

**Programmsystem  
zur  
Maschinendynamik**

**Kurz-Beschreibung**

Version 5.0  
November 2017

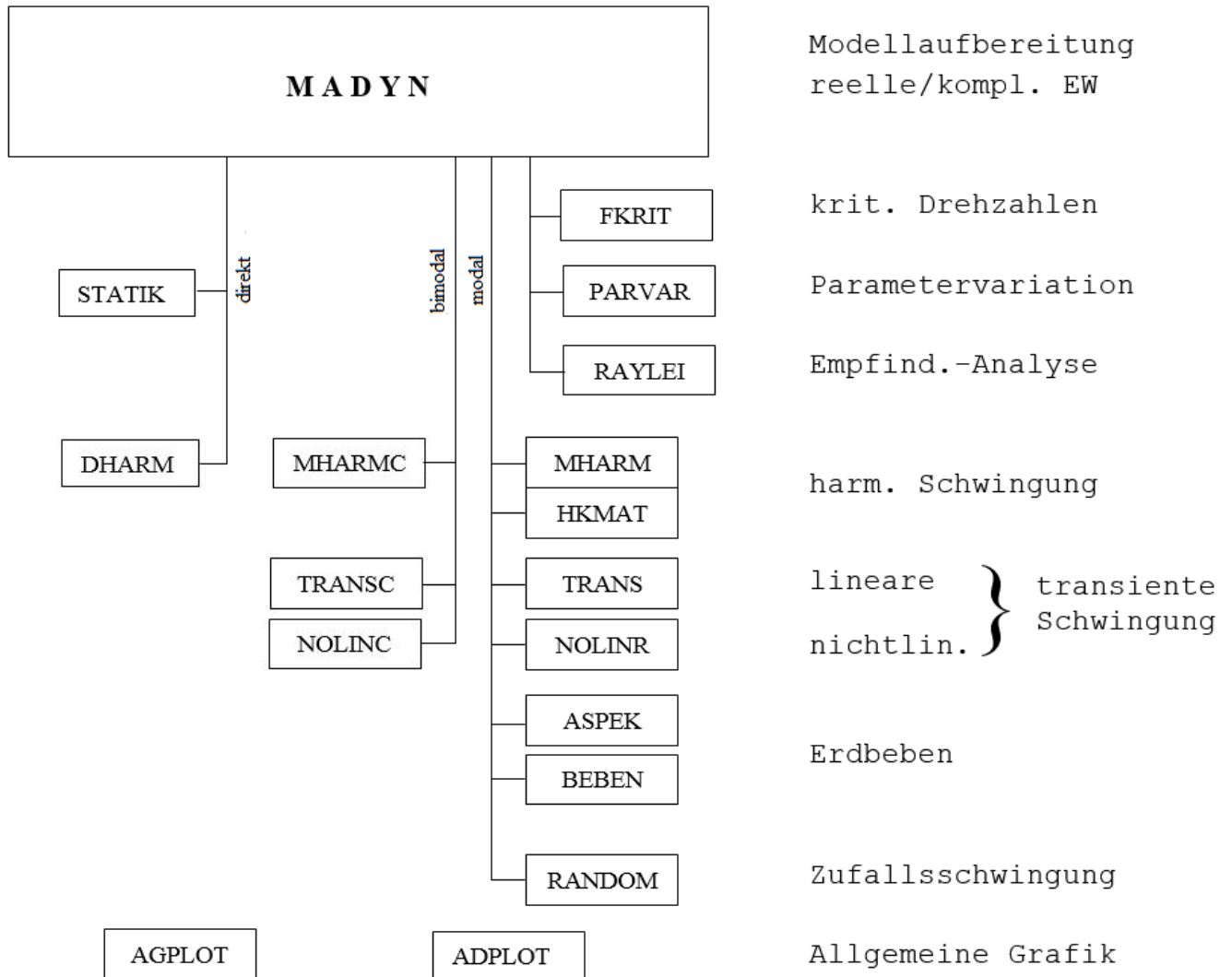
Ingenieur-Büro Klement  
Lerchenweg 2  
D - 65428 Rüsselsheim  
Tel. 06142/55951  
hd.klement@t-online.de

## Was ist MADYN ?

Das Programmsystem MADYN wurde hauptsächlich zur Berechnung von Rotor-Fundament-Systemen entwickelt. Es ist aber so variabel konzipiert, dass es auch für andere Modelle verwendet werden kann, z.B. Stahlbaukonstruktionen oder Rohrleitungen. Es berechnet reelle und komplexe Eigenwerte, sowie harmonische, transiente (lineare und nicht-lineare) und zufallserregte Schwingungen.

### Aufbau des Programmsystems

Das Gesamtsystem besteht aus einer Reihe von Programmen, die jeweils eine spezielle Aufgabe erfüllen (siehe Bild). Die einzelnen Programmteile kommunizieren miteinander über eine Anzahl von Dateien. Die Verwaltung dieser Dateien und der Aufruf der Programme geschieht über das Menüprogramm MADWIN. Es ermöglicht auch die Darstellung der Grafik am Bildschirm.

