

# Makro-Operationen als neues Hilfsmittel für die Baustatik

Autor(en): **Kammenhuber, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **87 (1969)**

Heft 7

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70593>

## **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.

# Makro-Operationen als neues Hilfsmittel für die Baustatik

DK 624.04:681.142

Von Dr.-Ing. J. Kammenhuber, Zürich. Vortrag, gehalten an der Studientagung der FGBH über aktuelle Ingenieurprobleme vom 18. und 19. Okt. 1968 in Zürich

## 1. Einleitung

In einer Zeit, da die Statische Berechnung für eine Brücke über den Rhein einige tausend Seiten umfasst, die eingereichten Offertunterlagen für eine Brücke über einen Meeresarm zwei Tonnen ausmachen und die hohe Ausnutzung der Materialien immer reifere Berechnungsmethoden verlangt, können wir als entwerfende Ingenieure nur eines ausrufen: «Wir brauchen eine neue Sprache!» Es wird im folgenden gezeigt, wie man durch die Vereinbarung von Makro-Operationen und Makro-Algorithmen zu einer wesentlich konzentrierteren Schreibweise gelangt. Mit Recht kann man von der Schaffung einer neuen Sprache reden, denn ähnlich wie bei der Matrix-Schreibweise (vgl. [1]) tritt einerseits für den Ingenieur eine Abstraktion auf das Wesentliche eines Rechenganges ein und andererseits ist die gewählte Schreibweise zugleich computer-verständlich, womit die rechnerische Durchführung, der Lauf der Indizes und die Administration grosser Datenmengen vollautomatisch erledigt werden können.

## 2. Höhere Operationsbegriffe

In der normalen Formelschreibweise sind uns die Grundoperationen (Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division) und die elementaren Funktionen (Sinus, Cosinus, Exponentialfunktion, Quadratwurzel usw.) geläufig. In Tabelle 1 wurden die entsprechenden Symbole in der Rubrik «Einzelwertoperationen» eingetragen. Innerhalb einer Formel oder Rechenanweisung haben nämlich auch die elementaren Funktionen nur den Rang von Operationen. Nun brauchen wir aber auch Sammelbegriffe, wie zum Beispiel: «Löse ein lineares Gleichungssystem», «Suche die Maxima und Minima von sich gegenseitig ausschliessenden Lastfällen», «Bilde die maximale Summe aller positiven Werte und die minimale Summe aller negativen Werte von sich gegenseitig nicht ausschliessenden Lastfällen» oder «Zeichne die Grenzwerte für alle Längsträger».

Das mag zunächst utopisch klingen, ist es aber heute nicht mehr. Wollen wir unsere Sprache vereinfachen, so müssen wir höhere Begriffe einführen, zum Beispiel «LINEQ» für die Auflösung eines linearen Gleichungssystems oder «MAUSP» für die Momentenermittlung aus Einzellasten. Im rechten Teil von Tabelle 1 werden derartige Begriffe als sogenannte Makro-Operationen aufgeführt. LINEQ A B X bedeutet also: «Nimm das Feld A als linke Seite und die Kolonnen des Feldes B als rechte Seiten eines linearen Gleichungssystems, berechne daraus die Unbekannten und setze diese in das Feld X.»

Wir erkennen hieran zwei wesentliche Dinge:

1. Der Operationscode LINEQ löst einen ganzen Algorithmus aus.
2. Die Operanden sind nicht mehr Einzelwerte, sondern *Felder*.

Dass die Operationsbezeichnungen aus mehreren Buchstaben bestehen können, sind wir bereits von den Funktionen her gewöhnt, zum Beispiel sin, cos usw. Jetzt können aber auch die Feldnamen aus mehreren aneinandergeschriebenen Buchstaben bestehen, zum Beispiel «BETA» anstelle von «β», wie dies bei der Invertierung INVERT in Tabelle 1 benutzt wurde, oder «XNEU» anstelle von «X<sub>neu</sub>».

