4.6 FEMSET und CAMMPUS

> Der im Abschnitt 4.5 beschriebene Finite-Elemente-Algorithmus bezieht sich auf kein spezielles Element, auch wenn vieles am Beispiel spezieller Elemente erläutert wurde.
>
> Es ist deshalb naheliegend, den FEM-Algorithmus elementunabhängig zu programmieren und dieses Skelett-Programm für die Anpassung an spezielle Elementtypen verfügbar zu machen. Dies wurde im "Finite-Elemente-Baukasten" FEMSET realisiert.

4.6.1 Der "Finite-Elemente-Baukasten" FEMSET

Der FEM-Baukasten stellt den Kern des Finite-Elemente-Algorithmus als Quellcode zur Verfügung, so daß der Benutzer nur die Routinen ergänzen muß, die spezielle Elementtypen betreffen. Selbstverständlich steht es dem Benutzer frei, den Code in jeder Beziehung zu erweitern.

Die individuelle Erzeugung von Finite-Elemente-Programmen mit dem FEM-Baukasten FEMSET setzt die Verfügbarkeit eines Compilers oder Interpreters voraus. Einige ausführbare Programme, die mit FEMSET erzeugt wurden, gehören zum Programmsystem CAMMPUS ("Computer-Programme der angewandten Mathematik und Mechanik"). Für das Arbeiten mit FEMSET werden deshalb folgende Empfehlungen gegeben:

- Erste Erfahrungen mit den FEMSET-Programmen (eventuell erste Erfahrungen mit der Finite-Elemente-Methode überhaupt) können durch das Berechnen einiger einfacher Beispiele mit den in CAMMPUS verfügbaren FEMSET-Programmen gesammelt werden. Sie sind unter dem Menüpunkt "Finite-Elemente-Programme (spezielle FEMSET-Programme)" zu finden. CAMMPUS kann für Ausbildungszwecke frei kopiert werden und ist z. B. im WWW ("World Wide Web") unter URL

  http://www.fh−hamburg.de/rzbt/dnksoft/cammpus

  zu finden. Die komplette Information des interaktiv zu erzeugenden Berechnungsmodells wird bei jedem Programmstart automatisch in einem File gesichert. Die so erzeugten Files können für das Testen von individuellen Finite-Elemente-Programmen verwendet werden.

- Der Quellcode für den Finite-Elemente-Algorithmus steht in den Programmiersprachen BASIC, C und FORTRAN zur Verfügung. Eine ausführliche Beschreibung für das Arbeiten mit FEMSET (Erzeugen individueller Programme) findet sich im Anhang B des Buchs "Dankert/Dankert: Technische Mechanik, computerunterstützt". Zum gewünschten Quellcode der Programme kommt man folgendermaßen:

  Die **BASIC-Version** ist Bestandteil von CAMMPUS und kann über die oben angegebene WWW-Seite oder von der dem Buch "Dankert/Dankert: Technische Mechanik, computerunterstützt" beiliegenden Diskette kopiert werden.

Die **C- und die FORTRAN-Versionen** können über die WWW-Seite

http://www.fh−hamburg.de/rzbt/dnksoft/femset

kopiert werden. Auf gleichem Wege können PostScript-Files der zugehörigen Dokumentationen bezogen werden. Im Novell-Netz des Rechenzentrums Berliner Tor der FH Hamburg kann die FORTRAN-Version mit

RUN FEMSET

auf die lokale Festplatte übertragen werden.

Das Arbeiten mit FEMSET ist in den genannten Dokumentationen ausführlich beschrieben. Deshalb werden hier nachfolgend nur die Ergänzungen behandelt, die für das Lösen der am Ende dieses Kapitels formulierten Aufgaben erforderlich sind.

4.6.2 FEM-Programme in CAMMPUS

Neben der BASIC-Version von FEMSET, die bereits zu den älteren CAMMPUS-Versionen gehörte, enthält die CAMMPUS-Version 4.5 vier lauffähige Finite-Elemente-Programme, die mit FEMSET erzeugt und mit einigem zusätzlichen Komfort ausgestattet wurden:

- Das Programm FACH2D dient der Berechnung der Knotenverschiebungen und der Stabkräfte ebener Fachwerke.
- Mit dem Programm RAHMEN2D können die Verformungen und die Schnittgrößen ebener biege- und dehnsteifer Rahmen berechnet werden.
- Das Programm FACH3D dient der Berechnung der Knotenverschiebungen und der Stabkräfte dreidimensionaler Fachwerke.
- Das Programm RAHMEN3D gestattet die Berechnung der Verformungen und der Schnittgrößen (Normalkraft, zwei Querkräfte, zwei Biegemomente, Torsionsmoment) dreidimensionaler dehn-, biege- und torsionssteifer Rahmentragwerke.

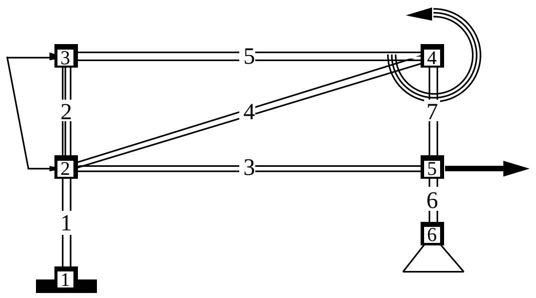
Die Berechnungsergebnisse dieser Programme können graphisch dargestellt und auf PostScript-Dateien ausgegeben werden. Die menügeführte Benutzeroberfläche ist weitgehend selbsterklärend.