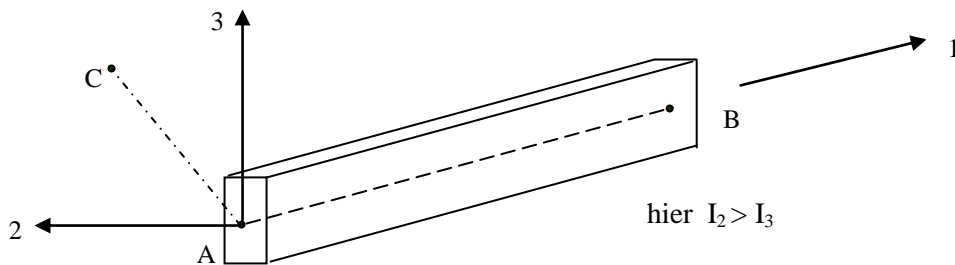


Im Hauptteil werden alle Berechnungen durchgeführt, die mit der Beschreibung des Modells zusammenhängen, d.h. der Aufbau der Strukturmatrizen, Eigenwertberechnungen, Struktur- und Eigenformplot. Äußere Lasten bleiben noch unberücksichtigt. Sie werden erst in den Folgeprogrammen behandelt.

## Elemente

Zum Aufbau der Modelle stehen die folgenden Elemente zur Verfügung, die alle beliebig im Raum orientiert sein können:

- allgemeiner Balken



Er wird durch seine Querschnittsfläche, die Trägheitsmomente, Schubfaktoren, E-Modul, Dichte und Zusatzmassenbelegungen definiert.

- Längs- und Torsionsstab

Er stellt eine vereinfachte Form des allgemeinen Balkens dar. Im Gegensatz zu diesem überträgt er keine Querkräfte und Biegemomente.

- Welle

Auch dieses Element ist eine Sonderform des allgemeinen Balkens. Die Eigenschaften werden hier über den Außen- und Innendurchmesser definiert. Zusätzlich wird die Kreiselwirkung berücksichtigt.

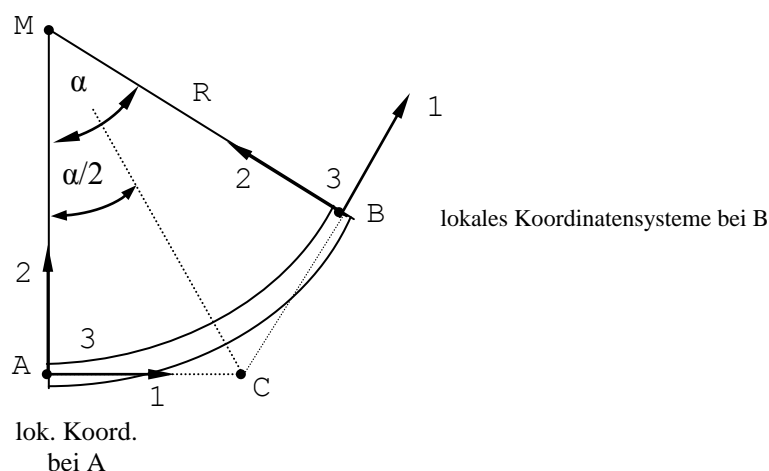
- konische Welle oder Stab

Bei den konischen Elementen werden die Querschnittseigenschaften am Anfang und Ende unterschiedlich vorgegeben. Ansonsten entsprechen sie den vorangehenden Elementen.

- reduzierte Welle

Eine reduzierte Welle besteht aus maximal 20 Teilelementen. Diese werden über ein Reduktionsverfahren zu einem Element zusammengefasst.

- Rohrbogen



Der Rohrbogen hat die Besonderheit, dass sich die Steifigkeit in Abhängigkeit vom Innendruck ändert.

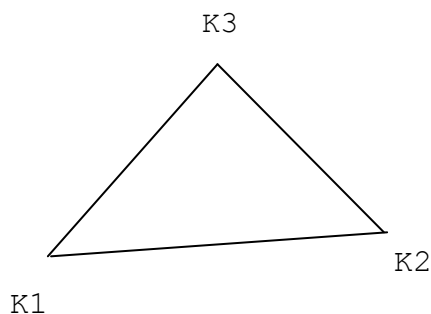
- Feder/Dämpfer  
Das Feder/Dämpfer-Element kann global oder lokal orientiert sein. Seine Steifigkeits- und Dämpfungskonstanten gelten für alle sechs Richtungen (3 Translationen, 3 Rotationen).
- Gleitlager  
Beim Gleitlager können die Steifigkeits- und Dämpfungs-Koeffizienten unsymmetrisch sein. Wenn dies zutrifft, hat es erhebliche Auswirkungen auf die weiteren Berechnungen, da die Eigenwerte auch ohne Dämpfung komplex werden (siehe Eigenwertalgorithmen). Für Unwuchtberechnungen oder bei der Bestimmung von kritischen Drehzahlen können die Gleitlagereigenschaften frequenzabhängig sein.
- Zusatzmassen  
An den Knoten können Zusatzmassen und Massenträgheitsmomente eingegeben werden.
- generalisiertes Element  
Beim generalisierten Element werden die Koeffizienten direkt vom Benutzer vorgegeben. Dadurch lassen sich Sondereffekte darstellen.
- Matrizen-Additionen  
Noch allgemeiner kann man in den Aufbau der Matrizen durch die direkte Vorgabe von Koeffizienten eingreifen.