## 3. Kräftemethode

Die Anwendung der Makro-Operationen wird nun am Beispiel der Kräftemethode gezeigt. Das Gleichungssystem

$$(1) \begin{cases} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{10} = 0 \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{20} = 0 \end{cases}$$

enthält zwei statisch überzählige Kräfte  $X_1$  und  $X_2$ . Die darin vorkommenden Formänderungsgrössen  $\delta_{ik}$  ergeben sich allgemein nach

$$(2) \delta_{ik} = \int \frac{M_i \cdot M_k}{E \cdot J} \cdot dx$$

wobei hier der Einfachheit halber nur die Biegemomentenarbeit berücksichtigt wurde. Nach Bestimmung der Unbekannten  $X$  ergeben sich die Momente  $M$  im statisch unbestimmten System gemäss

$$(3) M = M_0 + \sum_i X_i M_i$$

Bei der Berechnung der Formänderungsgrössen  $\delta_{ik}$  bedient man sich für allgemeine Fälle der numerischen Integration gemäss folgender Gleichung:

$$(4) \delta_{ik} \approx \sum_w \left( M_{iw} \cdot \frac{z_w \cdot \Delta x_w}{E_w \cdot J_w} \cdot M_{kw} \right) = [C]' * [V] * [C]$$

Diese kann durch entsprechende Wahl der Integrationspunkte  $w$  beliebig genau ausgeführt werden. Es sei in diesem Zusammen-

hänge nur daran erinnert, dass bereits die sehr einfache *Simpson'sche* Regel Funktionen 3. Grades völlig exakt integriert. Nähere Angaben zur numerischen Integration findet man in [2] und [3]. Es zeigt sich nun, dass die Rechenanweisung (4) sich ohne weiteres durch Matrixmultiplikationen erfüllen lässt. Dies wird noch näher erläutert anhand des Bildes 1.

Bild 1 enthält ein vollständiges Beispiel für ein zweifach statisch unbestimmtes System mit drei Lastfällen. Der gesamte Berechnungsablauf lässt sich durch die eingerahmten 8 Zeilen (Bild 1 rechts) eindeutig festlegen, unabhängig von System- und Belastungsart. Nach Wahl einer Elemententeilung werden zu jedem Integrationspunkt  $w$  die zugehörigen Elementlängen  $\Delta x$ , Integrationsgewichte  $z$  und Elastizitätsmoduli  $E$  in das Feld der Elementbeschreibung EDX eingetragen. In das Feld J werden die Trägheitsmomente eingetragen und schliesslich in das Feld C die Werte  $M_1$  und  $M_2$  aus der Wirkung der statisch überzähligen Einheitskräfte  $X_1 = 1$  und  $X_2 = 1$ . Das Feld C' enthält dieselben Zahlen wie das Feld C, jedoch sind die Seitenlängen gegeneinander vertauscht. Man bezeichnet daher C' als die Transponierte von C. Zunächst wird nun aus der Elementbeschreibung EDX und den Trägheitsmomenten J mittels der Makro-Operation WEICH die sogenannte Weichheitsmatrix V gebildet. Sie enthält als Diagonalglieder die Werte

$$v_{ww} = \frac{z_w \cdot \Delta x_w}{E_w \cdot J_w}$$

alle übrigen Werte in dieser Matrix sind Null. Führt man die Matrixmultiplikation C'\*V aus, so erhält man die Matrix C'V und durch nochmalige Multiplikation mit C die Matrix C'VC. In der Schreibweise der Makro-Operationen lautet dies

$$\begin{matrix} \text{MMM} & C' & V & C'V \\ \text{MMM} & C'V & C & C'VC \end{matrix}$$

Tabelle 1. Einzelwert- und Feldoperationen

Einzelwertoperationen		Feldoperationen (Algorithmen, Prozeduren)	
Rechenoperationen:	Elementare Funktionen:	Makro-Operationen:	Algebraische Bedeutung
+	sin	LINEQ A B X	$[X] = -[A]^{-1} * [B]$
-	cos	INVERT A BETA	$[BETA] = [A]^{-1}$
×	$\sqrt{\quad}$	MAM A B C	$[C] = [A] + [B]$
:	arc tg	MMM A B C	$[C] = [A] * [B]$ <sup>1)</sup>
	e	MSF A f C	$[C] = [A] * f$
	.....		
		MAUSP P DX M	zweimalige Integration
		QAUSM M DX Q	numerische Differentiation
		MAXSUM MNQ EXTREMA	fakultative Addition
		MAXAUS MNQ MAXMIN	spezielle Auswahl

