

Bachelorprüfung Frühjahr 2016

Modul 18 (BI)

Baustatik II und III (PO 2013)

Klausur am 20.02.2016

Name: _____ Vorname: _____ Matrikelnummer: _____
 (bitte deutlich schreiben) (9stellig!)

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	Summe
mögliche Punkte	30	25	20	30	20	35	20	180
erreichte Punkte								

Wichtige Hinweise

- Dauer der Klausur: 180 Minuten, davon 30 Minuten für Aufgaben ohne Hilfsmittel (Typ I), 150 Minuten für Aufgaben mit Hilfsmittel (Typ II).
- Prüfen Sie, ob alle Aufgabenblätter vorhanden sind.
- Schreiben Sie auf das Deckblatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.
- Geben Sie bei den Aufgaben, die ohne Hilfsmittel zu bearbeiten sind, Ihre Lösungen auf den Aufgabenblättern an. Bei Bedarf können Sie weiteres farbiges Schreibpapier anfordern. Verwenden Sie hierfür kein eigenes Papier.
- Die Aufgabenblätter zu den Aufgaben, die mit Hilfsmitteln zu bearbeiten sind, sind zusammen mit den zugehörigen Lösungen abzugeben.
- Keine grünen Stifte verwenden.
- Die Lösungen sollen alle Nebenrechnungen und Zwischenergebnisse enthalten.
- Taschenrechner sind nur bei der Lösung der Aufgaben mit Hilfsmittel (Typ II) erlaubt. Programmierbare Rechner nur ohne Programmteil benutzen.
- Die Benutzung von anderen elektronischen Geräten (z.B. Laptops, Mobiltelefone, Tablets, etc.) ist nicht zulässig. Diese Geräte sind während der Klausur abzuschalten und so wegzulegen, dass ein unmittelbarer Zugriff, (z.B. aus Taschen in der Kleidung) nicht möglich ist und sind in Taschen zu verwahren (z.B. Aktentasche, Rucksack, o.ä.). Falls diese Regel nicht eingehalten wird, gilt dies als Täuschungsversuch.
- Das Verlassen des Klausorraumes zwischen Aufgaben Typ I und Typ II der Klausur ist nicht gestattet. Gleiches gilt für das Verlassen des Raumes vor Ablauf der Bearbeitungszeit.
- Toilettenbesuche sind nur einzeln unter Hinterlegung des Studentenausweises bei den Aufsichtspersonen gestattet.

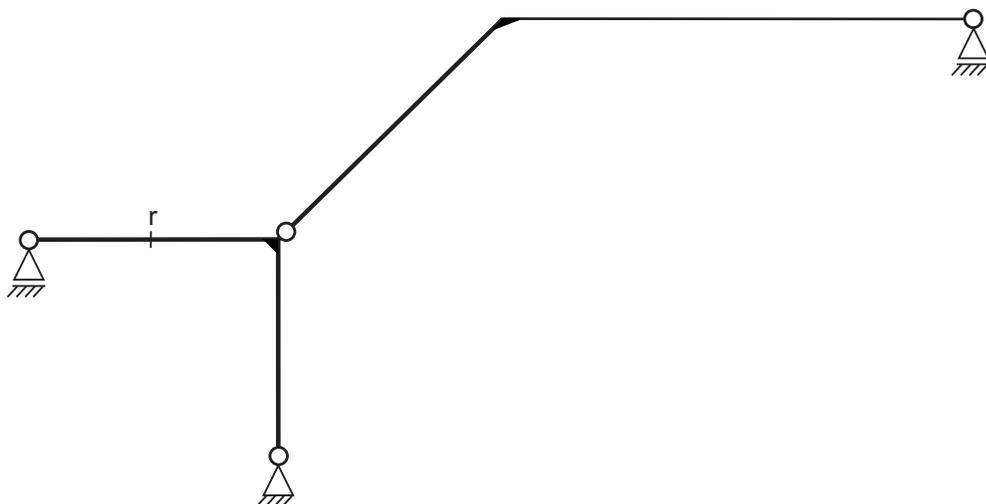
Aufgabe 1

(30 Punkte)

- a) (2 P.) Erläutern Sie den Unterschied zwischen der Zustandslinie (Schnittkraftfunktion) und der Einflusslinie (Einflussfunktion) einer inneren Kraftgröße (M, Q, N).

