfrageeinrichtungen erlauben das rasche Umschalten von Messstelle zu Messstelle.

Der entscheidenste Durchbruch auf dem Gebiet der Messtechnik, der die gesamten Versuchsverfahren der Zukunft, nicht nur der Modellstatik, in Kürze grundlegend wandeln wird, basiert auf der Entwicklung der Analog-Digital-Converter, welche es ermöglichen, einem Computer die gemessenen analogen Messwerte ohne Umwege in digitaler Form zuzuführen. Diese Voraussetzung erlaubt dem Computer, in direkte Konversation mit der physikalischen Umwelt zu treten.

Nach seiner inneren elektronischen Struktur ist die natürlichste Tätigkeit des Computers, logische Entscheide zu treffen, Boole' sche Algebra zu betreiben. Diese Eigenschaft zusammen mit der Möglichkeit der Analog-Digital-Wandlung prädestiniert den Computer zum zentralen Organ für die Steuerung und Regelung von Prozessen. Auf die Technik des Modellversuches angewendet, bedeutet dies, dass der Versuchsablauf, das Erzeugen der Belastung und das Abfragen der Messwerte vom Computer gesteuert vollautomatisch erfolgen kann. Diese Möglichkeit bringt nun gegenüber der üblichen halbmanuellen Messtechnik einen entscheidenden, in seiner Tragweite erst abschätzbaren Fortschritt:

- Der Versuchsablauf wird unvergleichlich viel flexibler:

Auswahl der Belastungsart und der Belastungsabläufe, sowie die Abfragung der Messwerte erfolgt durch den Computer. Der gesamte Prozess des Versuchsablaufes wird daher programmierbar. Die zeitliche und örtliche Folge von Belastung und Messung wird vollkommen frei wählbar und ist nicht mehr an starre Geräteeinstellungen gebunden. Der exakte Zeitpunkt für jede Messung kann vorher bestimmt werden. Zudem kann der Versuchsablauf durch erfasste Messergebnisse geregelt werden (z.B. Feststellung der Ueberschreitung von Messbereichen und automatische Aenderung der Geräteeinstellung, Alarm bei Auftreten irgendwelcher Störeffekte mit sofortiger Diagnose der Ursache etc.)

- Die Messungen werden exakter und zuverlässiger:
  Durch die automatische Registrierung und die direkte Weiterverarbeitung der Messdaten durch den Computer wird der menschliche Irrtum ausgeschalten. Von der höheren Präzision moderner analoger Messgeräte abgesehen, wird die Genauigkeit der Messung durch die Automation zusätzlich entscheidend durch die Möglichkeit, den Zeitpunkt der Messung auf Bruchteile von Tausendstel Sekunden genau zu wählen, gesteigert. Zudem können auf Wunsch Messungen zu gewählten Zeitpunkten beliebig oft wiederholt werden und die Daten durch vom Computer durchgeführte statistische Ueberlegungen gereinigt werden. Automatische Eichmessungen werden in den Messprozess eingebaut.

- Der Versuchsablauf erfolgt unvergleichbar schneller:
  Die Mess- und Registrierabläufe erfolgen über den Prozessrechner mit geeigneter Peripherie (z.B. Magnetband, Discs etc.) in der Grössenordnung von tausendmal schneller, wie bei einer Handablesung.
  Die Steuerung und Regelung des Ablaufes entbindet den Menschen von langwierigen und langweiligen Eingriffen in den Versuchsablauf. Die notwendigen Steuerentscheide werden vom Computer zuverlässig innert Sekundenbruchteilen getroffen.