### **Ergänzende Elemente**

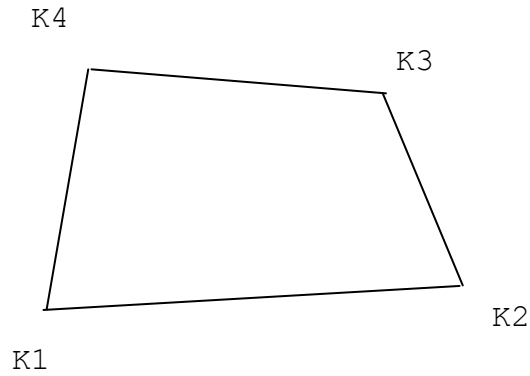
Zusätzlich kann man starre Elemente zur Überbrückung von Abständen verwenden. Mit kinematischen Kopplungen (eine Verschiebung wird als Linearkombination von anderen Verschiebungen definiert) lassen sich Sondereffekte erzielen, z.B. die Abbildung von Getrieben oder die direkte Berechnung von Summen- oder Differenzverschiebungen (Anschlagen von Bauteilen). Die Lagerungsbedingungen dürfen auch in lokalen Koordinaten vorgegeben werden.

### **Elemente ab Version 5**

In Version 5 kommen Platten und Volumenelemente hinzu.

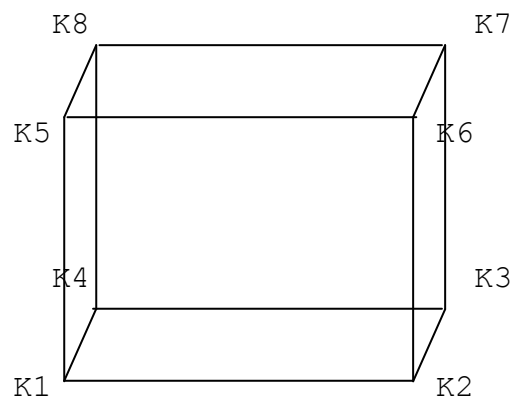


Drei-Knoten Platte



Vier-Knoten-Platte

Platten-Elemente haben wie die Balken 6 Freiheitsgrade pro Knoten.



Die Hexaeder haben nur translatorische Freiheitsgrade (3 FG pro Knoten). Die Elemente können zu Pentaedern, Pyramiden und Tetraedern entarten.

## Matrizen

Aus der Beschreibung der Knoten und Elemente ergeben sich die globalen Matrizen. Folgende Arten sind möglich:

- Steifigkeitsmatrix (symmetrisch oder unsymmetrisch)
- Massenmatrix (diagonal, quasi-diagonal oder symmetrisch)
- Dämpfungsmatrix (symmetrisch oder unsymmetrisch)
- Kreiselmatrix (schiefsymmetrisch)
- Fliehkraftmatrix (symmetrisch)

Die Matrizen werden nach der Skyline-Technik gespeichert, d.h. die Länge der Zeilen und Spalten kann für jeden Freiheitsgrad unterschiedlich sein. Dies reduziert den Speicherbedarf und die Rechenzeiten. Mit Hilfe eines Algorithmus zur Bandweiten-Optimierung kann in die interne Reihenfolge der Knoten eingegriffen werden. Auf Wunsch kann eine Reduktion der Matrizen durchgeführt werden. Hierzu wird das Verfahren von Guyan benutzt.

## Eigenwerte

Im MADYN-Hauptteil stehen vier reelle und zwei komplexe Eigenwertalgorithmen zur Verfügung. Die reellen Algorithmen setzen symmetrische Matrizen voraus und ignorieren die Dämpfungs- und Kreiselmatrix. Dies sind:

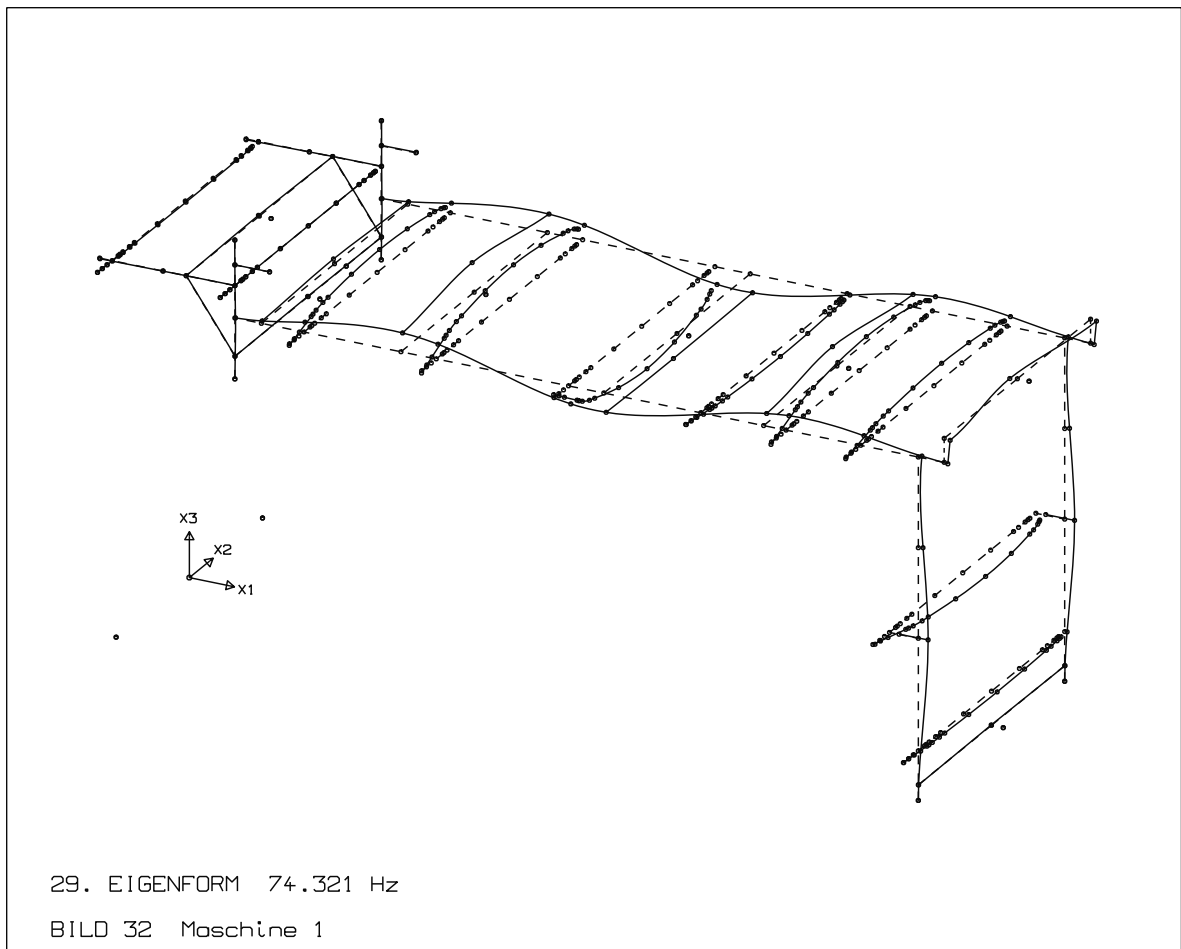
- Jacobi-Verfahren für relativ kleine Modelle (bis ca. 500 Freiheitsgrade, ggf. nach einer Reduktion)
- Housholder-Verfahren für mittelgroße Modelle (bis ca. 2000 Freiheitsgrade)
- simultane Vektoriteration für große Modelle (bis ca. 20 000 FG)
- Unterraum-Iteration für sehr große Modelle

Die komplexen Eigenwerte benutzt man, wenn unsymmetrische Koeffizienten (Gleitlager) oder viskose Dämpfer vorkommen oder die Kreiselwirkung eine dominante Rolle spielt. Es stehen zur Verfügung:

- Hessenberg-Algorithmus für kleine Modelle (bis ca. 500 FG)
- inverse Vektoriteration für größere Modelle

Es werden die Rechts- und Linkseigenvektoren berechnet, um in den Folgeprogrammen die bimodale Berechnung verwenden zu können (Erweiterung der modalen Rechnung auf komplexe Eigenvektoren).

Ergänzend werden die Elementkräfte zu den Eigenvektoren ermittelt, mittlere modale Dämpfungen, Energieverteilungen von Elementgruppen, Gleichgewichtskontrollen und der Gleich-/Gegenlauf von Rotoren.