<sup>1)</sup>  $c_{ik} = \sum_{j=1}^{j=j_k} (a_{ij} b_{jk}) \mid k=1, \dots, k_e \mid i=1, \dots, i_e$

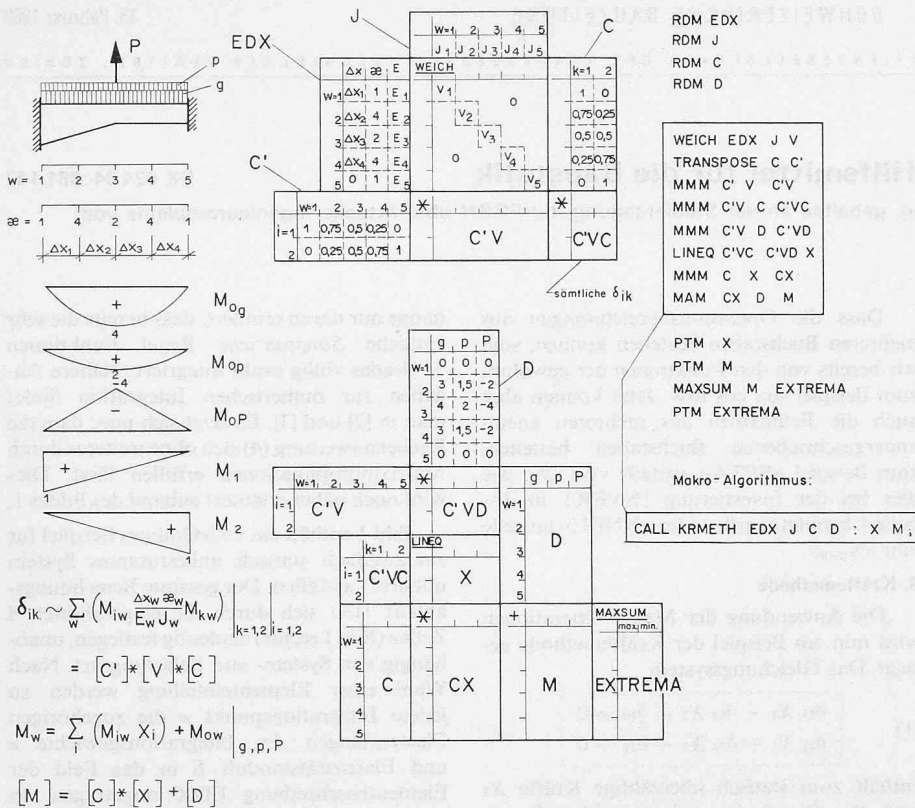


Bild 1. Matrix-Schema und Makro-Operationen der Kräfte Methode

Die Matrix  $C'VC$  enthält nun die Gesamtheit der lastunabhängigen Formänderungsgrößen  $\delta_{ik}$ , das heisst die linke Seite des Gleichungssystems. Mittels vorstehender zwei Makro-Operationen sind also bereits alle zugehörigen Integrationen geschehen. Die Gesamtheit der Belastungsglieder  $\delta_{i0}$  ergibt sich in analoger Weise als Matrix  $C'VD$ . Jede Kolonne dieser Matrix entspricht einem Lastfall, bildet also eine rechte Seite des Gleichungssystems. Die Auflösung des Gleichungssystems erfolgt durch die Makro-Operation

$LINEQ \ C'VC \ C'VD \ X$

Mit einigen weiteren Operationen erhält man schliesslich die Momente  $M$  und die Extrema. Die Operationen RDM (ReaD Matrix) und PTM (PrinT Matrix) dienen der Dateneingabe und der Resultatausgabe. Für weitere Einzelheiten sei auf [4] verwiesen.

#### 4. Makro-Sprache

Man kann nun noch einen Schritt weitergehen und die eingerahmten 8 Makro-Operationen zusammenfassen zu einem sogenannten

Makro-Algorithmus, dessen Aufruf auf Bild 1 unten rechts dargestellt ist. Bei diesem Aufruf folgen der Makro-Operation CALL der Kurzname des zu rufenden Makro-Algorithmus, hernach die Rufnamen der Datenfelder und hinter dem Doppelpunkt schliesslich die Namen, mit denen die entstehenden Resultatfelder etikettiert werden sollen.

