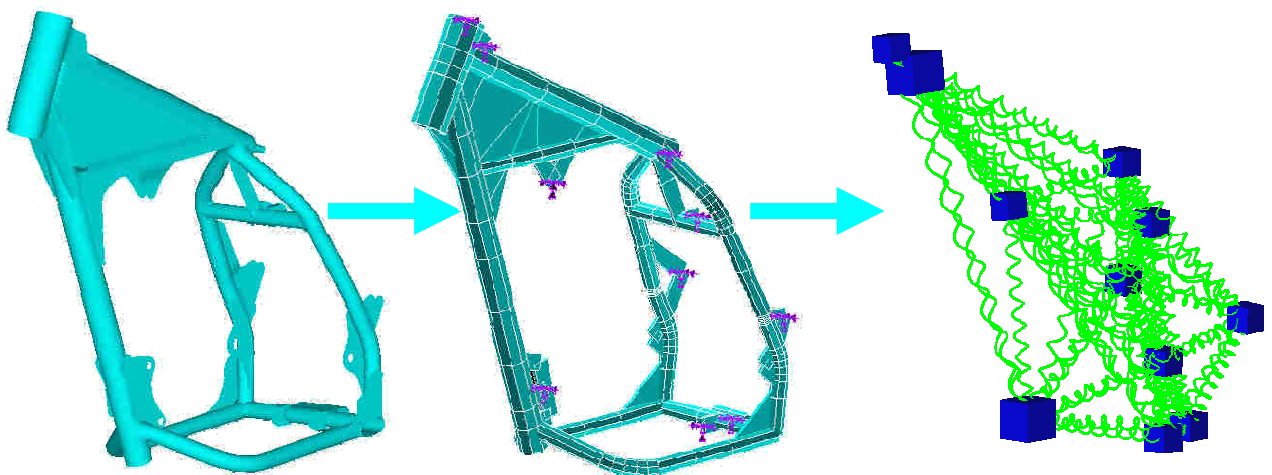


Dokumentation zum Programm

f e M b s
(Version 1.1)

ANSYS → **alaska**



Bearbeiter : Dr.-Ing. Klaus Kaltofen

Institut für Mechatronik an der TU Chemnitz

30.06.2000

0. Vorbemerkung

Die Version 1.1 von *f e M b s* unterscheidet sich von ihrer Vorgängerversion 1.0 dadurch, dass das Starrkörper-Ersatzmodell zusätzlich für das Mehrkörperprogramm **alaska 4.0** /6/ automatisch aufbereitet werden kann.

Außerdem ist es möglich, den Optimierungsparameter ε (siehe Abschnitt 4) für die Kategorien Gesamtmasse, Schwerpunktlage, Trägheitsmomente, Deviationsmomente und modale Massen unterschiedlich zu wichten

1. Problemstellung

Traditionelle Mehrkörperprogramme berechnen das dynamische Verhalten von Modellen, die aus starren Körpern und dazwischen liegenden Weg- oder Kraftkopplungen bestehen. Die Einbeziehung elastischer Teilstrukturen beliebiger Geometrie in das mehrkörperdynamische Berechnungsmodell bereitet Schwierigkeiten, weil zwar die Elastizitätseigenschaften der Struktur, nicht aber ihre Trägheitseigenschaften in ausreichendem Maße berücksichtigt werden können.

Die Finite-Elemente-Methode bietet die Möglichkeit, Bauteile beliebiger Geometrie als Strukturen mit elastischem Materialverhalten zu modellieren und zu berechnen. Die Struktur-Steifigkeitsmatrix ist Ausdruck der Elastizitätseigenschaften und für den Fall einer Berechnung des dynamischen Verhaltens gibt die Struktur-Massenmatrix die Trägheitseigenschaften und die Struktur-Dämpfungsmatrix die Dämpfungseigenschaften der Struktur wieder. Diese FEM-Ergebnisse sollen für eine mehrkörperdynamische Berechnung von Modellen mit elastischen Teilstrukturen genutzt werden. Dabei ist die Übernahme von Steifigkeits- und Dämpfungsmatrix unproblematisch, denn diese können als dreidimensionale Kraftkoppellemente direkt im Mehrkörpermodell benutzt werden.

Problematischer ist dagegen die Übertragung der Trägheitseigenschaften auf das Mehrkörpermodell. Im FE-Modell wird nämlich eine Massenmatrix erzeugt, die voll besetzt ist. Sie kann deshalb nicht direkt im Mehrkörpermodell verwendet werden. Mit *f e M b s* wird ein Weg gefunden, die Masseparameter eines mehrkörperdynamischen Ersatzmodelles der FE-Struktur zu ermitteln. Im Ersatzmodell werden die Trägheitseigenschaften den Knoten zugeordnet. Jeder Knoten wird durch einen Starrkörper - gekennzeichnet durch Masse und Massenträgheitsmomente - ersetzt, und es entsteht ein diskreter Schwinger mit $6 * n$ Freiheitsgraden (n ... Anzahl der Starrkörper)

2. Voraussetzungen, Vorgehensweise

Ausgangspunkt ist das generierte FE-Modell des Bauteiles bzw. der Baugruppe. Das Modell wird im FE-Programm mit Hilfe einer Substruktur-Reduktionstechnik verkleinert, d.h. die Anzahl der Modellfreiheitsgrade wird auf ein für Mehrkörperprogramme vertretbares Maß beschränkt.

Der Anwender definiert im Modell sogenannte Hauptknoten (masternodes). Das sind im allgemeinen mindestens diejenigen Knoten, mit denen die Verbindung der Struktur an seine Umgebung (mit der Struktur verbundene Bauteile) hergestellt wird. Hinzu kommen Knoten an Massekonzentrationen und an solchen Stellen, an denen Verformungen, Spannungen etc. von Interesse sind. Es ist bei der Auswahl dieser Knoten zu beachten, dass nicht alle Knoten diesseits des Schwerpunktes der Struktur liegen. Die Mindestanzahl der Knoten sollte drei sein; bei der Höchstanzahl muss ein ingenieurgemäßer Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen gefunden werden. Eine hohe Anzahl an Knoten und damit Starrkörpern im Ersatzmodell erhöhen zwar die Genauigkeit der Approximation, aber auch der Berechnungsaufwand.