Die Programme sind im "CAMMPUS-4.5-Update-Manual" ausführlich dokumentiert, das ebenfalls über die oben angegebene WWW-Seite bezogen werden kann. Sie werden deshalb hier nicht näher beschrieben.

Nachfolgend wird nur ein mit dem Programm RAHMEN2D erzeugtes Ergebnis-Protokoll für das im Abschnitt 4.5.1 vorgestellte und in den vorigen Abschnitten immer wieder zu Erläuterungen herangezogene Beispiel angegeben (erzeugt als PostScript-File mit dem Programm und eingebunden in dieses WordPerfect-Dokument):

J. Dankert — **Finite-Elemente-Baukasten FEMSET** — 01.10.1995 RAHMEN2D

FEM-Berechnungsmodell



Knverformungen

Kn	Verschiebung u	Verschiebung v
1	0.000000000	0.000000000
2	2.787103284	0.000128466
3	2.790403149	0.000046498
4	2.788703567	-0.000111814
5	2.787595512	-0.000077080
6	0.000000000	0.000000000

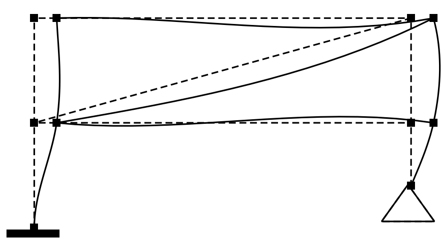
Kn	Biegewinkel phi
1	0.000000000
2	-0.003766481
3	0.001208534
4	0.006988122
5	-0.005606976
6	-0.011134489

Schnittgroessen

Element	Kn	Normalkraft	Querkraft	Biegemoment
1	2	5.138649716	26.57495544	-5513.794539
	1	5.138649716	26.57495544	7773.683181
2	3	-3.278747052	-22.66109081	1881.101467
	2	-3.278747052	2.338909191	-2782.777272
3	2	6.563037970	-3.749273254	2627.905435
	5	6.563037970	-3.749273254	-2996.004446
4	2	18.24227805	1.160125116	103.1118331
	4	18.24227805	1.160125116	1937.430702
5	3	-22.66109081	3.278747052	-1881.101467
	4	-22.66109081	3.278747052	3037.019111
6	5	-5.138649716	18.42504456	-5527.513368
	6	-5.138649716	18.42504456	0.000000000
7	4	-1.389376462	4.988082530	-5025.550187
	5	-1.389376462	4.988082530	-2531.508922

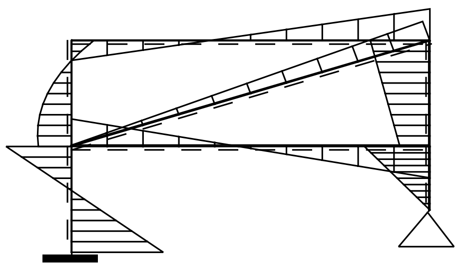
Beispiel aus Kapitel 4 des Skripts "Numerische Methoden"

Verformtes System

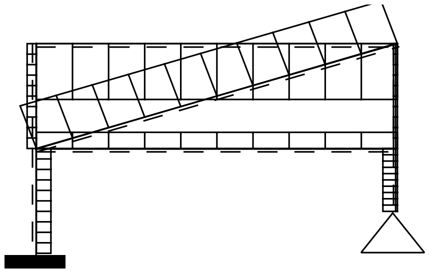


Verschiebungen 32-fach vergroessert

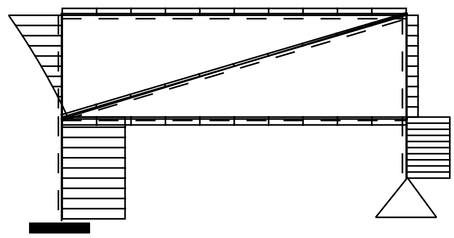
Biegemoment



Normalkraft



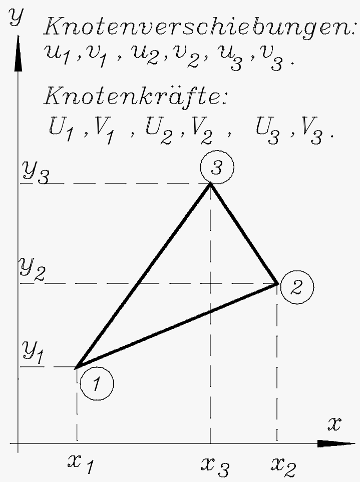
Querkraft



4.6.3 Spezielle Elementsteifigkeitsbeziehungen für Scheibenelemente

Für die Berechnung einiger Aufgaben am Ende dieses Kapitels werden die Element-Beziehungen für das bereits im Abschnitt 4.1 vorgestellte Scheibenelement SD6 benötigt. Die Herleitung dieser Element-Beziehungen ist nicht Gegenstand dieser Vorlesung, sie ist z. B. in "Dankert: Numerische Methoden der Mechanik" zu finden.

Element-Steifigkeitsbeziehung für das Scheiben-Element SD6:



$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ U_3 \\ V_3 \end{bmatrix} = \left(\frac{Et}{4\,|A|\,(1-\nu^2)}\right)_e \begin{bmatrix} \bar{K}_{11} & \bar{K}_{12} & \bar{K}_{13} \\ \bar{K}_{12}^T & \bar{K}_{22} & \bar{K}_{23} \\ \bar{K}_{13}^T & \bar{K}_{23}^T & \bar{K}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{A = ½\,(x_{21}\,y_{23} - x_{31}\,y_{21})}$.