- Bessere und einfachere Lasterzeuger und Messaufnehmer können in weit grösserer Anzahl eingesetzt werden:

Früher hing die Präzision von Messergebnissen einzig von der Genauigkeit der Messaufnehmer selbst und den Eigenschaften der Messverstärker ab. Man verlangte aus Gründen der Einfachheit für die Auswertung eine temperaturstabile, lineare Kennlinie zwischen mechanischen und elektrischen Effekten. Diese Forderung zwang zum Bau von teuren Präzisionsinstrumenten. Im Messkreis, in welchem on-line ein Computer eingeschaltet ist, kann jedoch ein grosser Teil der Eicharbeit dem Rechengerät überbunden werden. Vom Analogteil der Messkette wird dann nur noch eine mechanisch-elektrische Kennlinie gefordert, welche reproduzierbar ist. Jedem einzelnen Messaufnehmer zugeordnete, einmal bestimmte Eichwerte erlauben dem Computer, die anfallenden Messignale in die gesuchten mechanischen Grössen umzurechnen.
Die Erkenntnis, dass der Einsatz des Computers als Prozessrechner ganz allgemein eine Entmaterialisierung der Versuchstechnik ermöglicht, ist für die Weiterentwicklung neuer Versuchssysteme von entscheidender Bedeutung. Versuchseinrichtungen und Messaufnehmer, welche nur in Verbindung mit dem Computer Ergebnisse höchster Präzision liefern, können mit einem Bruchteil der bisherigen Kosten hergestellt werden. Dies ermöglicht in der Zukunft den Bau sehr vielfältig einsetzbarer Belastungseinrichtungen und den wirtschaftlichen Einsatz einer stark gesteigerten Anzahl von Messaufnehmern.

Die Weiterverarbeitung der einmal gewonnenen Messdaten zu Aussagen, welche den Ingenieur für die Bemessung seines Tragwerkes interessieren (Uebertragung der am Modell ermittelten Werte auf den Prototyp, Berechnung von Schnittkräften, analytische Simulierung von Lastfällen etc.) kann in einfachen Fällen on-line erfolgen. D.h. gesuchte Ergebnisse liegen nach Abschluss des Versuches schon in der gewünschten Form vor. In den meisten Fällen wird jedoch die endgültige Auswertung der Messdaten auf dem Computer in einem zweiten Arbeitsgang erfolgen. Wesentlich scheint die Erfüllung der folgenden Forderung an die Modellstatik der Zukunft:
Die neue Versuchs- und Messtechnik erlaubt die wirtschaftliche Erfassung und Registrierung einer beinahe unbegrenzten Menge von Information allgemeiner Art über das untersuchte Tragwerk. Nach Ab-

schluss des einen Versuchsablaufes hat das physikalische Modell ausgedient. Alle weiteren Simulationen erfolgen nur noch analytisch auf dem Computer. Hier wird die eigentliche Ingenieurarbeit geleistet.
Diese Philosophie der Trennung des analogen, an das physikalische Modell und die Versuchseinrichtungen gebundenen Teilprozesses vom Auswertungsprozess bringt entscheidende Vorteile:

- Das Modell kann nach kurzer Verwendung abgebaut werden und die Versuchseinrichtungen stehen für die experimentelle Analyse eines weiteren Modelles zur Verfügung.

- Die allgemeine Information kann, auf einem geeigneten Datenträger gespeichert, beliebig lange Zeit archiviert werden, so dass jederzeit weitere Simulationen mit den vorhandenen Daten durchgespielt werden können. (Beispiele: Aenderung der Auflagerbedingungen, Nachvollziehen einer Erdbebensimulation, Berechnung der bei einem Belastungsversuch zu erwartenden Beanspruchungen an einem Brückenbauwerk etc.)

