

Statische und dynamische Tragwerksanalyse mit GITRA 3

Dr. sc. techn. **D. Joensson**

Technische Universität Karl-Marx-Stadt, Sektion Maschinen-Bauelemente

0. Einleitung

Das Finite-Element-Programmsystem GITRA (grafisch interaktive Tragwerksanalyse) wurde ursprünglich für die Belange des Werkzeugmaschinenbaus konzipiert. Im Lauf der etwa 15jährigen Entwicklung entstanden in der Sektion Maschinen-Bauelemente die Großrechnerversionen GITRA für Balkentragwerke [1] [2], sowie GITRA II für dünnwandige Flächentragwerke [3].

Seit 1987 wird im Lehrstuhl Strukturmechanik der Sektion Maschinen-Bauelemente die Personalcomputer-Version GITRA3 entwickelt [4]. Das Programmsystem ermöglicht die Berechnung statischer Verformungen und Eigenschwingformen für räumliche, dünnwandige Flächentragwerke in Kombination mit Balken beliebiger Querschnitte, Federn, Masse- und Starrelementen. GITRA3 erhielt einen konsequent modularen Aufbau. So konnten die Vorzüge des Personalcomputers optimal genutzt werden. Das Programmsystem wurde im Rahmen eines intersektionellen CAD-CAM-Themas der TU Karl-Marx-Stadt erstellt und entspricht in seinem realisierten Stand modernen Anforderungen an eine CAD-Software. Gerätetechnische Voraussetzung für die Anwendung des Programmsystems ist ein 16 bit-Rechner mit Betriebssystem MS-DOS, mindestens 500 KByte RAM, externem Plattenspeicher und zusätzlichem Grafik-Terminal.

1. Elementkatalog

Bild 1 zeigt die sechs Elementtypen, jeweils mit Angabe des Elementkoordinatensystems $\bar{x}-\bar{y}-\bar{z}$ und mit Darstellung der an den Knoten angreifenden Kräfte und Momente. Die Verbindung der finiten Elemente erfolgt einheitlich über Knotenpunkte mit je 6 Freiheitsgraden (3 Verschiebungen, 3 Verdrehungen). Das Balkenelement, Bild 1a, kann einen beliebigen Querschnitt besitzen. Es handelt sich dabei um einen Timoshenko-Balken mit Querkraftschub und Rotationsträgheit bei Schwingungen. Als Querschnittskennwerte sind vom Nutzer anzugeben: Querschnittsfläche, Trägheitsmomente $I_{\bar{y}\bar{y}}$, $I_{\bar{z}\bar{z}}$, Torsionsträgheitsmoment $I_{\bar{x}\bar{x}}$, Schubverteilungszahlen und Schubmittelpunkt-kordinaten.

Das Federelement besteht aus 6 Federn (Zug-Druck-Federn in drei Richtungen und Drehfedern um drei Achsen). Das masselose Starrelement, Bild 1d, dient zur Modellierung des Kraftflusses bei nicht zusammenstoßenden Elementachsen benachbarter Bauteile.

Das Masselement, Bild 1f, wird knotenbezogen in einem lokalen Koordinatensystem $x^*-y^*-z^*$ mit maximal 6 Werten angegeben: Diskrete Zusatzmassen in drei Richtungen und diskrete Zusatz-Massenträgheitsmomente um drei Achsen.

Die Flächenelemente sind ebene dünnwandige Faltelemente mit entkoppelten Scheiben- und Platteneigenschaften. Zur Modellierung der kinematischen Randbedingungen kann der Anwender Festlagerknoten und teilverschiebbliche Knoten definieren. Für die Festlager werden alle 6 Freiheitsgrade des Knotens zu Null gesetzt. Bei teilver-

schieblichen Knoten kann wahlweise jeder der 6 Freiheitsgrade zu Null gesetzt werden, wobei hier die Vorgabe eines lokalen Koordinatensystems möglich ist, wenn das Lager gegenüber dem Strukturkoordinatensystem gedreht modelliert werden soll.