$\boldsymbol{E}$ - Elastizitätsmodul, $\boldsymbol{t}$ - Scheibendicke, ν - Querkontraktionszahl,

Abkürzungen: $\nu^* = ½\,(1-\nu)$, $x_{ij} = x_i - x_j$, $y_{ij} = y_i - y_j$.

$$\bar{K}_{11} = \begin{bmatrix} \nu^* x_{32}^2 + y_{32}^2 & (\nu^*+\nu)x_{32}y_{23} \\ (symm.) & x_{32}^2 + \nu^* y_{32}^2 \end{bmatrix} , \quad \bar{K}_{12} = \begin{bmatrix} \nu^* x_{32}x_{13} + y_{32}y_{13} & \nu^* x_{32}y_{31} + \nu x_{31}y_{32} \\ \nu x_{32}y_{31} + \nu^* x_{31}y_{32} & x_{32}x_{13} + \nu^* y_{32}y_{13} \end{bmatrix} ,$$

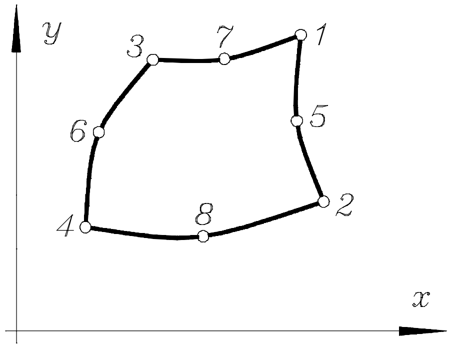
$$\bar{K}_{22} = \begin{bmatrix} \nu^* x_{31}^2 + y_{31}^2 & (\nu^*+\nu)x_{31}y_{13} \\ (symm.) & x_{31}^2 + \nu^* y_{31}^2 \end{bmatrix} , \quad \bar{K}_{13} = \begin{bmatrix} \nu^* x_{32}x_{21} + y_{32}y_{21} & \nu^* x_{32}y_{12} + \nu x_{21}y_{23} \\ \nu x_{32}y_{12} + \nu^* x_{21}y_{23} & x_{32}x_{21} + \nu^* y_{32}y_{21} \end{bmatrix} ,$$

$$\bar{K}_{33} = \begin{bmatrix} \nu^* x_{21}^2 + y_{21}^2 & (\nu^*+\nu)x_{21}y_{12} \\ (symm.) & x_{21}^2 + \nu^* y_{21}^2 \end{bmatrix} , \quad \bar{K}_{23} = \begin{bmatrix} \nu^* x_{21}x_{13} + y_{21}y_{13} & \nu^* x_{31}y_{21} + \nu x_{21}y_{31} \\ \nu x_{31}y_{21} + \nu^* x_{21}y_{31} & x_{21}x_{13} + \nu^* y_{21}y_{13} \end{bmatrix} .$$

Spannungen im Element:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{2\,A\,(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} y_{23} & \nu\,x_{32} & y_{31} & \nu\,x_{13} & y_{12} & \nu\,x_{21} \\ \nu\,y_{23} & x_{32} & \nu\,y_{31} & x_{13} & \nu\,y_{12} & x_{21} \\ \nu^* x_{32} & \nu^* y_{23} & \nu^* x_{13} & \nu^* y_{31} & \nu^* x_{21} & \nu^* y_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} .$$

Für das nebenstehend skizzierte Scheibenelement SV16 mit 8 Knoten und 16 Freiheitsgraden (zwei Verschiebungen bzw. Kräfte pro Knoten) kann die Elementsteifigkeits-Beziehung nicht als Formelsatz aufgeschrieben werden.



Element SV16

Der Algorithmus, nach dem die Elementsteifigkeitsmatrix berechnet werden kann (nicht Gegenstand dieser Vorlesung), ist in "Dankert: Numerische Methoden der Mechanik" beschrieben und wird in einem zur FORTRAN-Version von FEMSET kompatiblen Unterprogramm **EMSTIF_F.S16** realisiert, das im Quelltext auf dem Novell-Server des Rechenzentrums Berliner Tor der FH Hamburg verfügbar ist (mit **GET EMSTIF_F.S16** erhält man eine Kopie). Bei der Anwendung ist folgendes zu beachten:

- Die Element-Charakteristik wird durch folgende Werte definiert:

  Zweidimensionales Problem: $\boldsymbol{k_x = 2}$,
  Anzahl der Knoten pro Element: $\boldsymbol{k_e = 8}$,
  Anzahl der Freiheitsgrade pro Knoten: $\boldsymbol{k_f = 2}$,
  Anzahl der Elementparameter (Dicke $\boldsymbol{t}$, Elastizitätsmodul $\boldsymbol{E}$, Querkontraktionszahl ν): $\boldsymbol{k_p = 3}$.

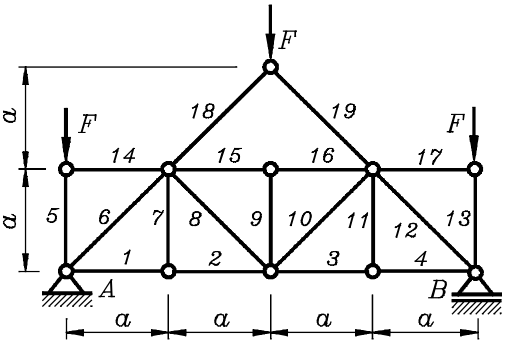
- Die Knoten 1 bis 4 sind die Eckknoten des Elements, die Knoten 5 bis 8 liegen auf den Seitenmitten. Die Seiten können gekrümmt sein (nach dem sogenannten "isoparametrischen Konzept" werden für das Element auf der Basis der in kartesischen Koordinaten definierten Knotenpunkte krummlinige Koordinaten mit den gleichen Transformationsfunktionen erzeugt, die für die Verschiebungsansätze verwendet werden, der Programmbenutzer bleibt von diesen Problemen verschont).