Makro-Operationen und Makro-Algorithmen bilden zusammen eine Makro-Sprache, mit der man nicht mehr Einzelwerte durch Einzelwertoperationen verknüpft, sondern ganze Felder durch Feldoperationen. Diese höhere Sprache hat also folgende Hauptmerkmale:

1. Die Verständigung der Ingenieure untereinander wird vereinfacht.
2. Die Makro-Sprache ist in genau dieser Form zugleich computerverständlich.
3. Die Makro-Operationen können von einem Computer *direkt* interpretiert werden, das heisst bei Benutzung der Makro-Operationen benötigt man kein spezielles problemorientiertes Programm.

Der Ingenieur kann also ohne weitere Programmierkenntnisse bei Verwendung dieser höheren Sprache auf einem Gross-Computer ganze Felder ebenso direkt verarbeiten wie auf einer Tischrechenmaschine oder einem Tisch-Computer bis anhin die Einzelwerte. Das heisst praktisch, mit einer Zeile kann er mehrere hunderttausend Einzeloperationen auslösen und die entstehenden Resultate sofort weiterverwenden.

In Tabelle 2 wurde eine gewisse Hierarchie der Sprachen aufgetragen ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Zuunterst der Maschinen-Code, zuoberst die Umgangssprache der Ingenieure und dazwischen ein ganzes Spektrum von Sprachen und Systemen. DIMAX steht als Abkürzung für «Direkt Interpretierbare MAKro-Sprache». Diese steht der Ingenieursprache relativ nahe.

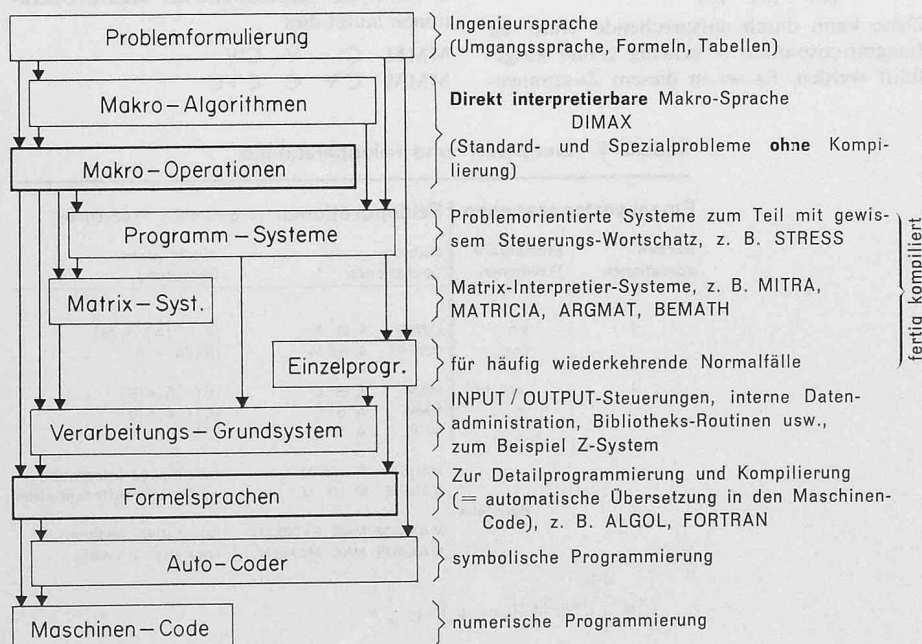
In Tabelle 3 wurden einige wichtige Makro-Operationen zusammengestellt. Zunächst die normalen Matrix-Operationen bis zu den linearen Gleichungssystemen. Dann baustatische Spezial-Operationen und für die Behandlung der Vorspannung die Operationen REIBUNG, MNVKAB, K+S und SIGTAB. Schliesslich noch maschinentechnische resp. administrative Operationen, wie ReaD Matrix und PrinT Matrix und als ganz besonders wichtige Operationen für längere Berechnungen: BREAKPOINT und RERUN. Letztere bedeuten sehr viel mehr als etwa nur «Stop» und «Start».

In Tabelle 4 werden noch die wichtigsten Makro-Algorithmen der Kräfte- und der Deformationsmethode inkl. Flächentragwerke, Theorie II. Ordnung und partielle Vorspannung aufgeführt. Bei der Berechnung der Bruchsicherheit erfolgt zugleich die graphische Ausgabe eines Interaktionsdiagrammes für Biegung mit Normalkraft. Schliesslich folgen noch Makro-Algorithmen für die Grenzwertbildung nach SIA-Normen und zum automatischen Aufzeichnen irgendwelcher Resultate.