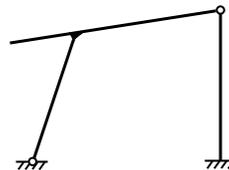
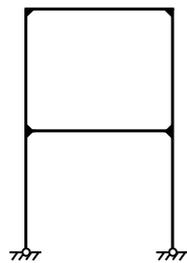
- b) (4 P.) Konstruieren Sie den vollständigen Polplan mit **allen** Haupt- und Nebenpolen für die Einflusslinie des Moments M_r an der Stelle r . Tragen Sie an der kinematischen Kette die Verdrehungen φ_i der Scheiben i an.
Hinweis: Die Einflusslinie soll nicht angegeben werden!

Polplan für das Moment M_r :

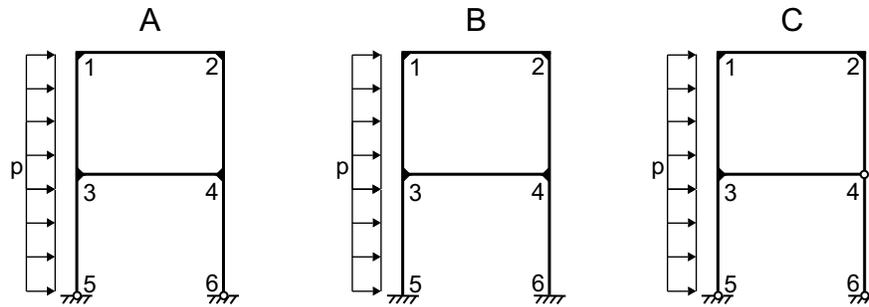


c) (2 P.) Nennen Sie die wesentlichen Unterschiede des Kraftgrößenverfahrens und des Weggrößenverfahrens bezüglich der Unbekannten und der Grundsysteme.

d) (4 P.) Die abgebildeten statischen Systeme sollen mit dem Weggrößenverfahren berechnet werden. Bestimmen Sie jeweils die Anzahl der geometrischen Freiheitsgrade (n_g), d.h. die kleinstmögliche Anzahl der Unbekannten unter Verwendung der Grundelemente I und II. Für alle Stäbe gilt: $EA \neq \infty$, $EI \neq \infty$.

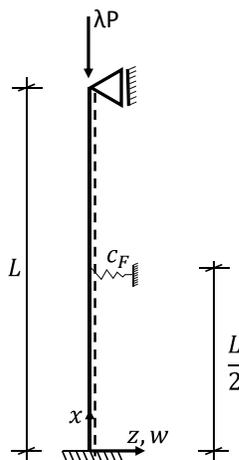


- e) (3 P.) Ordnen Sie die drei unten dargestellten Systeme A, B und C bezüglich der horizontalen Verschiebung am Knoten 2. Beginnen Sie mit dem System, bei dem die horizontale Verschiebung am Knoten 2 am größten ist.



Stabilität, Ritz-Verfahren, Theorie II.Ordnung

- f) Für den abgebildeten schubstarken Balken ($\gamma = 0$) sollen nachfolgende Teilaufgaben gelöst werden.