- Bei der Abbildung der Elementknoten auf die Systemknoten (Koinzidenzmatrix) muß exakt die entsprechend der oben angegebenen Skizze definierte relative Lage der Elementknoten zueinander beachtet werden. Die Systemknotennumerierung kann selbstverständlich beliebig festgelegt werden und sollte die im Abschnitt 4.5.3 angestellten Überlegungen zur Bandweitenoptimierung berücksichtigen.

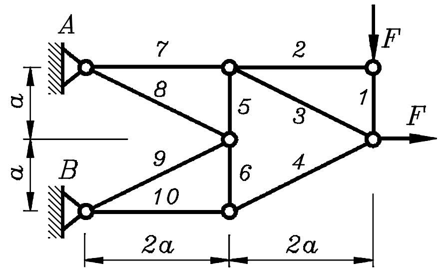
- Für die Vernetzung von Rechteckbereichen steht ein Programm **RECTNET8** zur Verfügung, das (ähnlich wie das zu FEMSET gehörende Programm RECTNET zur Erzeugung von Netzen mit dem Element SD6) die Knotenkoordinaten und die Koinzidenzmatrix auf eine zu FEMSET kompatible Datei schreibt. Es kann im Novellnetz mit **RUN RECTNET8** gestartet werden. Bei Bedarf kann man mit **GET RECTNET8.EXE** eine Kopie erhalten.

Aufgabe 4.1: Für die skizzierten statisch bestimmten Fachwerke sind die Stabkräfte mit dem CAMMPUS-Programm FACH2D zu berechnen. Die Ergebnisse sind für einzelne Stäbe mit Hilfe der Gleichgewichtsbeziehungen zu kontrollieren.

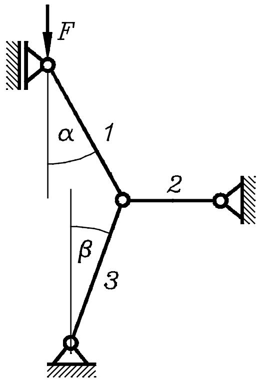
Hinweis: Da bei statisch bestimmten Fachwerken die Stabkräfte unabhängig von den Dehnsteifigkeiten sind, kann z. B. für alle Stäbe $EA = 1$ gesetzt werden. Nur dann, wenn die berechneten Knotenverschiebungen sinnvoll sein sollen, müssen die tatsächlichen Dehnsteifigkeiten benutzt werden.



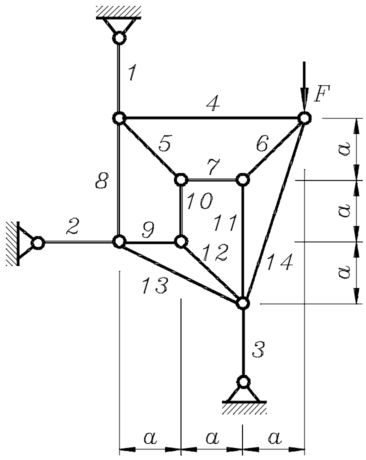
Fachwerk 1,
gegeben: $F = 10\ kN$



Fachwerk 2,
gegeben: F

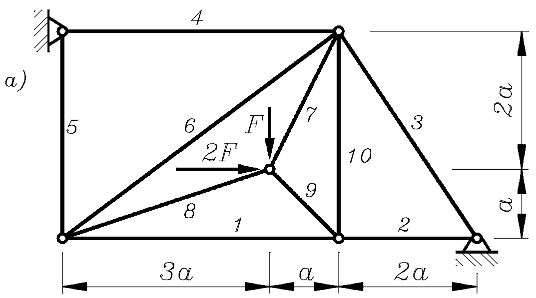


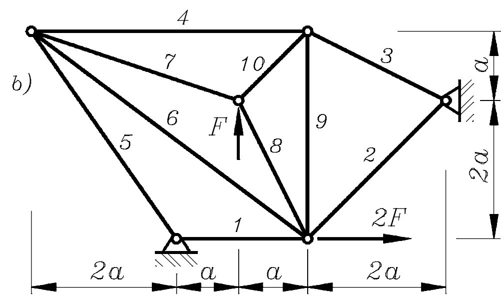
Fachwerk 3: $\alpha = 30°$,
$F = 5\ kN$, $\beta = 20°$.



Fachwerk 4, gegeben: F

Aufgabe 4.2: Für die beiden nachstehend skizzierten (statisch unbestimmten) Fachwerke sind sämtliche Stabkräfte mit Hilfe des Programms FACH2D zu berechnen und einzelne Stabkräfte mit einem geeigneten Verfahren zur Berechnung statisch unbestimmter Systeme zu überprüfen.

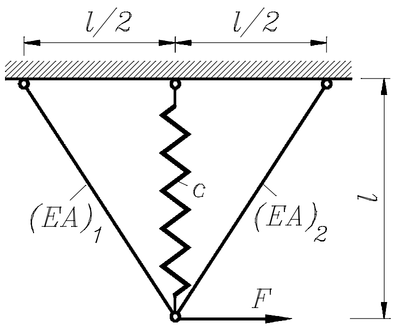




Gegeben: F , a , Dehnsteifigkeit EA ist für alle Stäbe gleich.

Hinweis: Wenn alle Dehnsteifigkeiten gleich groß sind, kürzen sie sich aus den Ergebnissen für die Stabkräfte heraus, und es darf wie bei Aufgabe 4.1 für alle Stäbe $EA = 1$ angenommen werden.