2. Arbeitsweise des Programmsystems

GITRA3 besteht aus mehreren Hauptprogrammen, die durch den Nutzer weitestgehend unabhängig aktiviert werden können:

GITDE Dialog-Eingabe

GITED Eingabe-Druck

GITBM Berechnungsmodul Statik und Eigenwerte

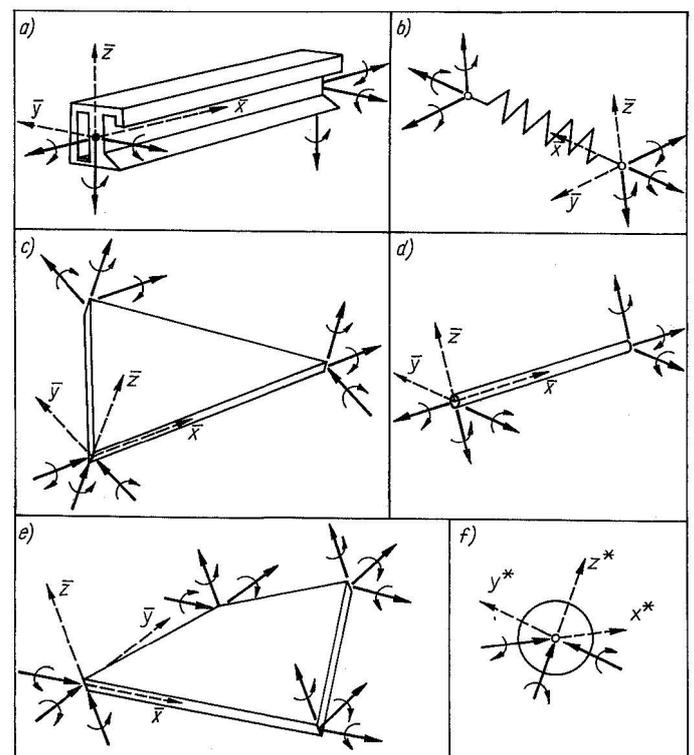
GITAD Ausgabe-Druck

GITSK Schnittkräfte und -momente

GITFD Adapter vom FEM-Datenstandard TGL 44640 [5] zu GITRA3

Während der Dialog-Eingabe mit GITDE zu einem Beispiel „name“ wird vom Programm ein *Quelldatenfile* name. - Q - erzeugt. Diese

Bild 1. Elementkatalog zu GITRA3



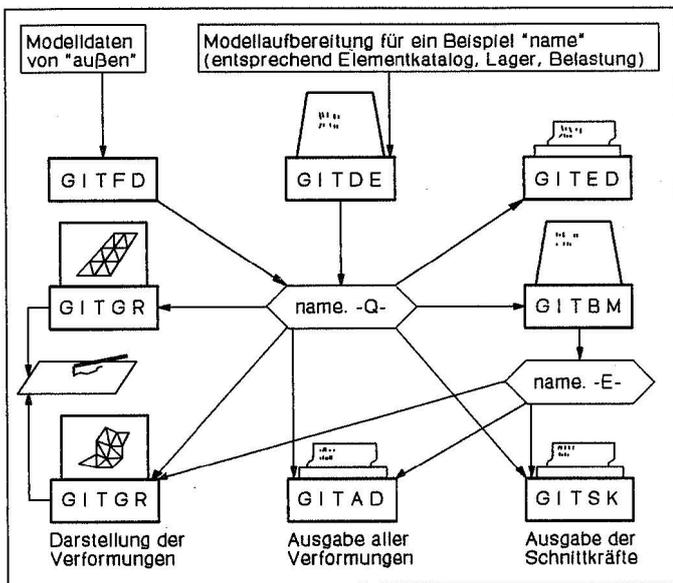


Bild 2. Schema zur Arbeitsweise des Programmsystems

formatierte, sequentielle Datei enthält sämtliche Eingabedaten für das Beispiel und kann vom Nutzer durch Editor oder Textprozessor eingesehen und korrigiert werden. Der Quelldatenfile besitzt eine bestimmte Datenstruktur mit fester Reihenfolge der Eingabedaten (globale Daten, Knotenkoordinaten, Topologie, Materialdaten, Elementdaten, Lagerung, Belastung).

Nach der Berechnung mit GITBM entsteht im aktuellen Verzeichnis ein Ergebnisfile name. -E- als unformatierte Direktzugriffsdatei. Sie enthält für jeden statischen Lastfall und jede berechnete Eigenschwingform je Knotenpunkt 3 Verschiebungen und 3 Verdrehungen bezüglich des Strukturkoordinatensystems, sowie die Eigenfrequenzen. Beide Dateien können auf Diskette zur Langzeitspeicherung abgelegt werden und dienen als Eingabe für die Module GITGR, GITED, GITAD und GITSK, Bild 2.