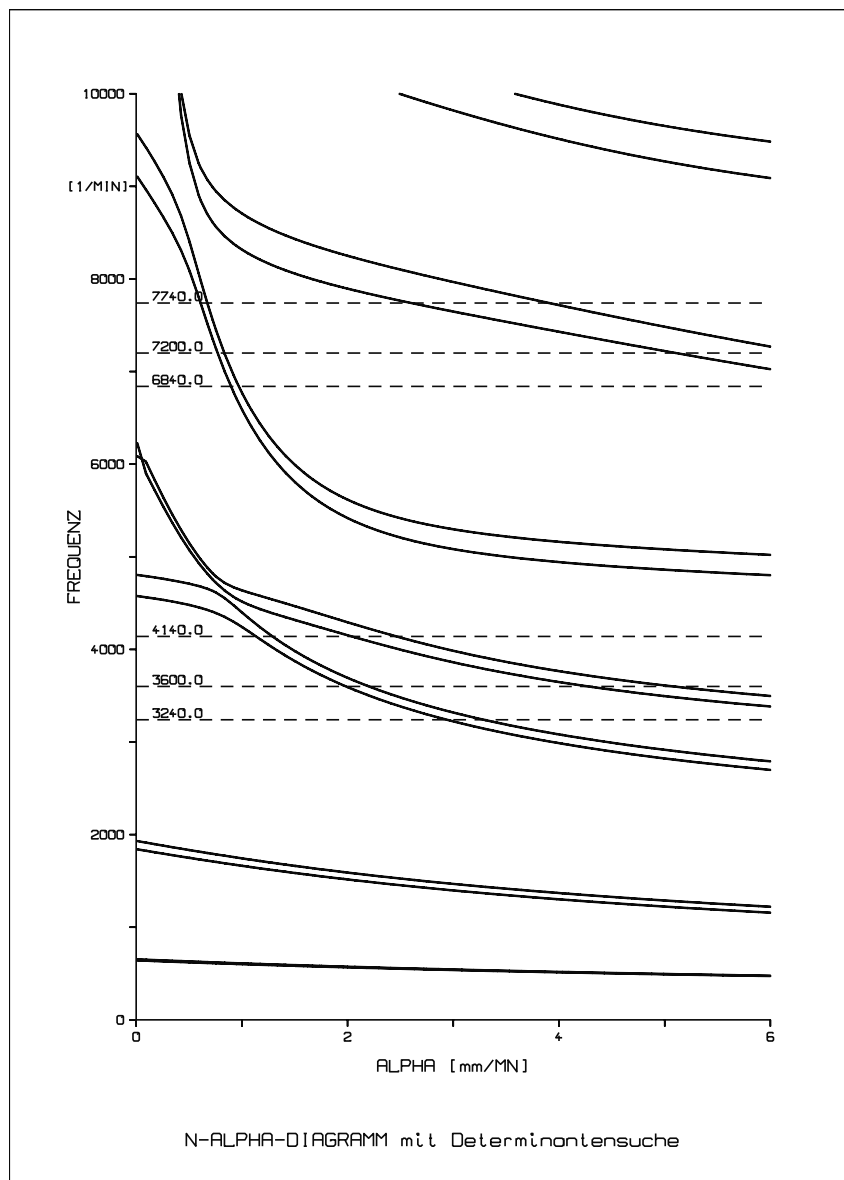


## Ergänzende Analysen

Mit dem Programm FKTRIT lassen sich kritische Drehzahlen berechnen. Es entspricht in seiner Funktion den klassischen Programmen der Rotordynamik, die noch nach dem Übertragungsverfahren arbeiten. Hier wird ein Determinantensuchverfahren eingesetzt.

Mit dem Programm RAYLEI wird eine Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt. Dabei wird mit Hilfe des Rayleigh-Quotienten und vorhandener Eigenvektoren berechnet, wie sich die Eigenfrequenzen ändern, wenn einzelne Elemente oder Gruppen von Elementen ihre Steifigkeit und/oder Masse verändern.

Beim Programm PARVAR wird der Einfluss eines Parameters (Rotordrehzahl, Dämpfung, relative Steifigkeit und/oder Dämpfung ausgewählter Elemente) auf die Eigenwerte untersucht. Dazu stehen drei Eigenwertalgorithmen zur Verfügung: die Determinantensuche, der Hessenberg-Algorithmus und die inverse Vektoriteration. Bei isotrop gelagerten Rotoren kann eine Sonderform der Determinantensuche eingesetzt werden, die wegen dieser speziellen Randbedingung wesentlich schneller ist.



## Statik

Statische Lastfälle sind Knotenkräfte, das Gewicht und Temperaturlasten. Auch die Berechnung ungefesselter Systeme, z.B. Torsion von Rotorsträngen, ist möglich, wenn die äußeren Lasten im Gleichgewicht sind. Aus den vorhandenen Lastfällen können Lastfallkombinationen gebildet werden.

### Stationäre harmonische Schwingungen

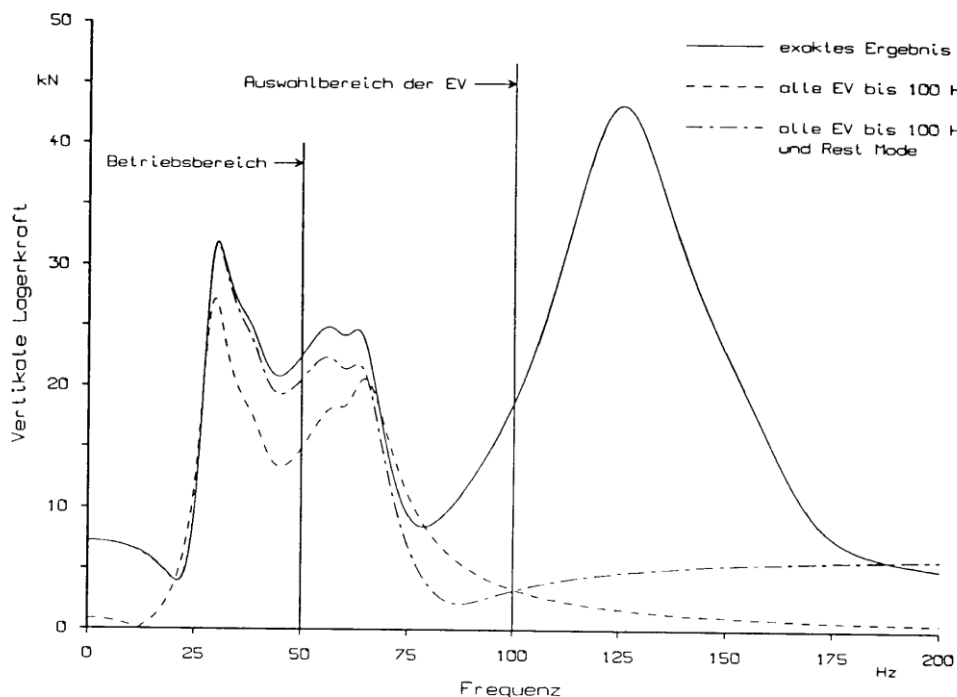
Zur Berechnung der stationären harmonischen Schwingungen (Resonanzkurven) stehen drei verschiedene Programme zur Verfügung, um die jeweils beste Methode einsetzen zu können.

Für konservative Systeme (reelle Eigenwertrechnung war möglich) wird die Lösung modal ermittelt. Die Dämpfung wird hier den einzelnen Eigenformen als modale Dämpfung vorgegeben. Der Einsatz des Restmode-Verfahrens ermöglicht es, mit relativ wenigen Eigenformen im interessierenden Frequenzbereich doch genaue Ergebnisse zu erhalten (s. Bild).