Aufgabe 4.3: Für das skizzierte System berechne man mit dem Programm FACH2D

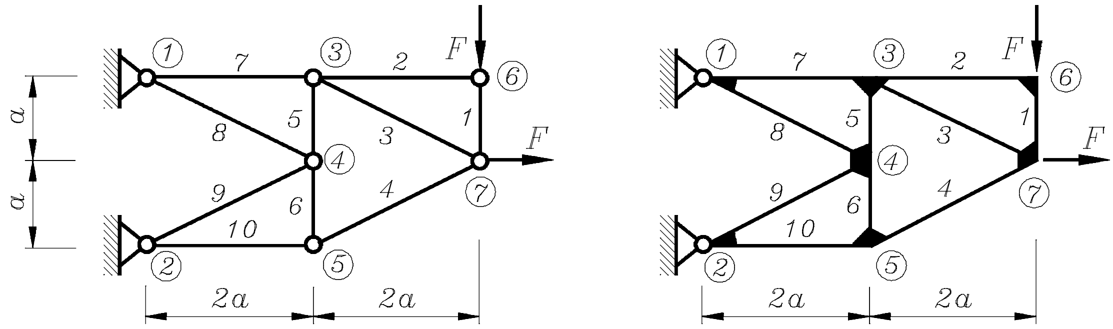


a) die Stabkräfte und die Federkraft,

b) Horizontal- und Vertikalverschiebungskomponenten des Kraftangriffspunktes.

Gegeben: $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{l}$, $\boldsymbol{(EA)_1}$,
$\boldsymbol{(EA)_2 = 2\,(EA)_1}$,
$\boldsymbol{c = 4\,(EA)_1/l}$.

Aufgabe 4.4: Für das abgebildete Fachwerk sind Vergleichsrechnungen durchzuführen: Die Theorie des idealen Fachwerks (reibungsfreie Gelenke, Stäbe nehmen nur Zug- bzw. Druckkräfte auf) ist mit der (im allgemeinen realen) Ausführung des Tragwerks mit biegesteifen Verbindungen (Knotenbleche) zu vergleichen. Alle Stäbe bzw. Biegeträger haben den gleichen Rechteckquerschnitt mit der Breite ***b*** und der Höhe ***h***.



Gegeben: $\boldsymbol{a = 0{,}5\ m}$; $\boldsymbol{F = 10\ kN}$; $\boldsymbol{E = 2{,}1\cdot 10^5\ N/mm^2}$; $\boldsymbol{b = 1{,}5\ cm}$; $\boldsymbol{h = 2\ cm}$.

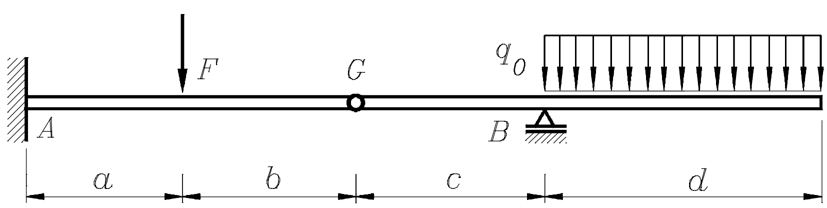
a) Man berechne mit dem CAMMPUS-Programm FACH2D die Knotenverschiebungen und die Stabkräfte des idealen Fachwerks (linke Skizze).

b) Mit dem CAMMPUS-Programm RAHMEN2D berechne man die Knotenverschiebungen und die Schnittgrößen an den Elementknoten des biegesteifen Tragwerks.

c) Die nach a) bzw. b) berechneten Knotenverschiebungen und die sich aus den Schnittgrößen ergebenden maximalen Spannungen in den Elementen nach beiden Theorien sind zu vergleichen und zu diskutieren.

Aufgabe 4.5:

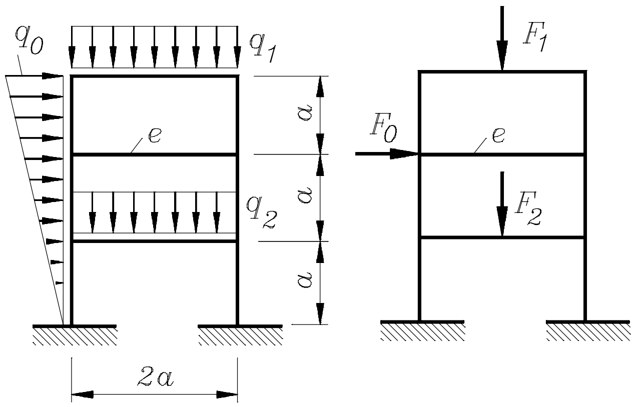
Geg.: $\boldsymbol{a = 44\ cm}$;
$\boldsymbol{b = 50\ cm}$;
$\boldsymbol{c = 58\ cm}$;
$\boldsymbol{d = 80\ cm}$;
$\boldsymbol{F = 3{,}48\ q_0 d}$.



Man ermittle für den skizzierten Gerberträger mit dem Programm RAHMEN2D die Durchbiegungen und vergleiche sie mit den Ergebnissen der Aufgabe 3.4.

Aufgabe 4.6:

Ein biegesteifer Rahmen ist durch eine Dreieckslast und zwei konstante Linienlasten belastet. Alle Elemente haben den gleichen Querschnitt.



Gegeben: $a = 2\ m$;
$q_0 = 3\ kN/m$;
$q_1 = q_2 = 1\ kN/m$;
$EA = 10^{10}\ N$;
$EI = 10^{12}\ N\,mm^2$.