Im FE-Programm sind zu generieren und auf eine oder mehrere externe Dateien zu schreiben :

1. Die Struktur-Steifigkeitsmatrix der ungefesselten Substruktur,
2. die Masseparameter Gesamtmasse, Schwerpunktlage, Trägheits- und Deviationsmomente bezüglich der Schwerachsen,
3. die Lage der Hauptknoten im Strukturkoordinatensystem oder im Schwerpunktkoordinatensystem,
4. die Eigenfrequenzen und dazugehörigen Eigenschwingformen der ungefesselten Struktur, die das stukturdynamische Verhalten (im unteren Frequenzbereich) bestimmen.

Mit Hilfe dieser Daten und einiger (im Abschnitt 4 erläuterten) Eingabeparameter wird in *f e M b s* eine Optimierung durchgeführt, mit dem Ziel,

- die globalen Masseparameter (Gesamtmasse, Schwerpunktlage, Trägheits- und Deviationsmomente bezüglich der Schwerachsen) als Ausdruck der "äußeren" Masseverteilung und
- die modalen Massen der in Frage kommenden Eigenschwingungen als Ausdruck der inneren Masse- und Steifigkeitsverteilung

von reduzierter FE-Struktur und mehrkörperdynamischen Ersatzmodell in Übereinstimmung zu bringen. In der Version 1.1 von *feMbs* wird vorausgesetzt, dass die FE-Strukturen mit **ANSYS** 5.4 /1/ erzeugt und reduziert worden sind und die Mehrkörpermodelle mit **alaska** 3.0 /2/ und/oder **alaska** 4.0 /6/ weiter verarbeitet werden.

3. Mathematische Grundlagen, Lösungsweg

Das Problem lässt sich als lineares Optimierungsproblem unter linearen Nebenbedingungen formulieren: Es wird das Minimum der linearen Zielfunktion

$$F(x) = c^T * x \Rightarrow \min. \quad (1)$$

unter den linearen Nebenbedingungen

$$b_l = \frac{b_{l1}}{b_{l2}} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} * x \leq \frac{b_{u1}}{b_{u2}} = b_u \quad (2)$$

gesucht.

| | | | |
|-------------------|-------|-----|---|
| Hierbei bedeuten: | c | ... | Vektor der Wichtungsfaktoren, (z.B. $c = \{1, 1, 1 \dots, 1\}^T$), |
| | x | ... | Lösungsvektor |
| | b_l | ... | untere Grenze |
| | b_u | ... | obere Grenze |
| | E | ... | Einheitsmatrix |
| | A | ... | Koeffizientenmatrix. |

Die Elemente von x sind die Massen und die Massenträgheitsmomente der Einzelkörper. Der Lösungsvektor hat die Gestalt

$$x = \{m_1, J_1^{xx}, J_1^{yy}, J_1^{zz}, \dots, m_k, J_k^{xx}, J_k^{yy}, J_k^{zz}, \dots, m_n, J_n^{xx}, J_n^{yy}, J_n^{zz}\}^T, \quad (3)$$

| | | | |
|-----|----------|-----|--|
| mit | m | ... | Masse des Einzelkörpers |
| | J^{xx} | ... | MTM des Einzelkörpers um körperfeste x-Achse |
| | J^{yy} | ... | MTM des Einzelkörpers um körperfeste y-Achse |
| | J^{zz} | ... | MTM des Einzelkörpers um körperfeste z-Achse |

Die Dimension des Problems (Anzahl der Unbekannten) beträgt $4*n$, (n ... Anzahl der Starrkörper).

Die Koeffizientenmatrix A setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Bestandteil zusammen. Der statische Anteil kann in einen massengeometrischen und einen geometrischen Teil unterteilt werden; der massengeometrische Teil A_m enthält die Anteile des Einzelkörpers an den globalen Masseparametern, der geometrische Teil A_g resultiert aus den Bedingungen (Dreiecksungleichung) für die Größe der Massenträgheitsmomente eines Körpers untereinander. Der dynamische Teil A_d beinhaltet die Gesetzmäßigkeiten des strukturdynamischen Verhaltens.

$$A = \begin{bmatrix} A_m \\ A_g \\ A_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

Die Teilmatrix \mathbf{A}_m ergibt sich aus den Anteilen aller Einzelkörper an den globalen Masseparametern Gesamtmasse, Schwerpunktlage und Trägheits- bzw. Deviationsmomente bezüglich der Schwereachsen zu:

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ s_1^x & 0 & 0 & 0 & \dots & s_k^x & 0 & 0 & 0 & \dots & s_n^x & 0 & 0 & 0 \\ s_1^y & 0 & 0 & 0 & \dots & s_k^y & 0 & 0 & 0 & \dots & s_n^y & 0 & 0 & 0 \\ s_1^z & 0 & 0 & 0 & \dots & s_k^z & 0 & 0 & 0 & \dots & s_n^z & 0 & 0 & 0 \\ s_1^{y^2} + s_1^{z^2} & 1 & 0 & 0 & \dots & s_k^{y^2} + s_k^{z^2} & 1 & 0 & 0 & \dots & s_n^{y^2} + s_n^{z^2} & 1 & 0 & 0 \\ s_1^{z^2} + s_1^{x^2} & 0 & 1 & 0 & \dots & s_k^{z^2} + s_k^{x^2} & 0 & 1 & 0 & \dots & s_n^{z^2} + s_n^{x^2} & 0 & 1 & 0 \\ s_1^{x^2} + s_1^{y^2} & 0 & 0 & 1 & \dots & s_k^{x^2} + s_k^{y^2} & 0 & 0 & 1 & \dots & s_n^{x^2} + s_n^{y^2} & 0 & 0 & 1 \\ -s_1^y s_1^z & 0 & 0 & 0 & \dots & -s_k^y s_k^z & 0 & 0 & 0 & \dots & -s_n^y s_n^z & 0 & 0 & 0 \\ -s_1^z s_1^x & 0 & 0 & 0 & \dots & -s_k^z s_k^x & 0 & 0 & 0 & \dots & -s_n^z s_n^x & 0 & 0 & 0 \\ -s_1^x s_1^y & 0 & 0 & 0 & \dots & -s_k^x s_k^y & 0 & 0 & 0 & \dots & -s_n^x s_n^y & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

mit $s_k^x = x_k - x_S$... x-Koordinate des k-ten Einzelkörpers bezüglich des Gesamtschwerpunktes
 $s_k^y = y_k - y_S$... y-Koordinate des k-ten Einzelkörpers bezüglich des Gesamtschwerpunktes
 $s_k^z = z_k - z_S$... z-Koordinate des k-ten Einzelkörpers bezüglich des Gesamtschwerpunktes.

Die Anzahl der Zeilen von \mathbf{A}_m ist 10.