- Ein weiterer wesentlicher Vorteil in der Trennung von Informationserfassung und ingenieurmässiger Simulation auf dem Computer besteht in der Erleichterung der Telekommunikation zwischen Versuchslaboratorium und entwerfendem Ingenieur. Die neue Versuchstechnik kann nur von hochspezialisierten Instituten mit dem entsprechend ausgebildeten Personal beherrscht werden. Die Ingenieure der Praxis sind daher einerseits auf eine gute Zusammenarbeit mit diesen Institutionen angewiesen, haben aber andrerseits grösstes Interesse daran, kurzfristig die verschiedensten Aussagen über ihr Tragwerk zu erhalten und vor allem: Sie möchten je nach Zwischenergebnis Einfluss auf den Auswertungsprozess haben. Es ist nun durchaus denkbar, dass der entwerfende Ingenieur, mit der entsprechenden Software ausgestattet, die Auswertung der Versuchsergebnisse an seinem Arbeitsort selbst durchführt. Das Labor beliefert ihn nur mit einem die Information über die Versuchsergebnisse enthaltenden Datenband. Dadurch wird die geographische Distanz zwischen Labor und Ingenieur bedeutungslos.

Dieses Zukunftsbild der Modellstatik, an dessen Realisierung heute intensiv gearbeitet wird, baut auf den Fortschritten der elektronischen Messtechnik und den Möglichkeiten der Computertechnik. Wo früher mühsam tausend Messwerte registriert und ausgewertet wurden, werden heute spielend Hunderttausende von Daten erfasst und verarbeitet. Traditionelle Messtechniken, welche sich für die Computereingabe nicht eignen, werden daher entsprechend abgewertet. Vor allem eignen sich für die Aufnahme von Messwerten die direkten mechanisch elektrischen Wandler, wie Widerstandsmessstreifen, induktive und kapazitive Geber. Alle mit diesen Geräten ausgeführten Messverfahren, auch bei ihrem Einsatz in grosser Zahl, weisen oft eine stark empfundene Unzulänglichkeit auf: Sie erfassen immer nur eine begrenzte Anzahl <u>örtlicher</u> Effekte. Elektrische Messverfahren, welche imstande wären z.B. ein Dehnungsfeld als <u>Kontinuum</u> zu erfassen, existieren meines Wissens nicht. Verfahren, welche, abgesehen von Beschränkungen anderer Natur, diese Bedingung erfüllen (z.B. Fotoelastizität, Moiré-Verfahren), eignen sich hingegen vorerst nicht zur Computereingabe. Hier liegt ein zentrales Problem für die weitere Entwicklung der Modellstatik.

Neben diesen versuchstechnischen Aspekten besteht für die weitere Perfektion der Hybridstatik ein weites Arbeitsfeld auf rein theoretischem Gebiet. Eine Systematik der Modellauswertung besteht nur in Ansätzen. Es stellt sich die Aufgabe, durch analytische Verknüpfung einzelner Messwerte auf die den Ingenieur vor allem interessierenden Schnittkräfte zu schliessen. Welche Messkombinationen führen optimal zur sicheren Bestimmung von Schnittkräften?

Wo am Modell dürfen diese Messungen vorgenommen werden, ohne zu Fehldeutungen zu führen? Durch den Einsatz des Computers sind auch hier grössere Freiheiten erlaubt, da der Arbeitsaufwand für die analytische Auswertungsarbeit kaum mehr als Kriterium für die Zulässigkeit eines Verfahrens ins Gewicht fällt.

<u>Wandel in der baustatischen Betrachtungsweise</u>

Im vorigen Abschnitt wurde aufgezeigt, dass die neuen Mittel

der elektronischen Messtechnik in Verbindung mit dem Computer als Prozessrechner erlauben, bei Steigerung von Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit in eine neue Grössenordnung von Geschwindigkeit der Erfassung und Menge der Information über das statische Verhalten von Versuchskörpern vorzudringen.

Die neuen Möglichkeiten, welche sich der Hybridstatik eröffnen, beschränken sich jedoch nicht auf die Quantität der zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehenden Information selbst. Die beschriebenen technischen Voraussetzungen eröffnen vielmehr Wege der Analysis für baustatische Berechnungen, welche bisher wohl bekannt, aber mangels geeigneter analytischer Methoden nie in der Praxis eingesetzt werden konnten.

Wir stehen heute erst am Beginn der Entwicklung dieser neuen, auf Hybridsystemen beruhenden baustatischer Berechnungsverfahren. An einem Beispiel, angewendet auf linear-elastische Probleme, kann jedoch der Grundgedanke aufgezeigt werden.