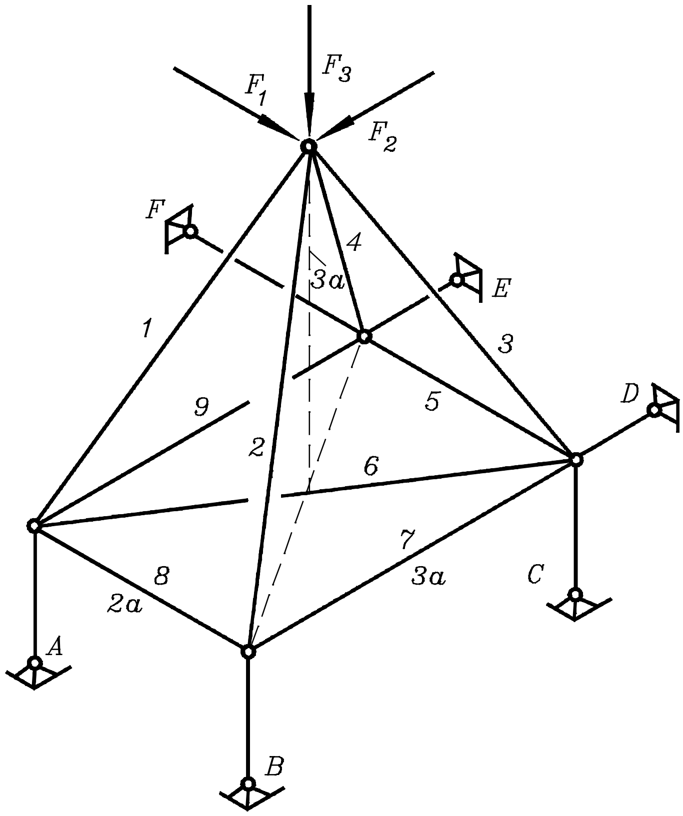
a) Mit dem CAMMPUS-Programm RAHMEN2D berechne man die Knotenverschiebungen des Rahmens und vergleiche sie mit den Ergebnissen, die man erhält, wenn die Linienlasten durch ihre Resultierenden (rechte Skizze) ersetzt werden.

b) Man stelle die ermittelten Schnittgrößen an den Elementknoten des mit ***e*** bezeichneten Elements für beide Varianten einander gegenüber.

c) Die Lagerreaktionen sind aus den Schnittgrößen der Anschlußelemente abzulesen. Das Gleichgewicht der Lagerreaktionen mit den äußeren Lasten ist zu überprüfen.

Aufgabe 4.7:

Für das skizzierte Fachwerk sind mit dem CAMMPUS-Programm FACH3D die Knotenverschiebungen und die Stabkräfte zu berechnen.

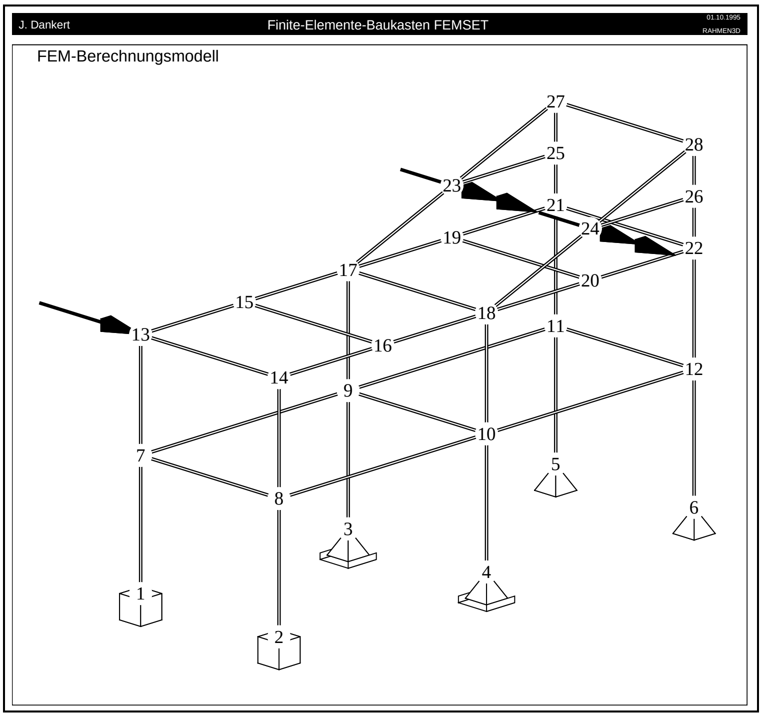


Gegeben: $F_1 = 1\ kN$;
$F_2 = 2\ kN$;
$F_3 = 6\ kN$;
$a = 1\ m$;
$EA = 10^6\ N$;

Für die Stützstäbe, die zu den Lagern ***A*** bis ***E*** führen, ist die Länge ***a*** anzunehmen, der Stützstab, der zum Lager ***F*** führt, hat die Länge $2a$.

Aufgabe 4.8:

Das skizzierte Maschinengerüst wird am Knoten 13 durch eine Kraft in x-Richtung $F_{x,13}$ und an den Knoten 23 und 24 durch äußere Momente um die x-Achse $M_{x,23}$ bzw. $M_{x,24}$ belastet.



Geg.: $F_{x,13} = 10\ N$;
$M_{x,23} = 10\ Nm$;
$M_{x,24} = 10\ Nm$;

Alle Elemente sind aus dem gleichem Material mit

E-Modul $E = 2{,}1 \cdot 10^5\ N/mm^2$,
G-Modul $G = 0{,}8 \cdot 10^5\ N/mm^2$

und haben die gleichen Querschnittsabmessungen mit gleichen Flächenträgheitsmomenten

$$I = 100\ mm^4$$

um die beiden Biegeachsen, dem Torsionsträgheitsmoment

$$I_t = 100\ mm^4$$

und der Querschnittsfläche

$$A = 50\ mm^2 .$$

Die Abmessungen des Gerüsts können der nebenstehenden Tabelle der Knotenkoordinaten entnommen werden.