#### 5. Anwendungsbeispiele

Als ein Ergebnis der systematischen Anwendung der Makro-Operationen zeigt Bild 2

Tabelle 2. Hierarchie einiger Programmiersprachen



Tab. 3. Einige wichtige Makro-Operationen

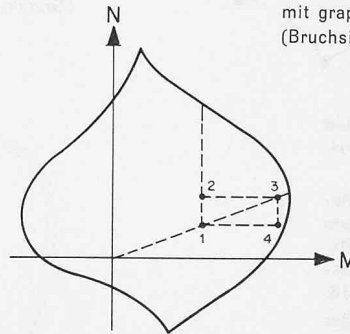
Tabelle 4. Einige wichtige Makro-Algorithmen

Operations-code:	Bedeutung:
MAM	Matrix Addiert zu Matrix
MMM	Matrix Multipliziert mit Matrix
MSF	Matrix Skalar multipliziert mit Faktor
TRANSPOSE	Transponiere
INVERT	Invertiere
LINEQ	Auflöse lineares Gleichungssystem
WEICH	Bilde <b>WEICH</b> heitsmatrix
MAUSP	Bilde <b>Momente AUS</b> Einzel-lasten <b>P</b>
QAUSM	Bilde <b>Querkräfte AUS</b> Momenten
MAXSUM	<b>MAX</b> imale <b>SUM</b> me (Extrema sich gegenseitig nicht ausschliessender Lastfälle)
MAXAUS	<b>MAX</b> imal- <b>AUS</b> wahl (Extrema sich gegenseitig ausschliessender Lastfälle)
REIBUNG	<b>REIBUNG</b> srechnung für Vorspannkabel
MNVKAB	<b>Momente</b> und <b>Normalkräfte</b> aus Vorspann- <b>KAB</b> eln
K+S	<b>Kriechen</b> + <b>Schwinden</b>
SIGTAB	Berechne Spannungstabelle
RDM	<b>ReaD</b> Matrix
PTM	<b>PrinT</b> Matrix
BREAKPOINT	Unterbrechung mit Konservierung aller Zwischenergebnisse auf Magnetband zwecks gelegentlichem Wiederstart
RERUN	Wiederstart eines <b>BREAK-POINT</b>