Die zusätzlichen Bedingungsgleichungen an die Größen der Massenträgheitsmomente jedes Einzelkörpers lauten :

$$\begin{aligned} J_k^{xx} + J_k^{yy} &\geq J_k^{zz} \\ J_k^{xx} + J_k^{zz} &\geq J_k^{yy} \\ J_k^{yy} + J_k^{zz} &\geq J_k^{xx} \end{aligned} \quad (6)$$

und werden in der Teilmatrix \mathbf{A}_g so formuliert:

$$\mathbf{A}_g = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & & \vdots & & & \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & & \vdots & & & \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Die Teilmatrix \mathbf{A}_g hat 3*n Zeilen .

Im dynamischen Teil \mathbf{A}_d wird das Eigenschwingungsverhalten der ungesesselten Struktur im unteren Frequenzbereich berücksichtigt. Dazu werden die "modalen" Beziehungen der FE-Substruktur

$$\mathbf{v}_i^T \cdot \mathbf{M}_{FE} \cdot \mathbf{v}_j = \begin{cases} \frac{1}{\omega_i^2} (\mathbf{v}_i^T \cdot \mathbf{C}_{FE} \cdot \mathbf{v}_j) & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

mit ω_i ... i-te Eigenkreisfrequenz
 \mathbf{v}_i ... i-te Eigenschwingform
 \mathbf{C}_{FE} ... Struktur-Steifigkeitsmatrix
 \mathbf{M}_{FE} ... Struktur-Massenmatrix

benutzt.

Ersetzt man die Struktur-Massenmatrix \mathbf{M}_{FE} durch die Massenmatrix des diskreten Modelles, \mathbf{M} , ergeben sich weitere Restriktionsgleichungen für die Masseparameter, denn die Beziehung (8) lässt sich in die Form (2) umwandeln, weil die Masseparameter in (8) linear auftreten.. Die Anzahl der Gleichungen beträgt $(m^2+m)/2$, wenn m die Anzahl der berücksichtigten Eigenfrequenzen ist.

\mathbf{M} ergibt sich aus den Massenmatrizen der Einzelkörper, \mathbf{M}_k

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} m_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & m_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & m_k & 0 & 0 & 0 \\ & & & J_k^{xx} & 0 & 0 \\ & & & & J_k^{yy} & 0 \\ \text{symmetrisch} & & & & & J_k^{zz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

durch Aneinanderreihen der \mathbf{M}_k ($k=1 \dots n$) entlang der Hauptdiagonalen:

$$\mathbf{M} = \text{diag} \{ \mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_k, \dots, \mathbf{M}_n \} . \quad (10)$$

Aus jeder der Beziehungen (8) entsteht eine Zeile der Teilkoeffizientenmatrix \mathbf{A}_d . In ANSYS 5.4 sind die Eigenschwingformen \mathbf{v}_i so normiert, dass gilt

$$\mathbf{v}_i^T \cdot \mathbf{M}_{FE} \cdot \mathbf{v}_i = 1, \quad (11)$$

wodurch Gl.(8) vereinfacht wird.

Legt man die Reihenfolge der entstehenden (Un)gleichungen so fest, dass zuerst in aufsteigender Reihenfolge die ($i = j$) - Beziehungen (Rayleigh-Quotienten) und danach die ($i \neq j$) - Beziehungen (Orthogonalität der Eigenschwingformen) in der Reihenfolge : "Kleinster i - Index zuerst (für $i < j$) " auftreten,

(Beispiel: $m=4 \Rightarrow 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4$)

ergibt sich die dynamische Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_d zu :

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--|-----|--------------------|-----|--|-----|------------------------------|-----|--|-----|----------------------|------|
| | | 1 | ... | 4 | ... | 4i+1 | ... | 4(i+1) | ... | 4n-3 | ... | 4n | |
| $\mathbf{A}_d =$ | 1 | $(v_{1,1}^2 + v_{1,2}^2 + v_{1,3}^2)$ | ... | $v_{1,6}^2$ | ... | $(v_{1,6i+1}^2 + v_{1,6i+2}^2 + v_{1,6i+3}^2)$ | ... | $v_{1,6(i+1)}^2$ | ... | $(v_{1,6n-5}^2 + v_{1,6n-4}^2 + v_{1,6n-3}^2)$ | ... | $v_{1,6n}^2$ | (12) |
| | | \vdots | | \vdots | | \vdots | | \vdots | | \vdots | | \vdots | |
| | m | $(v_{m,1}^2 + v_{m,2}^2 + v_{m,3}^2)$ | ... | $v_{m,6}^2$ | ... | $(v_{m,6i+1}^2 + v_{m,6i+2}^2 + v_{m,6i+3}^2)$ | ... | $v_{m,6(i+1)}^2$ | ... | $(v_{m,6n-5}^2 + v_{m,6n-4}^2 + v_{m,6n-3}^2)$ | ... | $v_{m,6n}^2$ | |
| | m+1 | $(v_{1,1}v_{2,1} + v_{1,2}v_{2,2} + v_{1,3}v_{2,3})$ | ... | $v_{1,6}v_{2,6}$ | ... | $(v_{1,6i+1}v_{2,6i+1} + v_{1,6i+2}v_{2,6i+2} + v_{1,6i+3}v_{2,6i+3})$ | ... | $v_{1,6(i+1)}v_{2,6(i+1)}$ | ... | $(v_{1,6n-5}v_{2,6n-5} + v_{1,6n-4}v_{2,6n-4} + v_{1,6n-3}v_{2,6n-3})$ | ... | $v_{1,6n}v_{2,6n}$ | |
| | | \vdots | | \vdots | | \vdots | | \vdots | | \vdots | | \vdots | |
| | $(m^2+m)/2$ | $(v_{m-1,1}v_{m,1} + v_{m-1,2}v_{m,2} + v_{m-1,3}v_{m,3})$ | ... | $v_{m-1,6}v_{m,6}$ | ... | $(v_{m-1,6i+1}v_{m,6i+1} + v_{m-1,6i+2}v_{m,6i+2} + v_{m-1,6i+3}v_{m,6i+3})$ | ... | $v_{m-1,6(i+1)}v_{m,6(i+1)}$ | ... | $(v_{m-1,6n-5}v_{m,6n-5} + v_{m-1,6n-4}v_{m,6n-4} + v_{m-1,6n-3}v_{m,6n-3})$ | ... | $v_{m-1,6n}v_{m,6n}$ | |

| | | |
|---------|-----------|---------|
| $k = 1$ | $k = i+1$ | $k = n$ |
|---------|-----------|---------|