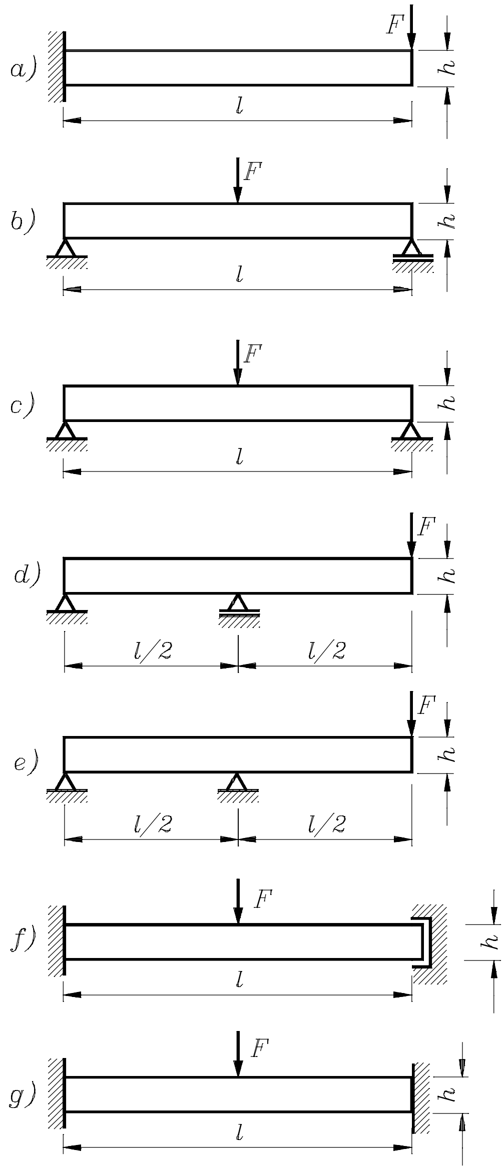
J. Dankert — Finite-Elemente-Baukasten FEMSET — 01.10.1995 RAHMEN3D

Knkoordinaten

Kn	X	Y	Z
1	0.000000000	0.000000000	0.000000000
2	1000.000000	0.000000000	0.000000000
3	0.000000000	1500.000000	0.000000000
4	1000.000000	1500.000000	0.000000000
5	0.000000000	3000.000000	0.000000000
6	1000.000000	3000.000000	0.000000000
7	0.000000000	0.000000000	800.0000000
8	1000.000000	0.000000000	800.0000000
9	0.000000000	1500.000000	800.0000000
10	1000.000000	1500.000000	800.0000000
11	0.000000000	3000.000000	800.0000000
12	1000.000000	3000.000000	800.0000000
13	0.000000000	0.000000000	1500.000000
14	1000.000000	0.000000000	1500.000000
15	0.000000000	750.0000000	1500.000000
16	1000.000000	750.0000000	1500.000000
17	0.000000000	1500.000000	1500.000000
18	1000.000000	1500.000000	1500.000000
19	0.000000000	2250.000000	1500.000000
20	1000.000000	2250.000000	1500.000000
21	0.000000000	3000.000000	1500.000000
22	1000.000000	3000.000000	1500.000000
23	0.000000000	2250.000000	1800.000000
24	1000.000000	2250.000000	1800.000000
25	0.000000000	3000.000000	1800.000000
26	1000.000000	3000.000000	1800.000000
27	0.000000000	3000.000000	2100.000000
28	1000.000000	3000.000000	2100.000000

An den Knoten 1 und 2 sind starre Einspannungen, an den Knoten 5 und 6 momentenfreie Festlager vorzusehen. Die Lager an den Knoten 3 und 4 verhindern die vertikale Verschiebung (in z-Richtung) und die horizontale Verschiebung in x-Richtung.

Mit dem CAMMPUS-Programm RAHMEN3D sind die Verformungen und die Schnittgrößen des Systems zu ermitteln.



Aufgabe 4.9: Für die skizzierten "biegeträger-ähnlichen" Systeme sollen mit der Finite-Elemente-Methode nach der Scheibentheorie die Verformungen berechnet werden. Die Ergebnisse sind für ausgewählte Punkte mit den Ergebnissen der Biegetheorie zu vergleichen.

Die Dicke ***t***, der Elastizitätsmodul ***E*** und die Querkontraktionszahl ν sind jeweils für die gesamte Scheibe konstant.

Gegeben:
$\boldsymbol{F = 200\ N}$;
$\boldsymbol{l = 200\ mm}$;
$\boldsymbol{h = 20\ mm}$;
$\boldsymbol{t = 5\ mm}$;
$\boldsymbol{E = 2{,}1 \cdot 10^5\ N/mm^2}$;
$\boldsymbol{\nu = 0{,}3}$.