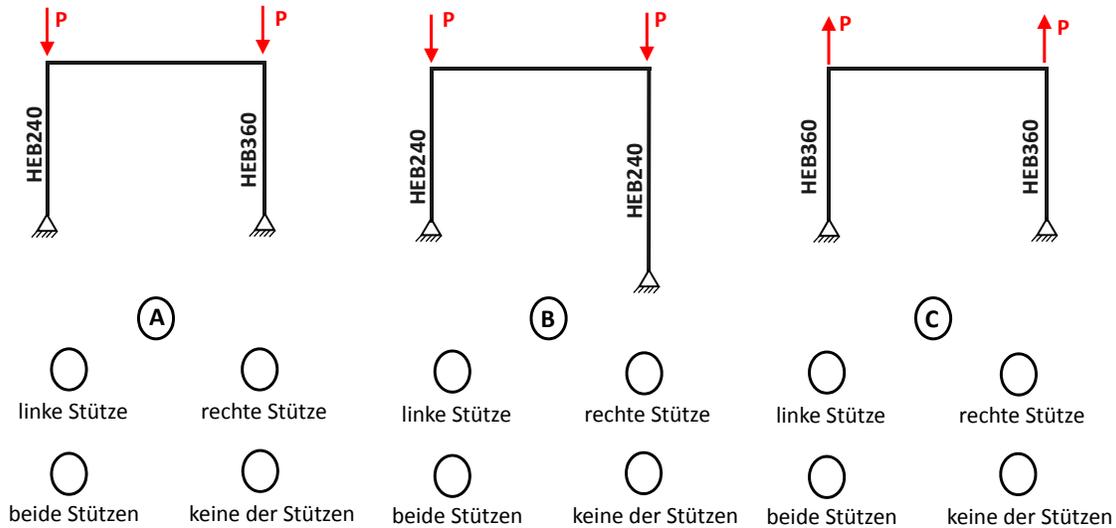
(2 P.) Geben Sie alle geometrischen und statischen Randbedingungen des Balkens an.

(0,5 P.) Der abgebildete Balken soll nach dem Verfahren von Ritz berechnet werden. Welche Bedingungen muss der zu wählende Ansatz erfüllen?

(2,5 P.) Welcher der folgenden Ansätze kann für den dargestellten Balken verwendet werden? (Mit Begründung!)

$$\begin{aligned} A) \quad h(x) &= \frac{5}{4}x - \frac{8}{9} \frac{x^5}{L^4} \\ B) \quad h(x) &= \frac{3}{8} \frac{x^2}{L} - \frac{3}{8} \frac{x^3}{L^2} \\ C) \quad h(x) &= \frac{7}{6} \frac{x^3}{L^2} - \frac{9}{5} \frac{x^3}{L^2} \end{aligned}$$

- g) (2 P.) Im folgenden Bild sind drei Rahmentragwerke (A, B und C) dargestellt. Unter Beachtung der gegebenen Belastung und der unterschiedlichen Abmessungen und Querschnitte, soll angegeben werden, welche Stütze zuerst einknicken würde, dazu soll das entsprechende Kästchen für die linke oder rechte Stütze bzw. keine oder beide Stützen mit einem x gekennzeichnet werden.



- h) (2 P.) Geben Sie die allgemeine Formel für die Berechnung der kritischen Last eines Einzelstabes an. Erklären Sie anhand dieser Formel, welche Maßnahmen unternommen werden können, um die Knicklast zu erhöhen.