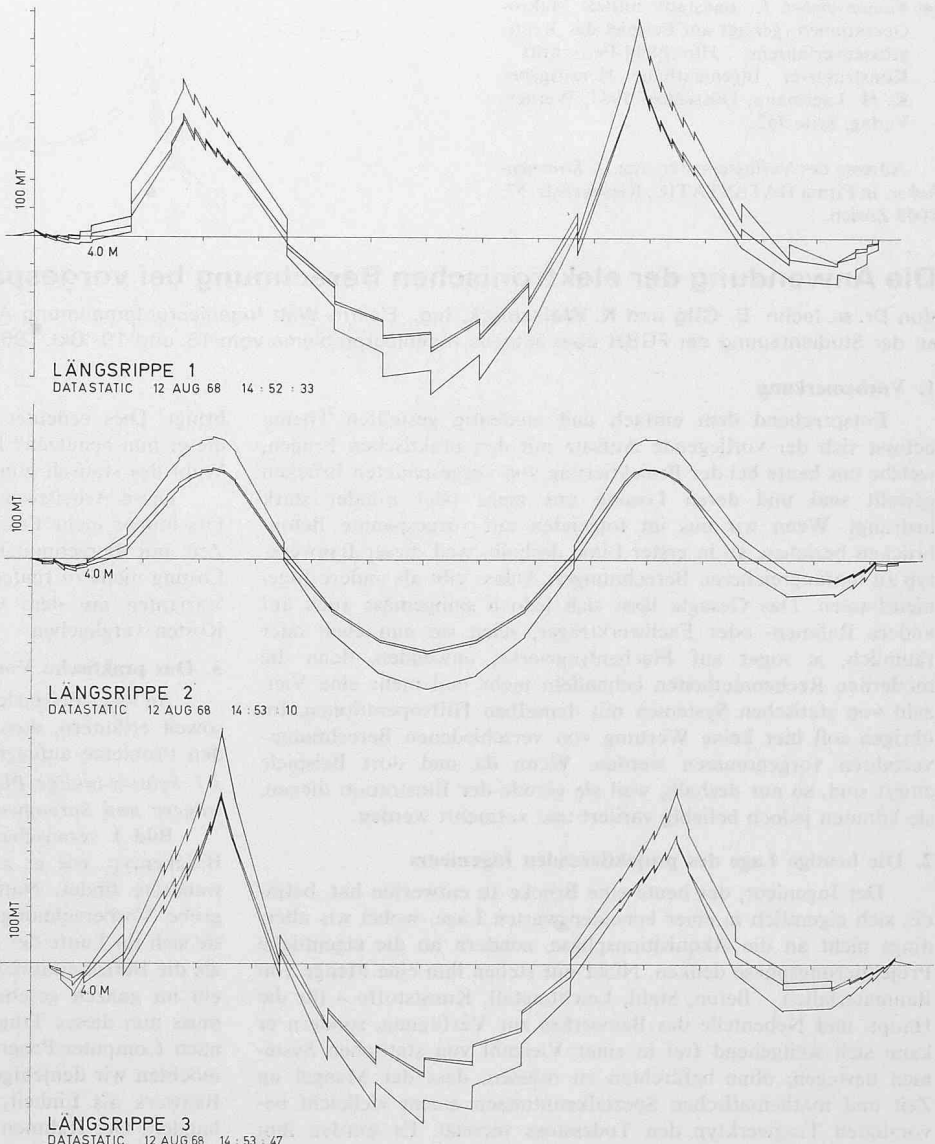
Aufruf:	Bedeutung:
CALL KRMETH EDX J C D : X M	Kräftemethode
CALL FRAME KN EL P : DEF MNQ A	Ebene Rahmen
CALL GRID ...	Trägerrost
CALL SPACE ...	Räumliche Rahmen
CALL SPACE 2 ...	dto. Theorie II. Ordnung
CALL SPACE 3 ...	Räumliche Seilwerke
CALL PLATE ...	Platten
CALL SHELL ...	Schalen
CALL SHELL 2 ...	dto. Theorie II. Ordnung
CALL PARTV ...	Partielle Vorspannung
CALL BRUCH ...	Bruchsicherheit

} Allg. Deformationsmethode

mit graphischer Ausgabe des Interaktionsdiagrammes (Bruchsicherheits-Zwiebel)



CALL SIA ...      Grenzwertbildung  
CALL PLOTT EXTREMA ...      Automatisches Zeichnen



die Grenzwerte eines schiefwinkligen Tragwerkes, automatisch berechnet, automatisch ausgewählt und automatisch aufgezeichnet. Es ist nun nicht mehr nötig, mehrere hundert Seiten Computer-Resultate durchzusehen, sondern die Arbeit des Ingenieurs rückt auf eine höhere Ebene. Wir merken bereits heute, dass der Schwierigkeitsgrad einer statischen Berechnung bei der Gestaltung unserer Tragwerke kaum noch eine Rolle spielt. Die Bilder 3 bis 5 bringen dafür einige Beispiele.

### 6. Schlussbemerkung

Es wurde versucht, am Beispiel der Makro-Sprache DIMAX das Arbeiten mit höheren Begriffsbildungen zu zeigen. Die Einfachheit dieser Makro-Sprache wird diese auch für wissenschaftliche Darstellungen von Bedeutung werden lassen. Die gesamte Baustatik lässt sich in der Form von Makro-Algorithmen beschreiben. Das System ist seit etwa einem Jahr in Betrieb und seit kurzem auch von jedem Telexanschluss aus benutzbar. Es handelt sich um eine in der Schweiz von Bauingenieuren nach neuesten Gesichtspunkten durchgeführte rein private Entwicklungsarbeit. Die gezeigten Beispiele vermitteln einen Begriff von der Leistungsfähigkeit.