Für nicht-konservative Systeme (komplexe Eigenwertlösung) mit konstanter oder nicht vorhandener Kreiselwirkung verwendet man die bimodale Rechnung. Die Dämpfung ist hier in den Eigenwerten bereits enthalten. Es kann aber eine zusätzliche modale Dämpfung angegeben werden.

Bei frequenzabhängigen Eigenschaften (Gleitlager, Kreiselwirkung) setzt man die direkte Lösung ein (komplexer Gauß-Algorithmus). Statt der modalen Dämpfung kann man hier als Ergänzung eine strukturelle Dämpfung verwenden, die einen ähnlichen Effekt hat.

In allen Fällen sind die Lasten gerichtete harmonische Kräfte, Unwuchten oder Fußpunkterregungen. Die Ergebnisse sind Verschiebungen, Schnittkräfte oder Spannungen als Betrag und Phase.





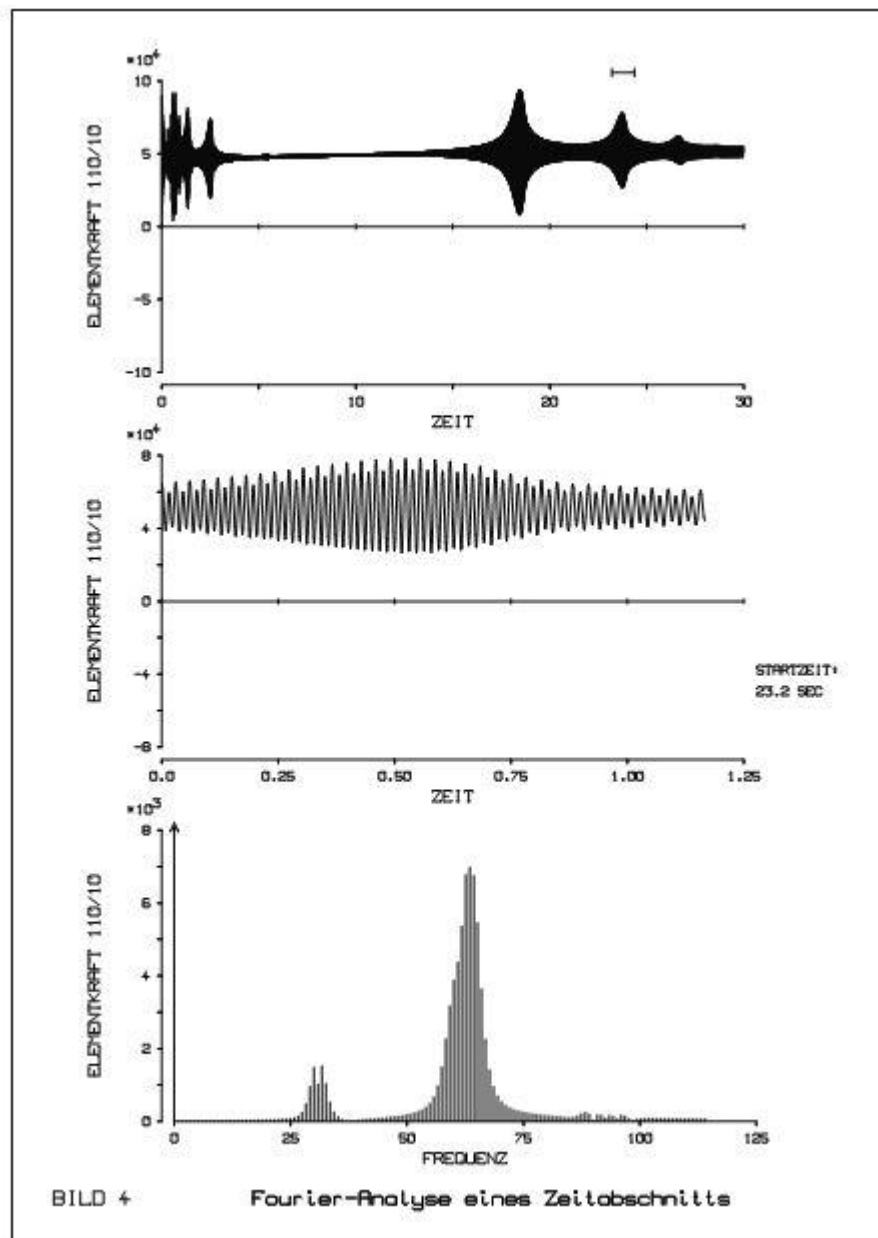
## Transiente Schwingungen

Für transiente Kraft- oder Fußpunkterregung stehen die Programme TRANS und TRANSC zur Verfügung. Etliche Standardfunktionen sind vordefiniert, andere Erregerfunktionen, z.B. Erdbeben, können extern über eine Datei vorgegeben werden. Es sind beliebige Anfangsbedingungen möglich. Die Berechnung kann in einem Folgelauf fortgesetzt werden. Wie oben bei MHARM/C wird auch hier modal oder bimodal gerechnet, mit entsprechender Behandlung der Dämpfung.

Die Ergebnisse sind Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Schnittkräfte und Spannungen als Funktion der Zeit. In einem speziellen Analyseabschnitt kann von den Zeitverläufen eine Fouriertransformation durchgeführt werden, auf Wunsch auch in Ausschnitten.