Die Grenzen des Ungleichungssystems (2) b_l und b_u engen den Lösungsraum ein. Bei einer exakten Erfüllung der Forderungen an die Masseparameter würde gelten:

$$b_{l2} = b_{u2} = b_2 = \{m, S^x, S^y, S^z, J^{xx}, J^{yy}, J^{zz}, J^{xy}, J^{xz}, J^{yz}, 0, \dots, 0, \mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_m, 0, \dots, 0\}^T \quad (13)$$

mit

| | | | |
|--|--------------------------|-----|--|
| | m | ... | Gesamtmasse, |
| | $S^x = 0$ | ... | statisches Moment der Gesamtstruktur um x - Schwereachse, |
| | $S^y = 0$ | ... | statisches Moment der Gesamtstruktur um y - Schwereachse, |
| | $S^z = 0$ | ... | statisches Moment der Gesamtstruktur um z - Schwereachse, |
| | J^{xx} | ... | Massenträgheitsmoment der Gesamtstruktur um x - Schwereachse, |
| | J^{yy} | ... | Massenträgheitsmoment der Gesamtstruktur um y - Schwereachse, |
| | J^{zz} | ... | Massenträgheitsmoment der Gesamtstruktur um z - Schwereachse, |
| | J^{xy}, J^{xz}, J^{yz} | ... | Deviationsmomente der Gesamtstruktur um die Schwereachsen, |
| | μ_i | ... | i-te modale Masse ($\mu_i = 1/\omega_i^2 * (v_i^T \cdot C \cdot v_i)$) |

Die exakte Erfüllung aller Forderungen ist im Allgemeinen nicht möglich. Im Laufe einer iterativen Lösung werden deshalb die beiden Grenzvektoren b_{l2} und b_{u2} mit einer Toleranz ϵ modifiziert

$$\left. \begin{aligned} b_{l2} &= (1 - \epsilon) * b_2 - \epsilon \\ b_{u2} &= (1 + \epsilon) * b_2 + \epsilon, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

die am Beginn der Berechnung groß ist (z.B.: $\epsilon = 1$) und, wenn für Gl.(2) eine Lösung existiert, so lange verkleinert wird, bis die geforderte Genauigkeit erreicht ist.

Als zusätzliche Restriktionen werden noch berücksichtigt, dass Massen und MTM der Einzelkörper einerseits nicht negativ und andererseits nicht größer als die jeweiligen globalen Parameter sein dürfen. ($b_{l1} \geq 0, b_{u1} \leq \{m, J\}$)

Sind die Ergebnisse der Optimierungsrechnung nicht befriedigend, d.h. der geforderte ε -Wert wird nicht erreicht (Er sollte am Ende kleiner als ca. 0.1 sein.), kann die Schwerpunktlage der Einzelkörper gegenüber den ursprünglichen Knotenkoordinaten variiert werden. Daraus resultiert eine veränderte Massenmatrix, denn der Anteil des k-ten Einzelkörpers an der Gesamt-Massenmatrix lautet nunmehr:

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} m_k & 0 & 0 & 0 & m_k \cdot z_k & -m_k \cdot y_k \\ & m_k & 0 & -m_k \cdot z_k & 0 & m_k \cdot x_k \\ & & m_k & m_k \cdot y_k & -m_k \cdot x_k & 0 \\ & & & J_k^{xx} + m_k \cdot (y_k^2 + z_k^2) & -m_k \cdot x_k \cdot y_k & -m_k \cdot x_k \cdot z_k \\ \text{symmetrisch} & & & & J_k^{yy} + m_k \cdot (z_k^2 + x_k^2) & -m_k \cdot y_k \cdot z_k \\ & & & & & J_k^{zz} + m_k \cdot (x_k^2 + y_k^2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

mit x_k ... Schwerpunktlage des k-ten Einzelkörpers gegenüber dem k-ten Knoten in x-Richtung
 y_k ... Schwerpunktlage des k-ten Einzelkörpers gegenüber dem k-ten Knoten in y-Richtung
 z_k ... Schwerpunktlage des k-ten Einzelkörpers gegenüber dem k-ten Knoten in z-Richtung.

Die Korrektur der einzelnen Schwerpunktlagen erfolgt in folgender Art und Weise :

Ist z.B. das statische Moment S_x für den Abbruch verantwortlich, werden bei $S_x < 0$ (>0) die Schwerpunktkoordinaten der Einzelstarrkörper in positive (negative) x-Richtung verschoben, usw. Liegt die Abbruchursache z.B. in einem zu großen Massenträgheitsmoment J^{yy} , dann sind die x- und z- Abstände aller Starrkörper zum Gesamtschwerpunkt zu verringern, die Einzelschwerpunkte praktisch nach "innen" zu verschieben. Analog ist die Vorgehensweise bei der Variation der Deviationsmomente.

Nach einer solchen Schwerpunktverschiebung ist die Teilkoeffizientenmatrix \mathbf{A}_m (Gl.5) neu aufzubauen, jedoch mit den aktualisierten Schwerpunktkoordinaten x_k, y_k, z_k (vgl. Gl. 5). Den Elementen der Teilmatrix \mathbf{A}_d (Gl. 12) sind durch die Entdiagonalisierung der \mathbf{M}_k (Gl. 15) folgende Zusatzterme $\mathbf{a}_d^{r,s}$ zu addieren:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_d^{r,s} = & v_{j,6k-5} \cdot (z_k \cdot v_{i,6k-1} - y_k \cdot v_{i,6k}) + v_{j,6k-4} \cdot (-z_k \cdot v_{i,6k-2} + x_k \cdot v_{i,6k}) + v_{j,6k-3} \cdot (x_k \cdot v_{i,6k-2} - y_k \cdot v_{i,6k-1}) + \\ & + v_{j,6k-2} \cdot \left[-z_k \cdot v_{i,6k-4} + y_k \cdot v_{i,6k-3} + (y_k^2 + z_k^2) \cdot v_{i,6k-2} \quad - x_k \cdot y_k \cdot v_{i,6k-1} \quad - x_k \cdot z_k \cdot v_{i,6k} \right] + \\ & + v_{j,6k-1} \cdot \left[z_k \cdot v_{i,6k-5} - x_k \cdot v_{i,6k-3} \quad - x_k \cdot y_k \cdot v_{i,6k-2} + (z_k^2 + x_k^2) \cdot v_{i,6k-1} \quad - y_k \cdot z_k \cdot v_{i,6k} \right] + \\ & + v_{j,6k} \cdot \left[-y_k \cdot v_{i,6k-5} + x_k \cdot v_{i,6k-4} \quad - x_k \cdot z_k \cdot v_{i,6k-2} \quad - y_k \cdot z_k \cdot v_{i,6k-1} + (x_k^2 + y_k^2) \cdot v_{i,6k} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

mit k ... Nr. des Einzelkörpers $(1 \leq k \leq n)$,
 i, j ... Nr. der Eigenschwingformen $(1 \leq i, j \leq m)$,
 s ... Spaltenindex $(s = 4k-3)$,
 r ... Zeilenindex $r = \begin{cases} (i+j)/2 & \text{für } i = j \\ m + m(i-1) - (i^2+i)/2 + j & \text{für } j > i. \end{cases}$