Bild 2. Grenzwertlinien für ein schiefwinkliges System, automatisch berechnet und automatisch gezeichnet

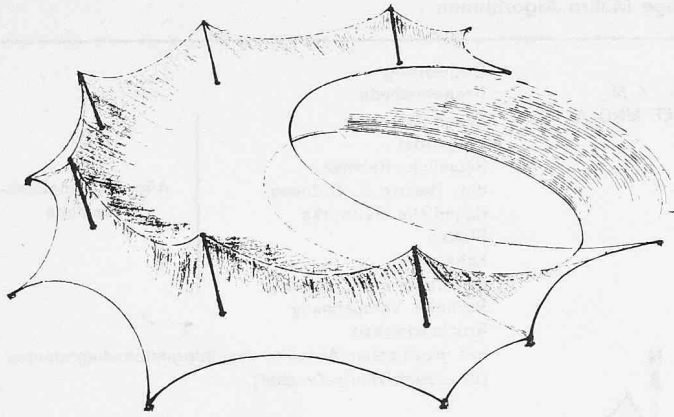


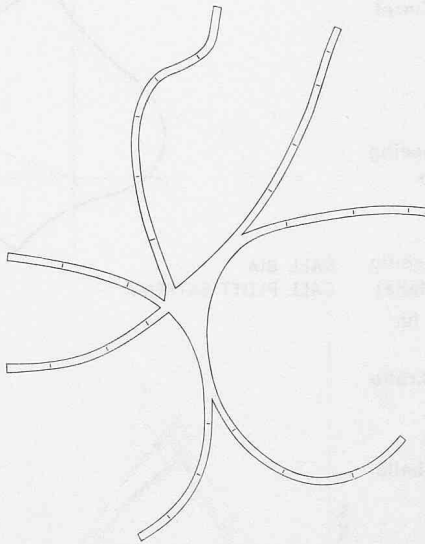
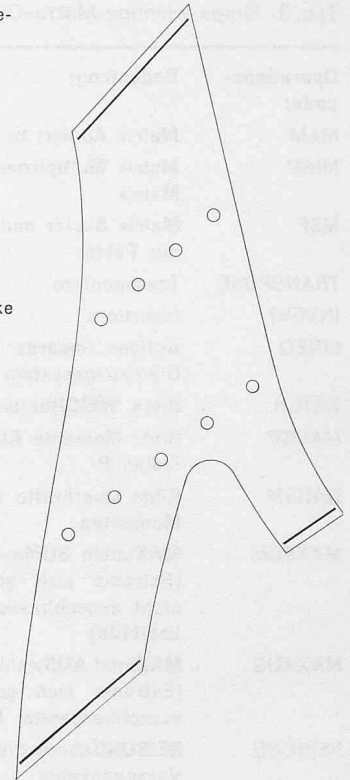
Bild 3 (links). Vorgespanntes Hängedach Olympiastadion, München

#### Literaturverzeichnis

- [1] Zurmühl R.: Matrizen und ihre technischen Anwendungen, 4. Auflage, Berlin 1964, Springer-Verlag.
- [2] Kammenhuber J. und Wegmann H.: Belastungsglieder für Biegestäbe mit Einschluss von Balken mit veränderlichem Trägheitsmoment und vorgespannten Stäben, «Beton- und Stahlbetonbau 55» (1960) Heft 1, Seite 18.
- [3] Kammenhuber J.: Kraftgrößenverfahren der Stabstatik bei nichtlinearem Elastizitätsgesetz, Dissertation TH Aachen 1961, Seite 83 und 180.
- [4] Kammenhuber J.: Baustatik mittels Makro-Operationen, gezeigt am Beispiel des Kraftgrößenverfahrens, Hirschfeld-Festschrift Konstruktiver Ingenieurbau, Herausgeber K. H. Laermann, Düsseldorf 1967, Werner-Verlag, Seite 452.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. J. Kammenhuber, in Firma DATASTATIC, Riesbachstr. 57, 8008 Zürich.