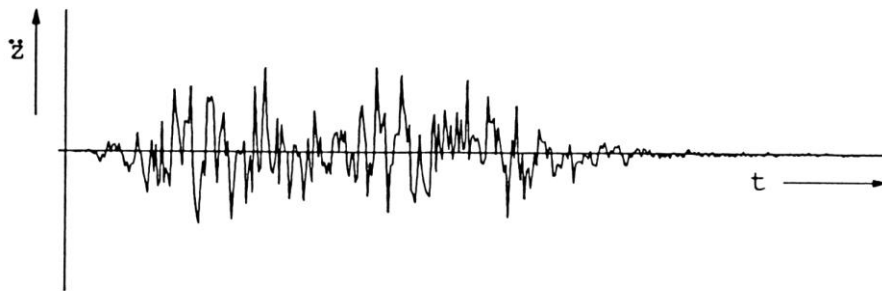
Die gleichen Möglichkeiten bieten die Programme NOLINR und NOLINC, hier jedoch auch für Nichtlinearitäten. Es sind vorgesehen:

- Gleitlager
  - Federn oder Dämpfer mit beliebigen Kennlinien
  - ein- und zwei-dimensionale Coulomb'sche Reibung
  - benutzer-definierte Nichtlinearitäten mit eigenen Unterprogrammen
- Auch hier erfolgt die Lösung modal mit einem Prädiktor/Korrektor-Verfahren. Dadurch kann die Qualität der Lösung überwacht werden.

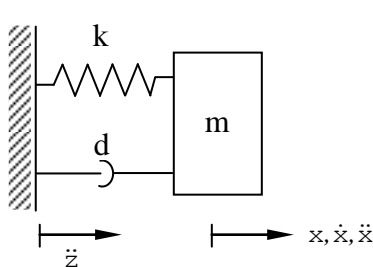


## Antwortspektren

ASPEK berechnet Antwortspektren zu Beschleunigungszeitverläufen, die von TRANS oder NOLIN erstellt wurden oder direkt vorgegeben werden. Neben dem normalen Algorithmus, der auch in anderen Programmen verwendet wird, existiert noch eine schnelle Variante, die bis zu Dämpfungsgraden von etwa 0,05 eingesetzt werden kann. Bei höheren Dämpfungen ist das Ergebnis nur eine Näherung.

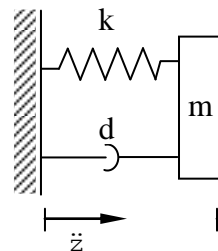


Beschleunigungszeitverlauf  $\ddot{z}(t)$

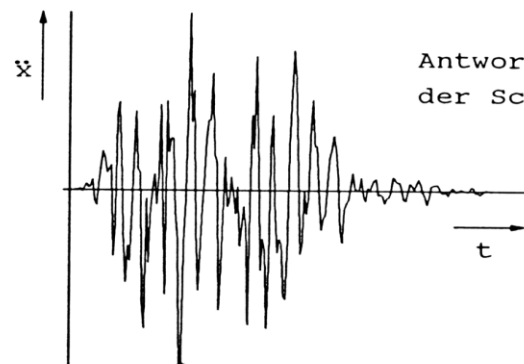
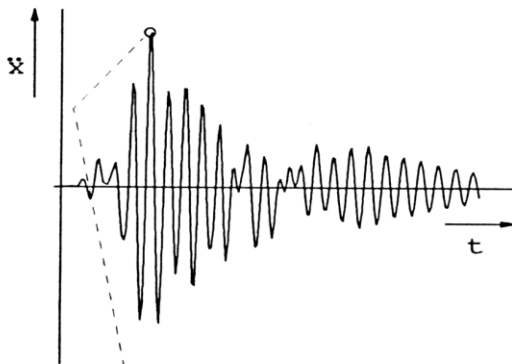


$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

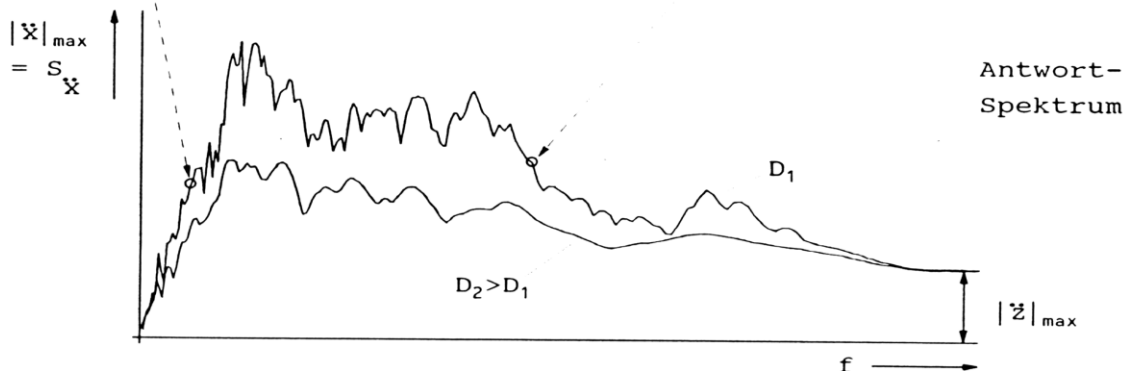
$$D = \frac{d}{2\sqrt{km}}$$



Schwinger



Antwort der Schwinger



Antwort-Spektrum

Definition des Antwortspektrums

## Erdbeben

Für Erdbebenrechnungen nach der Antwortspektrum-Methode steht das Programm BEBEN zur Verfügung. Die Überlagerung der Ergebnisse zu den Eigenformen kann wahlweise absolut, nach der RSS-Formel oder gemischt erfolgen. Die letzte Variante wird benutzt, wenn Eigenfrequenzen gleich oder ähnlich sind. Neben der für Erdbeben üblichen Fußpunkt-erregung kann das Programm auch für Krafterregung eingesetzt werden.