Für FEM-Modelle, die in der FEMDAS-Datenstruktur generiert wurden, kann durch GITFD ein Quelldatenfile für GITRA3 erzeugt werden. Voraussetzung ist jedoch die Einhaltung der in GITRA3 zur Verfügung stehenden Elementtypen.

Nach Erstellung des Quelldatenfiles kann die Struktur sofort grafisch kontrolliert werden. Nach der Berechnung ist dann auch die statische und dynamische Verformung darstellbar. Die FEM-Struktur wird standardmäßig als Glaskörpermodell in Parallelprojektion am Farbterminal gezeigt. Dem Nutzer werden folgende Menüfunktionen zur Grafik angeboten:

Zentralprojektion, schrittweise Drehung der Struktur um zwei Achsen, schrittweise Vergrößerung oder Verkleinerung der Struktur, Ausblenden des Koordinatensystems, Zentrieren des Bildes, Darstellung der Struktur mit Test auf verdeckte Linien, Farbschattierung der Flächenelemente unter Berücksichtigung einer wählbaren Lichtrichtung, Einblenden der statischen Belastung in Form von Einzelkräften und -momenten (Bilder 3 bis 7).

Weiterhin wird die statisch verformte Struktur mit wählbarer Verformungs-Vergrößerung dargestellt. Die ermittelten Schwingformen werden jeweils so normiert, daß die größte Auslenkung 10% der maximalen Strukturausdehnung entspricht. Bis zu einer bestimmten Elementanzahl wird jede berechnete Schwingform am Bildschirm in Bewegung gezeigt. Durch schrittweises Drehen der Struktur können so die bewegten Schwingungen von allen Seiten betrachtet werden.

3. Verwendete Algorithmen

Die Eingabe der Knoten- und Elementbezeichnungen in GITRA3 erfolgt in Form von Namen (auch Zahlen werden als Namen interpretiert). Das Programm ordnet diesen Namen Zahlen zu, und die so aufgebaute Knoten- und Elementnumerierung wird dann automatisch einer Bandbreiten- und Profilverminimierung nach Gibbs, Poole und Stockmeyer [6] unterzogen. Damit wird eine minimierte Rechenzeit

gewährleistet, ohne daß der Anwender Kriterien zur optimalen Nummerierung der Struktur beachten muß.

Zur Grafik ist lediglich anzumerken, daß beim Test auf verdeckte Linien nur ebene Flächenelemente ohne Durchdringung zugelassen sind [7]. Die Elementsteifigkeitsmatrix des Balkens wird direkt aus den Differentialgleichungen der Biegelinie des räumlichen Balkens abgeleitet [8] [9]. Die im Abschnitt 1 angegebenen Balken-Querschnittskennwerte können über ein Zusatzprogramm [10] ermittelt werden. Das Programm liefert auch Torsionsträgheitsmomente für wölbbehinderte Querschnitte und Schubverteilungszahlen. Die Elementsteifigkeitsmatrix des Dreieckelementes entsteht durch Überlagerung einer Scheibe mit ebenem Spannungszustand und einer Kirchhoff-Platte. Für die Scheibe kommt ein unvollständiger quadratischer Verschiebungsansatz nach Allmann [11] zur Anwendung. Die Elementsteifigkeitsmatrix der Platte basiert auf einem nicht konformen Verschiebungsansatz nach Bazeley u. a. [12]. Die Viereckelemente werden jeweils aus vier über Kreuz angeordneten Dreiecken zusammengesetzt.

Für die dynamischen Berechnungen werden konsistente Elementmassenmatrizen benutzt. Bei den Balken wird ein auf der räumlichen Biegelinie basierender Verformungsansatz verwendet. Durch die Einbeziehung der Schubverformung und der Rotationsträgheit der während der Schwingung kippenden Querschnitte können somit auch für kurze gedrungene Balken gute dynamische Ergebnisse erzielt werden. Für die Flächenelemente werden die Elementmassenmatrizen über einen linearen Verschiebungsansatz [13] bereitgestellt.