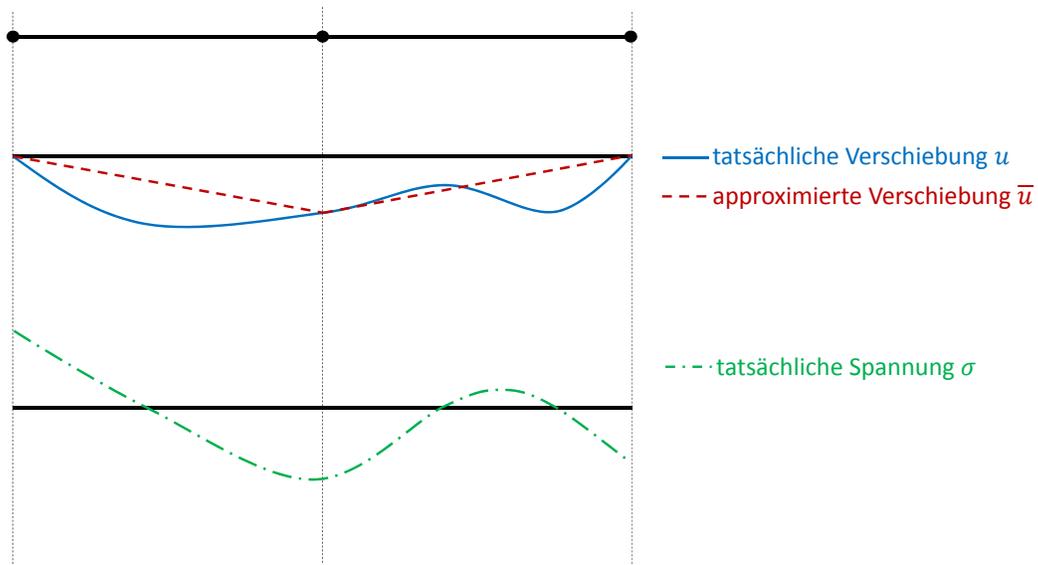
- i) (1 P.) Bei der Berechnung nach Theorie II. Ordnung, kann vereinfachend für Zugstäbe nach Theorie I. Ordnung gerechnet werden. Wieso ist diese Vereinfachung für Druckstäbe nicht zulässig?

Finite Elemente Methode

j) (3 P.) Auf welchen drei Grundideen beruht die Finite Element Methode?

k) (2 P.) Gegeben ist ein Fachwerkstab, der unter einer Belastung die tatsächliche Verschiebung u (siehe Diagramm) erfährt. Mit der Methode der Finiten Elemente wird der Fachwerkstab in zwei Elemente eingeteilt und die Verschiebung mit linearen Ansatzfunktionen angenähert (\bar{u}).

Im Diagramm ist außerdem die tatsächliche Spannung σ dargestellt. Zeichnen Sie qualitativ den approximierten Spannungsverlauf $\bar{\sigma}$ ein, der zu der angenäherten Verschiebung \bar{u} korrespondiert.



Bachelorprüfung Frühjahr 2016

Modul 18 (BI)

Baustatik II und III (PO 2013)

Klausur am 20.02.2016

Name: _____ Vorname: _____ Matrikelnummer: _____
(bitte deutlich schreiben) (9stellig!)

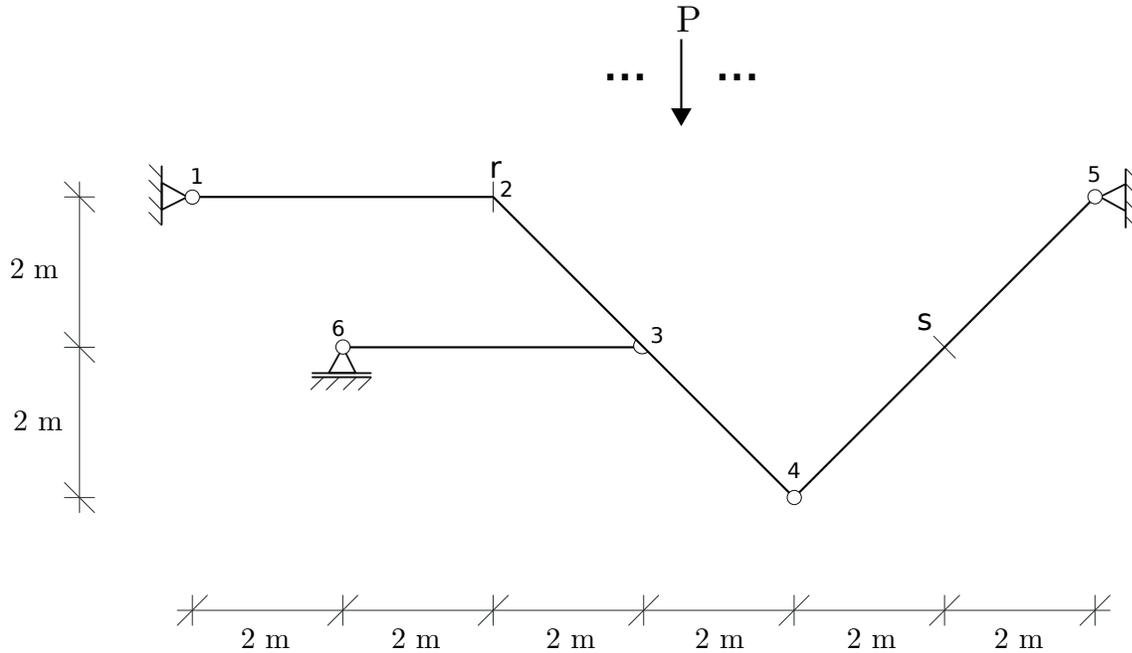
Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	Summe
mögliche Punkte	30	25	20	30	20	35	20	180
erreichte Punkte								