Sämtliche analytische Methoden der Baustatik, einschliesslich die Finiten Elemente, verfolgen das Ziel, durch Zusammensetzen der untersuchten Tragwerke aus bekannten, definierten Elementen, eine Lösung für das elastische Verhalten und für die Schnittkräfte der gesamten Struktur als Kontinuum zu finden. Für jeden Lastfall muss eine neue Lösung gefunden werden. Zustandsflächen sind ebenso Lösungen wie Einflussflächen. Müsste eine beschränkte Anzahl von Zustandsflächen über Einflussflächen gewonnen werden so würde dies die Kenntnis von einer unvergleichlich viel grösseren Anzahl von Lösungen voraussetzen. Dieser Weg wird bei zwei- und dreidimensionalen Problemen daher nicht beschritten, da er zu aufwendig und damit unrealistisch erscheint.

In der modernen Modellstatik, wo die Erfassung einer beliebigen Anzahl von Messungen kein Kopfzerbrechen mehr bereitet, erweist sich nun gerade dieser "Umweg", gesamthaft gesehen, als der direkteste Weg. Jede Messung ist schon eine Lösung für das Tragverhalten des Bauwerkes als Kontinuum. Zudem lässt sich die Erzeugung

von beliebig vielen Einheitslastfällen, angreifend an beliebig vielen Stellen, weit leichter automatisieren als die Erzeugung einer beschränkten Anzahl von Lastgruppen. Man wird daher die Versuchstechnik der Hybridstatik auf dem Gebiet der linear-elastischen Probleme darauf ausrichten, eine möglichst grosse Menge von Einflussfunktionen zu erzeugen. Dem Ingenieur fällt damit eine ungewohnt aussagekräftige Lösungsmenge über sein Problem in den Schoss, mit welcher er seine Probleme weit eleganter formulieren kann wie bis anhin.

Die speziellen Lösungen seines Problems können dann immer in der folgenden, für das zweidimensionale Problem angeschriebenen Form gewonnen werden:

$$E^P\ (u_o, v_o) = \int_F L^q\ (x,y) \cdot e^{pq}\ (u_o, v_o, x, y)\ dx\ dy$$

Ein Effekt E^P (eine Schnittkraft, eine Spannung, eine Verschiebung etc.) an der Stelle u_o, v_o ist gleich dem Integral über dem Produkt aus der Ursache L^q (eine Lastverteilung, Momentenverteilung, Verschiebung etc.) und der experimentell gefundenen Einflussfunktion e. Je nach der Anzahl N der untersuchten Stellen und derjenigen der Beanspruchsarten P und der Belastungsarten Q müssen also $N \cdot P \cdot Q$ Einflussflächen gewonnen werden. Eine moderne Hybridanlage erzeugt hundert bis tausend Einflussflächen mit je Hunderten von Einzelwerten pro Stunde. Es wird also unabhängig vom Schwierigkeitsgrad der gestellten Aufgaben, in kurzer Zeit, eine auch in der reinen Computerstatik ungekannte Resultatmenge erzeugt.

Die weitere Arbeit des Computers beschränkt sich nun ausschliesslich auf die Manipulation der in Form von Matrizen vorhandenen Einflussfunktionen. Die Simulation der Wirkung irgendwelcher Lastfälle wird zum Spiel. Einfachste Computeroperationen führen zu den gewünschten Ergebnissen. Der Berechnung einer beliebigen Anzahl von Lastfällen steht nichts entgegen. Die Programmierung von beliebigen Verkehrslastfällen, die Berechnung von Grenzwerten, die Entwicklung von Optimierungsprogrammen für die Vorspannung (deren Wirkung selbstverständlich auch über Einflussfunktionen gewonnen wird), sind Aufga-

gaben, welche aufgrund der bekannten Funktionen weit leichter lösbar sind, zudem ist der Lösungsweg computergerechter als die üblichen Methoden der analytischen Baustatik.