Mit diesen veränderten Koeffizientenmatrizen wird nun eine erneute "innere" Optimierung (d.h. Suche nach dem minimalen ε) durchgeführt. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis die geforderte ε -Toleranz erreicht wird.

4. Eingabeparameter

Die Eingabedatei wird als Textdatei mit den Extensionen ".fms" oder ".oma" editiert und im aktuellen Arbeitsverzeichnis gespeichert. Die Eingabe ist formatgebunden, die Daten gliedern sich in einen generellen und in einen ANSYS 5.4-spezifischen Teil. Der generelle Teil besteht aus zwei Zeilen. In der ersten Datenzeile sind 10 Integer-(Format I4) und 5 Real-Größen (Format E8.0), in der zweiten Datenzeile 4 Real-Größen (Format E8.0) enthalten. Der ANSYS 5.4-spezifische Teil besteht aus drei Dateinamen (Format A80) (vgl. Abb.1)

```

feMbs1.1 - Eingabedatei
nm| nf|kar|out| in|nor|fem|mbs| zf|mod| eps_0 | pro   |r_kon  |f_fakt | steif |
12  4  2  5  20          -1  7  0
  ema | esp  |   etm |  edm  | efq  |
0.25  0.8   0.75  1.0   0.7
rahneu_c
rahneu_n
rahneu_6v
  
```

Abb. 1: Beispiel einer *feMbs1.1* -Eingabedatei

Die allgemeinen Parameter der ersten Datenzeile haben folgende Bedeutung::

| | | |
|--------------|-----|---|
| nm | ... | Anzahl der starren Körper (entspricht der Anzahl der Hauptknoten) |
| nf | ... | Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenschwingungen (Voreinstellung : 0). |
| kar | ... | Art der Rechnung : 0 ... Statik (Nur A_m und A_g (Gln. (5) und (7)) werden aufgebaut.) 1 ... Dynamik (Nur A_g (Gln. (7) und A_d (Gl. (12)) werden generiert.) 2 ... Statik und Dynamik |
| | | (Voreinstellung : 0) |
| out | ... | Anzahl der Iterationsschleifen der äußeren Optimierung zur Variation der Schwerpunktlagen der Einzelkörper (Voreinstellung : 0) |
| in | ... | Anzahl der Iterationsschleifen der inneren Optimierung zur Verminderung des Optimierungsparameters ϵ (vgl. Gl.(14) (Voreinstellung : 10) |
| nor | ... | Normierungsart der Modalmatrix (Voreinstellung : 0 ... Massenmatrix-normiert) |
| fem | ... | FEM-Code 0 ... ANSYS 5.4 |
| mbs | ... | MBS-Code 0 ... alaska 3.0 1 ... alaska 4.0 -1... alaska 3.0 und alaska 4.0 |
| zf | ... | Art der Zielfunktion: 0 ... minimale Massen und minimale MTM 1 ... maximale Massen und maximale MTM 2 ... minimale Massen und maximale MTM 3 ... maximale Massen und minimale MTM 4 ... minimale Massen 5 ... maximale Massen 6 ... maximale MTM 7 ... minimale MTM |
| | | (Voreinstellung : 0) |
| mod | ... | Modifikationsparameter : 0 ... Ergebnisse werden original übernommen 1 ... Ergebnisse werden nach der Berechnung in der Weise modifiziert, dass die Einzel-MTM proportional zu den ermittelten Massen aufgeteilt werden. |
| | | (Voreinstellung : 0) |
| eps_0 | ... | Optimierungsparameter zu Beginn der Berechnung (Voreinstellung : 1.0) |
| pro | ... | prozentualer Anteil der kleinsten Teilmasse an der Gesamtmasse (Voreinstellung : 1.0) |
| r_kon | ... | Maß für die Abtastdichte im Suchgebiet 0.00 ... geringe Abtastdichte . . 0.99 ... hohe Abtastdichte |
| | | (Voreinstellung : 0.0) |

- f_fact** ... Formparameter, der das minimale Verhältnis der drei MTM der Einzelkörper begrenzt.
 0.0 ... Verhältnisse sind nicht begrenzt
 .
 .
 1.0 ... alle drei MTM sind gleich groß
 (Voreinstellung : **0.5**)
- stef** ... Steifheitsparameter : Gibt eine Abschätzung für den Minimalwert des Verhältnisses von höchster einzuhaltender zu höchster im Modell enthaltener Eigenfrequenz an:
 0.0 ... höchste Modell-Eigenfrequenz wird nicht begrenzt
 .
 .
 1.0 ... höchste Modell-Eigenfrequenz und höchste interessierende Eigenfrequenz sind gleich groß
 (Voreinstellung : **0.01**)

Die allgemeinen Parameter der zweiten Datenzeile haben folgende Bedeutung::

- ema** ... Wichtungsfaktor für die Genauigkeit der Optimierung der Gesamtmasse
 1.e-6 ... Gesamtmasse wird sehr genau angenähert
 .
 0.25 ... Gesamtmasse wird normal genau angenähert
 .
 1.0 ... Gesamtmasse wird ungenau angenähert
 (Voreinstellung : **0.25**)
- esp** ... Wichtungsfaktor für die Genauigkeit der Optimierung der Schwerpunktlage
 1.e-6 ... Schwerpunktlage wird sehr genau angenähert
 .
 .
 1.0 ... Schwerpunktlage wird normal genau angenähert
 (Voreinstellung : **1.0**)
- etm** ... Wichtungsfaktor für die Genauigkeit der Optimierung der Trägheitsmomente
 1.e-6 ... Trägheitsmomente werden sehr genau angenähert
 .
 .
 1.0 ... Trägheitsmomente werden normal genau angenähert
 (Voreinstellung : **1.0**)
- edm** ... Wichtungsfaktor für die Genauigkeit der Optimierung der Deviationsmomente
 1.e-6 ... Deviationsmomente werden sehr genau angenähert
 .
 .
 1.0 ... Deviationsmomente werden normal genau angenähert
 (Voreinstellung : **1.0**)
- efq** ... Wichtungsfaktor für die Genauigkeit der Optimierung der modalen Massen
 1.e-6 ... modale Massen werden sehr genau angenähert
 .
 .
 1.0 ... modale Massen werden normal genau angenähert
 (Voreinstellung : **1.0**)