Wichtige Hinweise

- Dauer der Klausur: 180 Minuten, davon 30 Minuten für Aufgaben ohne Hilfsmittel (Typ I), 150 Minuten für Aufgaben mit Hilfsmittel (Typ II).
- Prüfen Sie, ob alle Aufgabenblätter vorhanden sind.
- Schreiben Sie auf das Deckblatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.
- Geben Sie bei den Aufgaben, die ohne Hilfsmittel zu bearbeiten sind, Ihre Lösungen auf den Aufgabenblättern an. Bei Bedarf können Sie weiteres farbiges Schreibpapier anfordern. Verwenden Sie hierfür kein eigenes Papier.
- Die Aufgabenblätter zu den Aufgaben, die mit Hilfsmitteln zu bearbeiten sind, sind zusammen mit den zugehörigen Lösungen abzugeben.
- Keine grünen Stifte verwenden.
- Die Lösungen sollen alle Nebenrechnungen und Zwischenergebnisse enthalten.
- Taschenrechner sind nur bei der Lösung der Aufgaben mit Hilfsmittel (Typ II) erlaubt. Programmierbare Rechner nur ohne Programmteil benutzen.
- Die Benutzung von anderen elektronischen Geräten (z.B. Laptops, Mobiltelefone, Tablets, etc.) ist nicht zulässig. Diese Geräte sind während der Klausur abzuschalten und so wegzulegen, dass ein unmittelbarer Zugriff, (z.B. aus Taschen in der Kleidung) nicht möglich ist und sind in Taschen zu verwahren (z.B. Aktentasche, Rucksack, o.ä.). Falls diese Regel nicht eingehalten wird, gilt dies als Täuschungsversuch.
- Das Verlassen des Klausorraumes zwischen Aufgaben Typ I und Typ II der Klausur ist nicht gestattet. Gleiches gilt für das Verlassen des Raumes vor Ablauf der Bearbeitungszeit.
- Toilettenbesuche sind nur einzeln unter Hinterlegung des Studentenausweises bei den Aufsichtspersonen gestattet.

Aufgabe 2

(25 Punkte)