Die Lösung des großen Gleichungssystems wird mit einem modifizierten Cholesky-Algorithmus [14] realisiert, der das Profil der Koeffizientenmatrix nicht verändert. Im Unterschied zum üblichen Cholesky-Verfahren [15] erfolgt bei diesem Algorithmus die Dreieckerlegung in $\mathbf{K} = \mathbf{R}\mathbf{R}^T$, dann Rückwärtseinsetzen und abschließend Vorwärtseinsetzen.

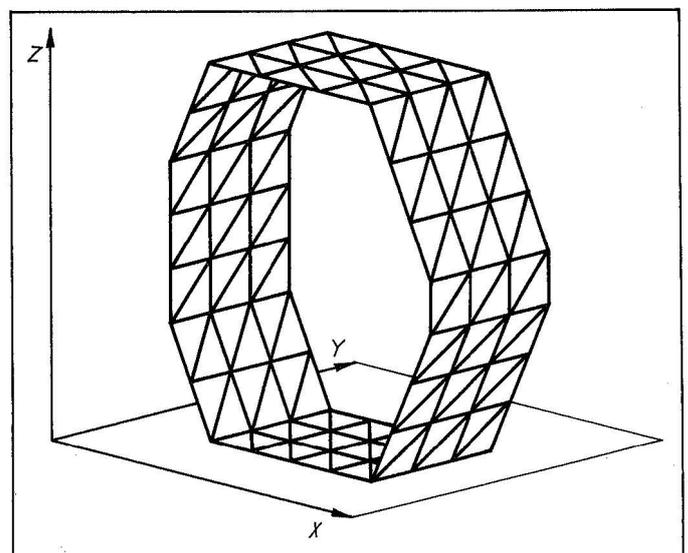
Nur für Strukturen bis etwa 100 Knoten sind die Berechnungen im RAM ausführbar. Für größere Strukturen wird automatisch ein externer Lösungsalgorithmus aktiviert, bei dem die Strukturmatrizen segmentiert verarbeitet werden. Natürlich sind dafür zusätzliche Transferoperationen erforderlich.

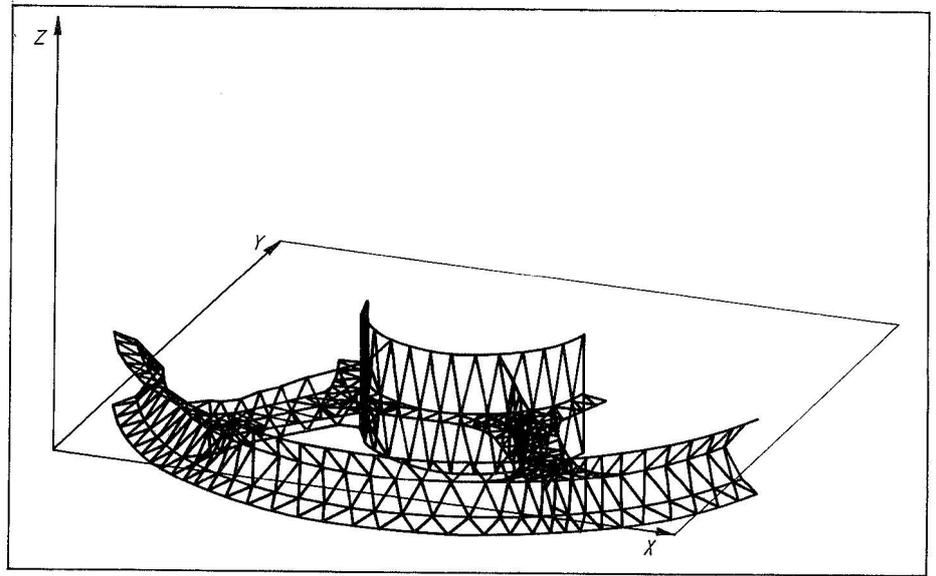
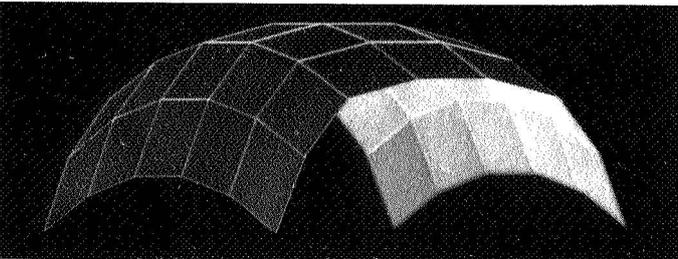
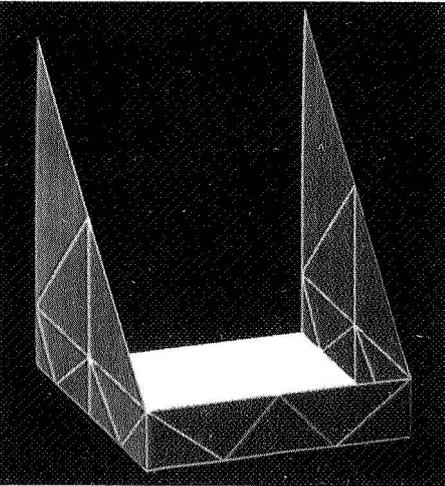
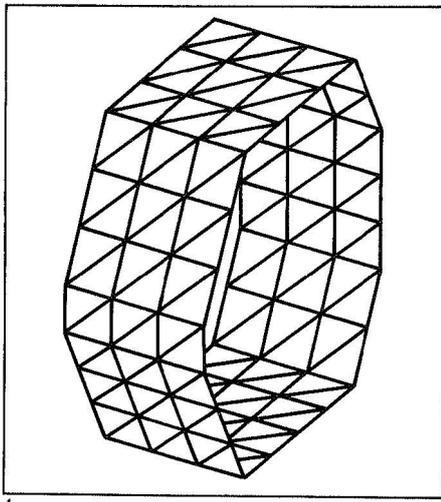
Zur Ermittlung der Eigenwerte und -vektoren wurde zunächst eine inverse simultane Vektoriteration auch v. Mises mit Schmidtscher Orthonormierung [15] programmiert.