## Zufallsschwingungen

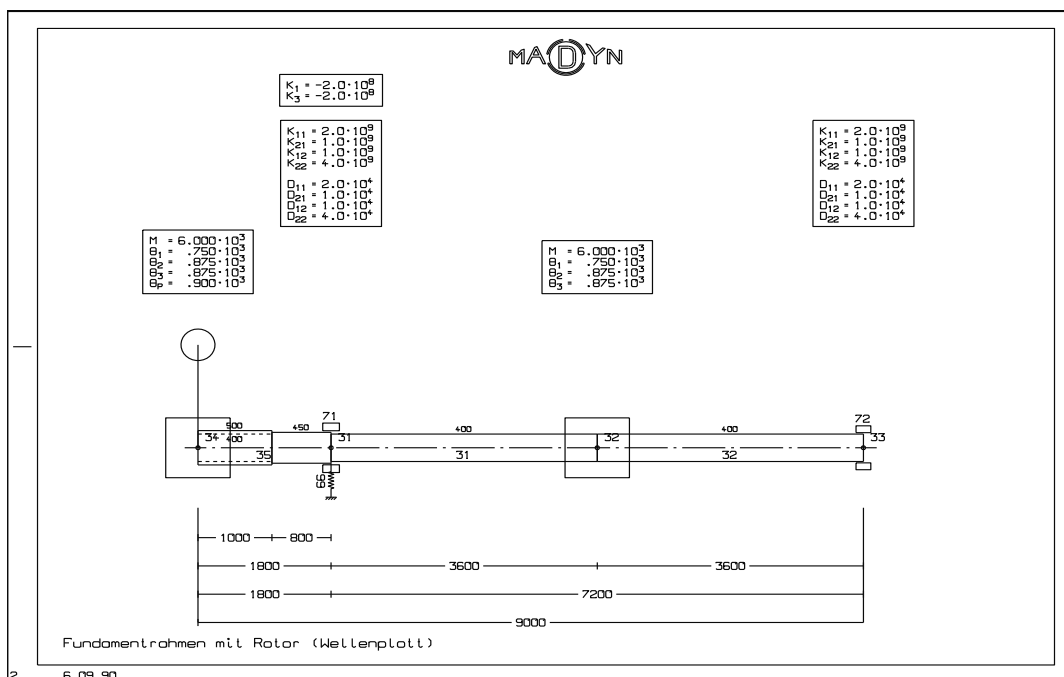
RANDOM berechnet modal die RMS-Antworten auf Erregungen, die in Form von Leistungsdichte- oder Fourier-Spektren vorgegeben werden. In einem Analyseteil werden Zeitverläufe in Spektren umgewandelt und Häufigkeitsverteilungen bestimmt.

## Grafikausgabe

Mit den oben beschriebenen Programmen können bereits alle notwendigen Plots erstellt werden. Man benötigt dazu nur relativ wenig Eingabe-größen, kann die Plots aber nicht individuell gestalten. Dazu gibt es zwei allgemein gehaltene Grafikprogramme.

Mit ADPLOT werden Diagramme verschiedenster Art so gestaltet, wie es sich der Anwender vorstellt. Man kann nahezu jedes Detail gezielt beeinflussen. Skizzen und Texte können hinzugefügt werden. Ergebnisse von verschiedenen Rechnungen lassen sich in einem Bild zusammenfassen. In einem Manipulationsabschnitt können die gespeicherten Vektoren in vielfältiger Art umgerechnet werden.

Mit AGPLOT lassen sich die Strukturen detailliert darstellen, z.B. die Steifigkeits- oder Massenverteilung. Speziell für die Rotordynamik gibt es den Abschnitt "Wellenplot", mit dem der Rotor ohne großen Eingabeaufwand ähnlich wie in einer Zeichnung dargestellt wird.



## Hilfsprogramme

Neben den oben aufgeführten Programmen gibt es noch eine Reihe von Hilfsprogrammen, die speziellen Aufgaben dienen, z.B. berechnet GLKOEf die Gleitlagerkoeffizienten. FILEX listet den Inhalt von Binärdateien auf. POSTB erlaubt die nachträgliche Größenänderungen von Plots mit der Zusammenfassung von mehreren Bildern auf einer Seite.

## Menüprogramm MadWin

Für Windows-Rechner existiert das Menüprogramm MadWin, aus dem heraus die Berechnungsprogramme aufgerufen werden. Das Programm verwaltet auch die von den verschiedenen MADYN-Programmen erzeugten Dateien. Eine wesentliche Funktion ist die Darstellung der Plots am Bildschirm mit Zoom-Möglichkeit. Die neutrale Plotdatei wird für verschiedene Ausgabe-Formate aufbereitet, wie HP-GL, Postscript oder EMF-Dateien oder direkt auf einem Windows-Drucker ausgegeben.