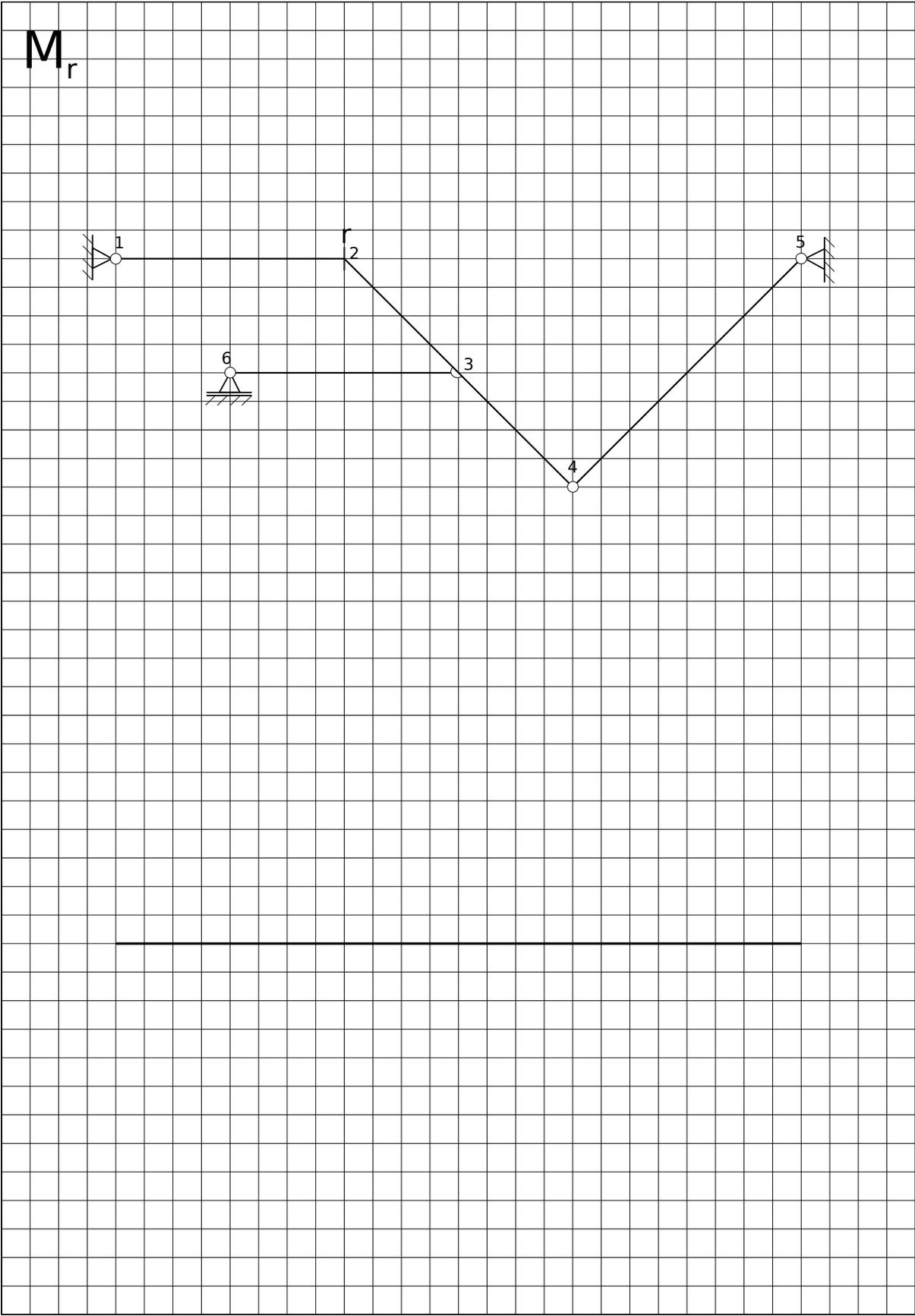


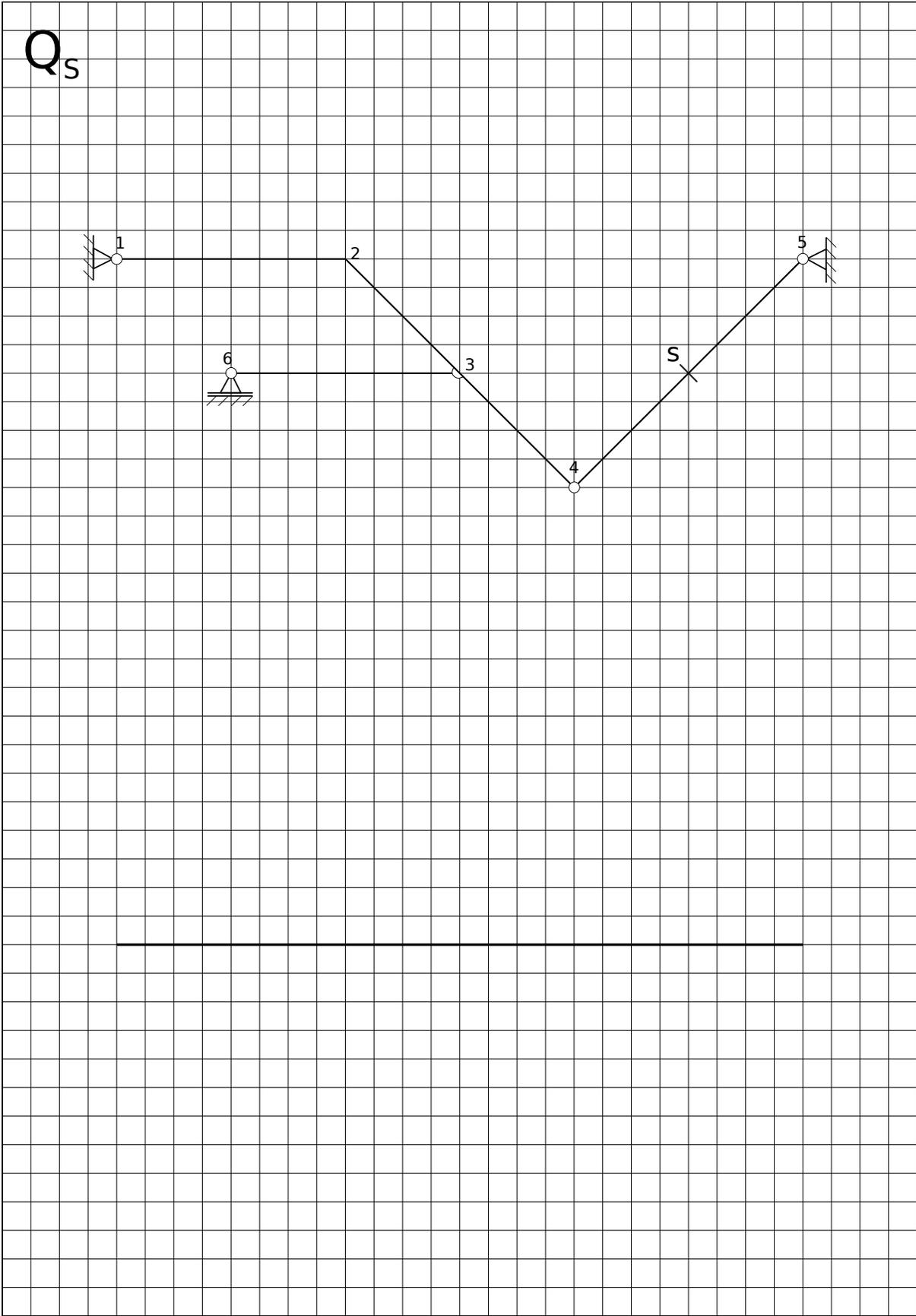
Bestimmen Sie für das dargestellte System die Einflusslinien für