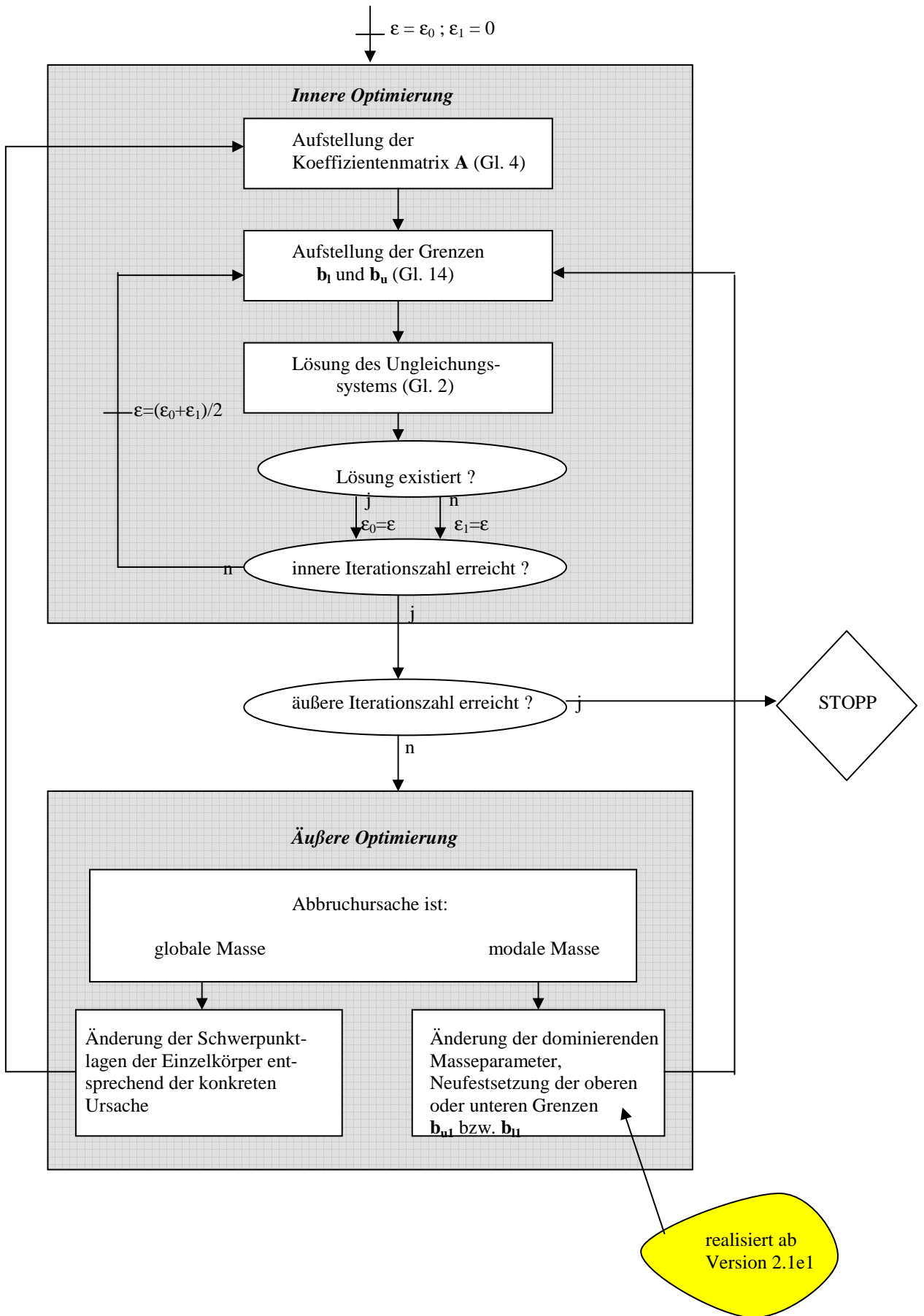
Die ANSYS 5.4-spezifischen Eingabeparameter sind:

<name1> ... Name der ".lis" -Datei, welche die globalen Masseparameter und die Steifigkeitsmatrix der FE-Struktur enthält
<name2>... Name der ".lis" -Datei, welche die Knotennummern und die Knotenkoordinaten enthält
<name3> ... Name der ".lis" -Datei, welche die Eigenschwingformen der FE-Struktur enthält.

Die Erzeugung dieser Dateien kann Anlage 1 entnommen werden. Dort sind die nötigen (kommentierten) Batch-sequenzen von ANSYS 5.4 aufgeführt.

5. Programmablauf

feMbs 1.1 ist ein Windows-Programm. Die oben beschriebene Eingabedatei (<name>.fms) kann mittels "drag&drop" auf das *feMbs*-Icon gezogen werden. Damit beginnt die Berechnung, und ihr Fortschritt wird durch eine Laufleiste angezeigt. Kernstück des Lösungsalgorithmus ist eine robuste und zuverlässige Optimierungsroutine einer kommerziellen Programmbibliothek /4/, /5/. Mit ihr wird das Gleichungssystem (2) zu jedem Iterationsschritt gelöst. Der grobe Programmablauf wird in Abbildung 2 vorgestellt.



f e M b s 1.1 erzeugt folgende Ergebnisdateien im aktuellen Arbeitsverzeichnis:

<name>.lst ... enthält die Ergebnisse der Optimierungsrechnung (vgl. Abbildung 3)
 <name>.dat ... enthält alle alaska 3.0-Modelldaten
 <name>.apj ... alaska 3.0-Projektdatei
 <name>.err ... enthält den Rückkehrcode der letzten Berechnung
 <name>.mdl ... alaska 4.0-Eingabedatei
 <name1>._c_ ... enthält die Steifigkeitsmatrix **C** (für alaska 4.0)

```

f e M b s - Rechnung vom : 24.05.2000 um 08:48:52 Uhr

Programmversion : 1.1 ( 20000930 )
Inputfilename : D:\Users\KlausK\feMbs11\ala4_Bsp\Skorpion\Rahmen\rahneu.fms
Anzahl Massen : 12
Anzahl Eigenvektoren : 4
Art der Rechnung : 2
FEM-Code : Ansys 5.4
MBS-Code : alaska 4.0
Normierung der Modalmatrix : 0
Zielfunktion : 7
Modifikationsparameter : 0
Optimierungsparameter eps (Beginn) : 0.1200000000000000
Wert der kleinsten Masse (%) : 0.7500000000000000
Abtastparameter : 0.9850000000000000
Formparameter : 0.8000000000000000
Steifheitsparameter : 2.0000000000000000E-02

Optimierungsparameter eps (Ende ) : 8.1554625106226006E-02
Abbruchursache : 4 . EF

      globale Massen      |      modale Massen
      Vorgabe | Ergebnis |      Vorgabe | Ergebnis
-----|-----|-----|-----
M | 10.5230 | 10.3085 | mue( 1) | 1.0000 | 0.9270
S_x | 0.0000 | 0.0816 | mue( 2) | 1.0000 | 0.9184
S_y | 0.0000 | -0.0019 | mue( 3) | 1.0000 | 1.0816
S_z | 0.0000 | 0.0816 | mue( 4) | 1.0000 | 0.9184
J_xx | 0.3595 | 0.3583
J_yy | 0.9233 | 1.0802
J_zz | 0.7626 | 0.7673
J_xy | 0.0000 | 0.0004
J_xz | 0.3223 | 0.4224
J_yz | -0.0001 | -0.0006

E r g e b n i s s e :

Koerper      1      2      3      4      5      6
Knoten      1     12     13     19     28     29

m      3.057945 0.078922 0.340661 2.617873 0.078922 0.078922
J_xx    0.000012 0.000012 0.000012 0.000012 0.000012 0.000012
J_yy    0.000009 0.000009 0.000009 0.000009 0.000009 0.000009
J_zz    0.000012 0.000012 0.000012 0.000012 0.000012 0.000012
x_0     0.000000 0.030000 0.000000 0.050748 -0.143680 -0.143680
y_0     0.000000 0.000000 -0.006000 0.000000 -0.121000 0.121000
z_0     0.000000 -0.150000 -0.119150 0.135330 0.302520 0.302520
x      -0.018536 0.008862 -0.018536 0.027811 -0.149755 -0.149755
y      0.000000 0.000000 -0.006000 0.000000 -0.121000 0.121000
z      0.015280 -0.121711 -0.093536 0.138874 0.291564 0.291564
d_x     -0.018536 -0.021138 -0.018536 -0.022937 -0.006075 -0.006075
d_y     0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
d_z     0.015280 0.028289 0.025614 0.003544 -0.010956 -0.010956

Koerper      7      8      9      10     11     12
Knoten      39     49     58     76     135    136

m      0.078922 3.421309 0.078922 0.318204 0.078922 0.078922
J_xx    0.000012 0.029947 0.000012 0.000012 0.000012 0.000012
J_yy    0.000009 0.025360 0.000009 0.000009 0.000009 0.000009
J_zz    0.000012 0.031700 0.000012 0.000012 0.000012 0.000012
x_0     -0.365700 -0.598770 -0.544600 -0.347000 0.027693 0.027693
y_0     0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.117000 -0.117000
z_0     0.290150 0.433260 0.435780 -0.046000 0.196230 0.196230
x      -0.352520 -0.565377 -0.515905 -0.335442 0.006755 0.006755
y      0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.117000 -0.117000
z      0.280267 0.410965 0.413267 -0.026730 0.194492 0.194492
d_x     0.013180 0.033393 0.028695 0.011558 -0.020938 -0.020938
d_y     0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
d_z     -0.009883 -0.022295 -0.022513 0.019270 -0.001738 -0.001738

( Rueckkehrcode : 0 )
  
```

Abb. 3: Beispiel einer *f e M b s 1.1*-Ausgabedatei

Mit den beiden für alaska 3.0 automatisch generierten Ergebnisdateien $\langle name \rangle .dat$ und $\langle name \rangle .apj$ kann (durch Doppelklick auf $\langle name \rangle .apj$ oder "drag&drop" von $\langle name \rangle .apj$ auf das alaska3.0-icon) eine sofortige Überprüfung der Modelltopologie und des Eigenschwingungsverhaltens erfolgen, indem in alaska3.0 über die Aktionen

- Modell einlesen,
- Berechnung und
- Ergebnisse
 Visualisierung.

das Mehrkörper-Ersatzmodell generiert und die Eigenschwingformen der interessierenden Eigenfrequenzen berechnet und gezeigt werden

Analog hierzu kann in alaska 4.0 das automatisch generierte $\langle name \rangle .mdl$ -File direkt als Eingabedatei benutzt werden (File→Open Projekt). Die weitere Vorgehensweise in alaska4.0 ist /6/ zu entnehmen.

Die Einzelstarrkörper sind als Würfel, deren Kantenlängen mit der Größe der errechneten Masse korrelieren, dargestellt; die Steifigkeitsmatrix wird durch Federn zwischen allen Körpern symbolisiert. Fallen die Schwerpunktlagen der Einzelkörper nicht mit den Knotenkoordinaten zusammen, werden die entsprechenden Exzentrizitäten durch Zylinder dargestellt.