Bild 5 (rechts). Schiefe Plattenbrücke in Brisbane, Australien (Grundriss, schematisch)



Links:

Bild 4. Fussgänger-«Spinne» Bucheggplatz, Zürich (Grundriss)

## Die Anwendung der elektronischen Berechnung bei vorgespannten Betonbrücken

Von Dr. sc. techn. B. Gilg und K. Weissbeck, Ing., Elektro-Watt Ingenieurunternehmung AG, Zürich. Vortrag gehalten von B. Gilg an der Studientagung der FGBH über aktuelle Ingenieurprobleme vom 18. und 19. Okt. 1968 in Zürich DK 624.04:681.142:624.21

### 1. Vorbemerkung

Entsprechend dem einfach und eindeutig gestellten Thema befasst sich der vorliegende Aufsatz mit den praktischen Fragen, welche uns heute bei der Projektierung von vorgespannten Brücken gestellt sind und deren Lösung uns mehr oder minder stark bedrängt. Wenn wir uns im folgenden auf vorgespannte Betonbrücken beziehen, so in erster Linie deshalb, weil dieser Bauwerktyp zu umfangreicheren Berechnungen Anlass gibt als andere Ingenieurbauten. Das Gesagte lässt sich jedoch sinngemäss auch auf andere Rahmen- oder Fachwerkträger, seien sie nun eben oder räumlich, ja sogar auf Flächentragwerke, anwenden, denn die modernen Rechenmethoden behandeln mehr und mehr eine Vielzahl von statischen Systemen mit denselben Hilfsoperationen. Im übrigen soll hier keine Wertung von verschiedenen Berechnungsverfahren vorgenommen werden. Wenn da und dort Beispiele zitiert sind, so nur deshalb, weil sie gerade der Illustration dienen, sie könnten jedoch beliebig variiert und vermehrt werden.

### 2. Die heutige Lage des projektierenden Ingenieurs

Der Ingenieur, der heute eine Brücke zu entwerfen hat, befindet sich eigentlich in einer beneidenswerten Lage, wobei wir allerdings nicht an die Akquisitionsphase, sondern an die eigentliche Projektierungsphase denken. Nicht nur stehen ihm eine Menge von Baumaterialien – Beton, Stahl, Leichtmetall, Kunststoffe – für die Haupt- und Nebenteile des Bauwerkes zur Verfügung, sondern er kann sich weitgehend frei in einer Vielzahl von statischen Systemen bewegen, ohne befürchten zu müssen, dass der Mangel an Zeit und mathematischen Spezialkenntnissen einem vielleicht bevorzugten Tragwerktyp den Todesstoss versetzt. Es werden ihm verschiedene Computer-Programme und viele Computerstunden zu günstigen Bedingungen angeboten, so dass er nur zuzugreifen braucht, falls er den Angeboten das nötige Vertrauen entgegen-

bringt. Dies bedeutet sicher einen Zeitgewinn. Zu was lässt sich dieser nun benützen? Die Antwort ist leicht zu geben: zur besseren Wahl des statisch günstigsten Systems.

Diese Arbeitsweise sollte im Schaffen des modernen Entwerfers immer mehr Fuss fassen. Es ist heute nicht mehr erlaubt, die Zeit mit Berechnungen zu vertrödeln und dafür die günstigste Lösung nicht zu finden. Im Zweifelsfall soll man ganz verschiedene Varianten mit dem Computer sorgfältig durchrechnen und die Kosten vergleichen.

### 3. Das praktische Vorgehen

An zwei Beispielen möchten wir nun das praktische Vorgehen soweit erläutern, dass die bei der Detail-Behandlung auftauchenden Probleme aufgegriffen und geklärt werden können.

#### 3.1 Schiefwinklige Plattenbalkenbrücke mit vorgespannten Hauptträgern und Sprengwerksstützen

Bild 1 veranschaulicht dieses Tragwerk. Es ist ein geläufiger Brückentyp, wie er z. B. zur Überführung von Autobahnen Anwendung findet. Natürlich müssen die Dimensionen durch eine grobe Vorberechnung provisorisch festgelegt werden, doch lassen sie sich im Laufe der Berechnung leicht variieren. Dies umso mehr, als die Berechnungskosten, auf die wir noch zu sprechen kommen, ein im ganzen gesehen bescheidenes Ausmass annehmen. Zuerst muss nun dieses Tragwerk berechnungsbereit gemacht werden. Je nach Computer-Programm sind verschiedene Wege möglich. Hier möchten wir denjenigen Rechengang skizzieren, welcher das ganze Bauwerk als Einheit, nämlich als einen räumlichen Rahmen behandelt. Der Rahmen besteht aus den starr miteinander verbundenen Haupt- und Querträgern, wobei die Fahrbahnplatte den Rahmenträgern zugeteilt wird. Diese Vereinfachung ist unwesentlich, erleichtert aber den Berechnungsweg entscheidend.