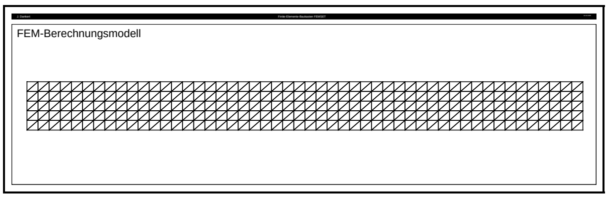
a) Mit dem Finite-Elemente-Baukasten FEMSET ist ein Programm SD6.EXE zu erzeugen, das mit dem (im Abschnitt 4.6.3 beschriebenen) Dreieckselement SD6 arbeitet.

b) Mit dem Programm SD6.EXE sind folgende Vernetzungsvarianten durchzurechnen:

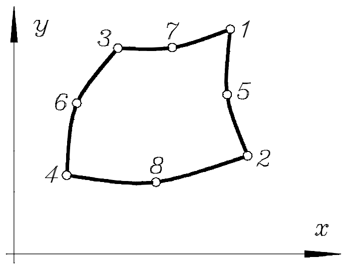
- ♦ 8 Elemente,
- ♦ 80 Elemente,
- ♦ 800 Elemente.

Um 800 Elemente realisieren zu können, muß das unter MS-DOS laufenden FEMSET-Programm mit HUGE-Arrays erzeugt werden (vgl. FEMSET-Dokumentation).

Zu FEMSET gehört ein Programm RECTNET.EXE, mit dem ein Rechteckbereich in Dreieckselemente zerlegt wird (Feinheit der Vernetzung wird vom Programmbenutzer vorgegeben). Das Programm erzeugt automatisch eine Datei mit Knotenkoordinaten und Koinzidenzmatrix. Dieses (unvollständige) Finite-Elemente-Modell (die Skizze unten rechts zeigt ein Beispiel) erzeugt beim Einlesen in ein FEMSET-Programm eine Warnung, die ignoriert werden darf. Die Elementparameter, Belastungs- und Lagerinformationen sind nach dem Einlesen mit erträglichem Aufwand "von Hand" zu ergänzen.



Aufgabe 4.10: Für das Scheibenelement SV16 mit 8 Knoten kann im Novell-Netz des Rechenzentrums Berliner Tor der FH Hamburg ein zu FEMSET kompatibles Unterprogramm angefordert werden, das die Elementsteifigkeitsmatrix aufbaut (vgl. Abschnitt 4.6.3).



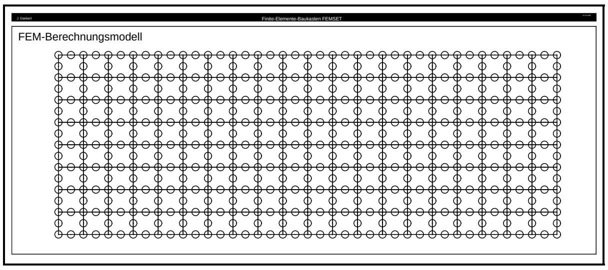
Element SV16

a) Mit dem Finite-Elemente-Baukasten FEMSET ist ein Programm SV16.EXE zu erzeugen, das mit dem Element SV16 arbeitet.

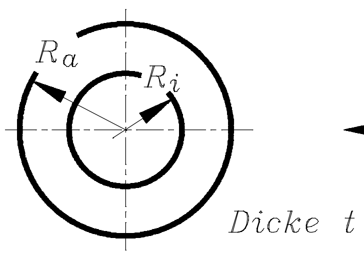
b) Mit dem Programm SV16.EXE sind die Systeme der Aufgabe 4.9 für folgende Vernetzungsvarianten durchzurechnen:

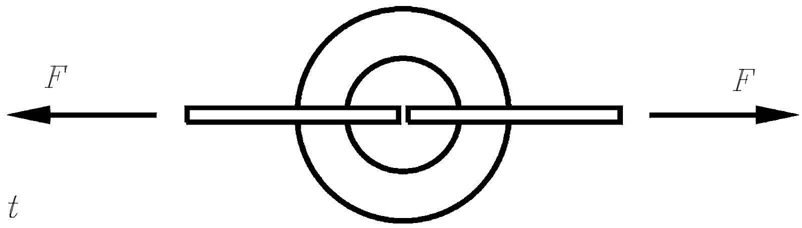
- ♦ 2 Elemente,
- ♦ 20 Elemente,
- ♦ 200 Elemente.

Hinweis: Man benutze das im Abschnitt 4.6.3 erwähnte Vernetzungsprogramm. Die Skizze zeigt ein Beispiel eines mit RECTNET8.EXE erzeugten Netzes.



Aufgabe 4.11: Ein Kettenglied in Form einer gelochten Kreisscheibe wird durch die Zugkräfte ***F*** belastet. Man ermittle mit Hilfe der für die Aufgaben 4.9 und 4.10 erzeugten Programme die Aufweitung des Loches in Richtung der Zugbelastung und die Verringerung des Lochdurchmessers in der dazu senkrechten Richtung. Es sind unterschiedlich feine Vernetzungen zu verwenden. Die Qualität der Ergebnisse ist unter Ausnutzung der mit den beiden Elementtypen bei der Behandlung der Aufgaben 4.9 und 4.10 gewonnenen Erfahrungen abzuschätzen.





Gegeben: $\boldsymbol{F = 50\ kN}$; $\boldsymbol{R_a = 6{,}2\ cm}$; $\boldsymbol{R_i = 4{,}2\ cm}$; $\boldsymbol{t = 0{,}5\ cm}$; $\boldsymbol{\nu = 0{,}3}$; $\boldsymbol{E = 2{,}1 \cdot 10^5\ N/mm^2}$.

Hinweis: Bei der Berechnung sollte die Doppelsymmetrie der Kreisscheibe ausgenutzt werden (Berechnungsmodell: Viertelscheibe). Dann kann man sogar eine mit RECTNET.EXE bzw. RECTNET8.EXE erzeugte Koinzidenzmatrix benutzen. Für die Berechnung der Knotenkoordinaten ist das Schreiben eines kleinen Spezialprogramms durchaus empfehlenswert.