5. Hinweise zur *f e M b s* - Nutzung

1. Die Dateien **salflibc.dll** und **ftn90.dll** müssen sich mit **feMbs.exe** im gleichen Verzeichnis befinden.
2. Es dürfen nicht mehr als 50 Einzelkörper und/oder 10 Eigenfrequenzen in die Rechnung einbezogen werden.
3. Eine erste Untersuchung sollte mit den voreingestellten Eingabewerten erfolgen. Die automatische Generierung des Mehrkörper-Modelles erlaubt die sofortige Überprüfung der Topologie und des dynamischen Verhaltens.
4. Soll das dynamische Verhalten bei der Optimierung mit berücksichtigt werden ($kar > 0$), empfiehlt es sich, die Anzahl der einbezogenen Eigenfrequenzen langsam zu steigern. Brauchbare Ergebnisse kommen dann zustande, wenn der Optimierungsparameter ϵ am Ende der Rechnung kleiner als zirka 0.1 ist.
5. Bei der Überprüfung der Eigenfrequenzen und Schwingformen kann sich herausstellen, dass zwischen den gewünschten Eigenfrequenzen auch noch zusätzliche, in der eigentlichen Struktur nicht vorhandene Eigenschwingungen vorhanden sind. Um diese zu eliminieren, sollten die Eingabeparameter *zf*, *pro* und *f_fakt* (vgl. Abschnitt 4) variiert werden. Da im Regelfall zu hohe MTM der Einzelkörper für diese "Zwischeneigenfrequenzen" verantwortlich sind, kann der Anwender mit dem Festlegen von *zf* auf 3, 7 oder 5 und dem Erhöhen von *pro* und *f_fakt* darauf hinwirken, dass die "Eigenträgheitsmomente" verringert werden.
6. *f e M b s 1.1* liefert auch brauchbare Ergebnisse, wenn nur das dynamische Verhalten ($kar=1$) berücksichtigt wird. Dann müssen allerdings die sechs Starrkörperformen (der "Null"-Eigenfrequenzen des ungefesselten FE-Modelles) mit einbezogen werden.
7. Das Einschalten der äußeren Optimierung, also die Verschiebung der Schwerpunktkoordinaten der Einzelkörper gegenüber den Knotenkoordinaten, sollte erst dann erfolgen, wenn ohne diese Option kein befriedigendes Ergebnis erzielt werden konnte.

6. Literatur

- /1/ ANSYS-Benutzerhandbuch Revision 5.0, CAD-FEM GmbH Gräding, 1994
- /2/ alaska-Benutzerhandbuch, Institut für Mechatronik, Chemnitz, 1995
- /3/ NAG Fortran Library, The Numerical Algorithms Group Ltd., Oxford, UK, 1997,
<http://www.nag.co.uk/numeric/FLOLCH/mk18/e/E04MFF.html>
- /4/ Lüder, R., Zur Synthese periodischer Bewegungsgesetze von Mechanismen unter Berücksichtigung von Elastizität und Spiel, VDI-Fortschrittsberichte, R. 11, Nr.225, VDI-Verlag Düsseldorf, 1995
- /5/ mhsl-Programmbeschreibung,
<http://www.mbl.tu-chemnitz.de/rock/MHSL/mhsl.html>
- /6/ alaska4-Handbuch, Institut für Mechatronik, Chemnitz, 2000

```

C FE- Modellgenerierung ist abgeschlossen.
C Schreiben der Gesamtträgheitsdaten und der Steifigkeitsmatrix auf file <name1>.lis
C
CC im Programmteil solution : Analysotyp substructuring
CC
/SOLU
ANTYPE, SUBSTR
CC
CC Auswahl der Masterknoten
CC
M, P, ALL
CC
CC Auswahl der Ergebnisdatei <namesub>.SUB und der Ausgabeparameter
CC
SEOPT, <namesub>, 1, 1
CC
CC Umlenken der Ergebnisausgabe
CC
/OUTPUT, <name1>, LIS
CC
CC Lösung
CC
SOLVE
CC
CC Umlenkung der Ausgabe auf das Output-Fenster
CC
/OUTPUT
C
C Schreiben von Numerierung und Lokalisation der Masterknoten auf eine Datei <name2>.lis
C
CC Auswahl aller Masterknoten
CC
NSEL, , M, , ALL
NLIST, ALL
CC
CC Speichern der Daten auf eine Datei <name2>.lis
CC
File
    Save As
        <name2>.lis
C
C Ermittlung von Eigenfrequenzen und -schwingformen der Substruktur und Schreiben der Ergebnisse auf eine Datei <name3>.lis
C
CC Neustart,
CC Elementtyp Superelement festlegen und
CC (vorher erzeugte) Substruktur <namesub> in Preprocessor einlesen
CC
/CLEAR
/PREP7
ET,1,MATRIX50
SE, <namesub>
CC
CC Im Lösungsteil Modalanalyse auswählen,
CC Analyseoptionen festlegen und
CC Lösen
CC
ANTYPE, MODAL
MODOPT, SUBSP, 6, 1,1000
SOLVE
CC
CC Ergebnisdatei FILE.MODE als Textdatei <name3>.lis exportieren
CC
/AUX2
DUMP, ALL
FORM, LONG
FILEAUX2, FILE,MODE
CC
CC Speichern der Datei <name3>.lis
CC
File
    Save As
        <name3>.lis
C
C Beenden
C
/EXIT,ALL

```

Anlage 1: ANSYS 5.4-Batch-Sequenz zur Bereitstellung der benötigten .lis-Dateien

Filebelegung während einer Berechnung:

| | | |
|---|-----|---|
| 1 | ... | <name> <i>.fms</i> oder <name>. <i>oma</i> - Eingabefile |
| 2 | ... | <name_1>.lis-file, enthält Masseparameter und Steifigkeitsmatrix der FE-Struktur |
| | ... | <name_1>._c_-file, enthält Steifigkeitsmatrix der FE-Struktur (alaska 4.0-Format) |
| 3 | ... | <name_2>.lis-file, enthält Knotennummern und Knotenkoordinaten der FE-Struktur |
| 4 | ... | <name_3>.lis-file, enthält Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen der FE-Struktur |
| 5 | ... | Standard-Eingabefile (nicht belegt) |
| 6 | ... | Standard-Ausgabefile (nicht belegt) |
| 7 | ... | <name> <i>.lst</i> - Ausgabefile, enthält die berechneten Ergebnisse |
| 8 | ... | <name> <i>.err</i> - file, enthält den Rückkehrcode |
| 9 | ... | <name> <i>.dat</i> - file, enthält die alaska 3.0- Modelldaten |
| | ... | <name> <i>.apj</i> - file, enthält die alaska3.0- Projektinformationen |
| | ... | <name> <i>.mdl</i> - file, enthält alaska 4.0-Eingabedaten |

Rückkehrcodes (Inhalt des <name>.err - files) :

| | | |
|-----------------|-----|--|
| 0 | ... | kein Fehler |
| ± 1 | ... | Fehler beim Eröffnen (-) bzw. Lesen /Schreiben(+) von/auf File 1 |
| ± 2 | ... | Fehler beim Eröffnen (-) bzw. Lesen /Schreiben(+) von/auf File 2 |
| ⋮ | | ⋮ |
| ± 9 | ... | Fehler beim Eröffnen (-) bzw. Lesen /Schreiben(+) von/auf File 9 |
| 10 | ... | Fehlerhafte Eingabedaten |
| >10 | ... | Anzahl der Körper und/oder Frequenzen ist zu groß. |
| aktuelles Datum | ... | keine gültige Version des Programmes |