Aus leicht einzusehenden Gründen sind der Menge der Daten, welche der Computer auf die beschriebene Weise zu manipulieren imstande ist, praktisch keine Grenzen gesetzt. Der Hauptgrund liegt darin, dass die notwendigen Matrizenoperationen keine grossen Inversionen erfordern. Daher können die an sich relativ kleinen Matrizen immer sequentiell aus dem Massenspeicher (z.B. Magnetband) über den Kernspeicher geführt werden. Ein Kleincomputer wird, wenn er Zugriff zu Einflussfunktionen hat, zu einem für den entwerfenden Ingenieur weit mächtigeren Instrument als heutige Grosscomputeranlagen. Der zeitliche und Kostenaufwand für die Lösung von baustatischen Problemen mit der Hybridstatik bleibt so auch bei den schwierigsten Aufgaben in vernünftigen Grenzen.

Rückblickend sei eine mehr philosophische Bemerkung gestattet:

Unsere Baukonstruktionen sind Bestandteil unserer physikalischen und damit der analogen Umwelt. Dasselbe gilt für unsere Experimente, seien dies nun Modellversuche oder andere Untersuchungen, auf deren Anschauung wir unsere theoretischen Vorstellungen über die Baustoffe und das Tragverhalten erarbeiten.

Unsere analytischen Modellvorstellungen, welche nie die physikalische Wirklichkeit selbst darstellen und deshalb immer nur mehr oder weniger brauchbare Näherungen sein können, erfüllen dann ihren Zweck, wenn sie allgemeinere Aussagen über einen Problemkreis gestatten. Die Analytik dient dem Ueberblick. Hier liegt ihre Berechtigung.

Vergleicht man nun auf dem linear-elastischen Gebiet die Methode der Finiten Elemente mit der Technik der Hybridstatik, so muss man den an sich überraschenden Schluss ziehen, dass die aus dem Analogon gewonnenen Ergebnisse dem entwerfenden Ingenieur allgemeinere Aussagen für die Bemessung in die Hand gibt als der ana-

lytische, rein abstrakte Weg, mit all seinen nicht ganz übersehbaren Unsicherheiten. Weshalb denn das Kontinuum zuerst mit viel Geduld in grobe Elemente zerteilen, um es dann mühsam wieder einigermassen zusammenzuflicken?

Zusammenfassung

Durch Einsatz der modernen elektrischen Messtechnik und des Computers als Steuerorgan des Versuchsablaufes wie auch als Datenverarbeitungsmaschine wird das bisher bekannte Gesicht der Modellstatik grundlegend gewandelt. Das Modell wird zum reinen Analogon, welches technisch gegenüber früher weitgehend vereinfacht, in Symbiose mit dem Computer, ein mächtiges, weit eleganteres Werkzeug für die Bemessung zu werden verspricht. Wir bezeichnen diese integrierten Systeme zur Bemessung als Hybridstatik.

Summary

Taking advantage of the recent development of electric measuring techniques and the computer, performing as a process control machine and data processing unit, the familiar aspect of structural models will be essentially transformed. The model, being now physically simplified, serves only as an analogue input and, in symbiosis with the computer, promises to become a very powerful and elegant tool for structural design. We call these integrated systems hybridanalysis of models.

Résumé

Profitant du développement de la technique des mesures électriques et de l'emploi de l'ordinateur, utilisé aussi bien comme machine cibernétique qu'informatique, l'apparence habituelle de l'essai sur modèle est soumise à une transformation fondamentale. Le modèle, dont l'aspect physique est considérablement simplifié, sert de pure entrée d'analogue et promet de devenir, en symbiose avec l'ordinateur, un instrument de dimensionnement extrêmement puissant et élégant. Nous appelons ces nouveaux systèmes intégrés pour l'investigation de structures, analyse hybride de modèles.

Leere Seite
Blank page
Page vide