Diese Programmteile wurden spätestens in Kooperation mit der Sektion Mathematik der TU Karl-Marx-Stadt¹⁾ durch die Simultan-Iteration nach Mc Gormick und Noe [16] ersetzt [17]. Dieses auch in CO-SAR implementierte Suspace-Verfahren [18] besitzt sehr gute Konvergenzeigenschaften. Für bisher untersuchte Beispiele mit GITRA3 konnte damit die Anzahl der erforderlichen Iterationsschritte auf mehr als die Hälfte gegenüber dem vorher programmierten Algorithmus

¹⁾ Besonderer Dank gilt Dr. sc. nat. A. Meyer und Dr. rer. nat. M. Pester für die freundliche Unterstützung bei der Nachnutzung der Eigenwert-Algorithmen.

3





mus gesenkt werden. Das kann für größere Strukturen einen erheblichen Rechenzeitgewinn von mehreren Stunden bedeuten.

An den Einbau des noch effektiveren Gradientenverfahrens [17] [19] wurde vorerst verzichtet. Dieser in GITRA II verwendete Algorithmus erfordert für den Unterraum des Eigenwertproblems die Bereitstellung des doppelten Speicherplatzes gegenüber *Mc Gormick* und *Noe*.

4. Zusammenfassung

Das Programmsystem GITRA3 ermöglicht durch seinen modularen Aufbau eine flexible Handhabung der statischen und dynamischen Analyse dünnwandiger, räumlicher Tragwerke.

An Nutzer des Programmsystems werden zur Zeit etwa 500 KByte compilierte Objektdateien, eine Anwendungsbeschreibung mit 24 Seiten [4] und die notwendigen Bibliotheken zum Linken übergeben.

Mit maximal vier Disketten (5 1/2 Zoll, 360 KByte) kann das Programmsystem installiert werden. Hauptnutzer des Programmsystems sind der VEB Werkzeugmaschinenkombinat „FRITZ HECKERT“ und der VEB Kombinat TEXTIMA in Karl-Marx-Stadt. Die bisherigen Erfahrungen mit zahlreichen Anwendern zeigen, daß GITRA3

auch für andere Interessenten mit Erfolg genutzt werden kann. Im März 1988 fand bereits der erste GITRA3-Lehrgang mit 22 Teilnehmern aus verschiedenen Industriezweigen und Instituten der DDR statt.

Nachnutzungswünsche sind zu richten an:

Prof. Dr. sc. techn. H. Bergander, Direktor der Sektion Maschinenbauelemente, TU Karl-Marx-Stadt, Straße der Nationen 62, 9001 Karl-Marx-Stadt.

Literatur

- [1] *Wolf, C.-D.; Keil, A.*: GITRA – ein grafisches interaktives Programmsystem zur Tragstrukturenkonstruktion. *Maschinenbautechnik*, Berlin 26 (1977) H. 9, S. 423–426
- [2] *Keil, A.; Rockhausen, L.; Vogel, M.; Wolf, C.-D.*: Schwingungen von Maschinengestellen. Tagung Festkörpermechanik zur Dynamik und Getriebetechnik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1979, Band A, Beitrag XII
- [3] *Burkhardt, R.; Erfurt, F.; Gumpert, W.; Tietz, W.*: Übersicht zu Arbeiten auf dem Gebiet der Gestellschwingungen. Tagung Festkörpermechanik zur Dynamik und Getriebetechnik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1985, Band A, Beitrag XXII
- [4] *Joansson, D.; Liebers, J.; Bobe, A.; Tietz, W.; Findeisen, B.*: Anwendungsbeschreibung zum FEM-Programmsystem GITRA3. TU Karl-Marx-Stadt, Sektion Maschinenbauelemente 1987
- [5] FEM-Datenschnittstelle FEMDAS. Entwurf zum DDR-Standard TGL 44640. TU Magdeburg, Sektion Maschinenbau, Methodisch Diagnostisches Zentrum „Finite Elemente“ 1987
- [6] *Gibbs, N. E.; Poole, W. G.; Stockmeyer, P. K.*: An algorithm for reducing the bandwidth and profile of a sparse matrix (Ein Algorithmus zur Bandbreiten- und Profilminderung für eine schwach besetzte Matrix) *SIAM J. Num. Analysis* 13 (1976) H. 2, S. 236–250
- [7] *Müglitz, J.; Joansson, D.*: ALFA – ein Softwarepaket für dreidimensionale Linien- und Flächengrafik. Preprint der Wiss. Zeitschrift der TU Karl-Marx-Stadt, Juli 1988
- [8] *Przemieniecki, J. S.*: Theory of matrix structural analysis (Theorie der Matrix-Strukturanalyse) Mc Graw Hill, New York 1968
- [9] *Aurich, H.*: Lehrbrief 2 zur Schwingungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1973
- [10] *Bobe, A.*: Anwendungsbeschreibung zum Programm GITRA-BAQUER. VEB Nadel- und Platinenfabrik Karl-Marx-Stadt 1988
- [11] *Allmann, D. J.*: A compatible triangular element including vertex rotations for plane elasticity analysis. (Ein kompatibles Dreieckelement mit Verdrehungen für ebene Elastizitätsprobleme) *Computers and Structures* 19 (1984) H. 1–2, S. 1–8
- [12] *Bazeley, G. P.; Cheung, Y. K.; Irons, B. M.; Zienkiewicz, O. C.*: Triangular elements in bending – conforming and non-conforming solutions. (Dreieckelemente unter Biegung – konform und nichtkonforme Lösungen) *Proc. Conf. Matrix Methods in Struct. Mech.*, Air Force Inst. of Tech., Wright Patterson A. F. Base, Ohio (1965), zitiert in [13]
- [13] *Zienkiewicz, O. C.*: Methode der finiten Elemente. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1974
- [14] *Meyer, A.; Döhler, B.; Meinel, G.; Pester, M.*: Dokumentation zum Programmpaket „Großdimensionierte Eigenwertprobleme“. *Wiss. Information TH Karl-Marx-Stadt* 1982, Heft 32
- [15] *Dankert, J.*: Numerische Methoden der Mechanik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1977
- [16] *Mc Gormick, S. F.; Noe, T.*: Simultaneous iteration for the matrix eigenvalue problem. Simultan-Iteration für das Matrizen-Eigenwertproblem) *Lin. Alg. Appl.* 16 (1977) S. 43–46
- [17] *Meyer, A.; Döhler, B.; Skurt, L.*: Algorithmen für großdimensionierte Eigenwertprobleme. *Wiss. Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt* (1983) Heft 8
- [18] *Zehn, M.*: Konzeption der Systemvariante COSAR-Eigenschwingungen. Tagung Festkörpermechanik zu Festigkeitsproblemen und Materialverhalten. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1982, Band A, Beitrag VII
- [19] *Meyer, A.*: Modern algorithms for large sparse eigenvalue problems. (Moderne Algorithmen für großdimensionierte Eigenwertprobleme) Berlin: Akademie-Verlag 1979.

MaA 1360