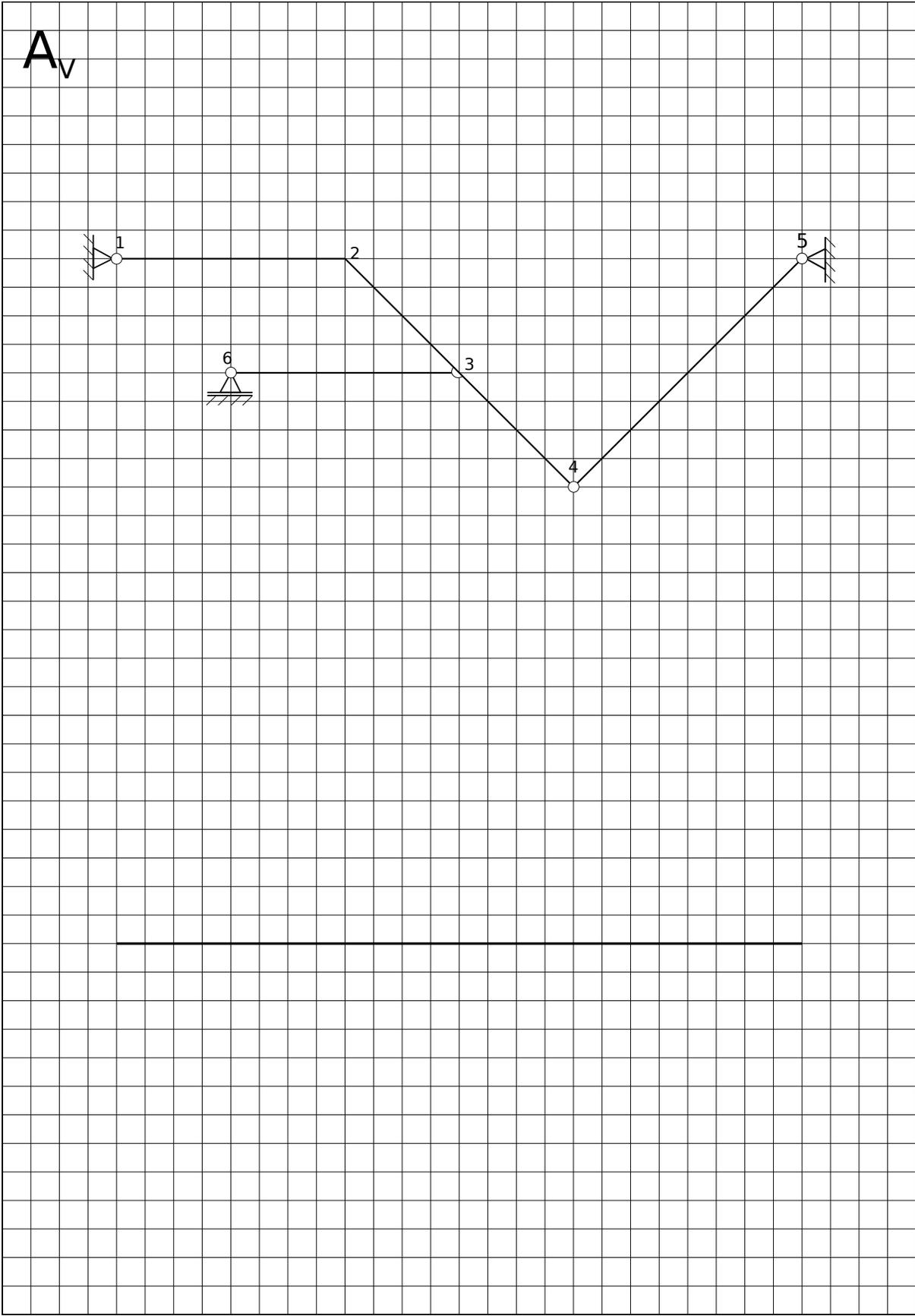
- (12 P.) das Moment M_r im Punkt r . Bringen Sie auf den Lastgurt beliebig kürzbare konstante Streckenlasten mit einem Wert von 15 kN/m so auf, dass sich das betragsmäßig maximale Moment im Punkt r einstellt und ermitteln Sie dafür den Wert für das Moment M_r .
- (10 P.) die Querkraft Q_s im Punkt s .
- (3 P.) die vertikale Auflagerkraft A_V am Knoten 5.

Der zu betrachtende Lastgurt des Systems ist 1-2-3-4-5.

Verwenden Sie die beigefügten Lösungszettel mit der entsprechenden Kennzeichnung (M_r , Q_s und A_V).

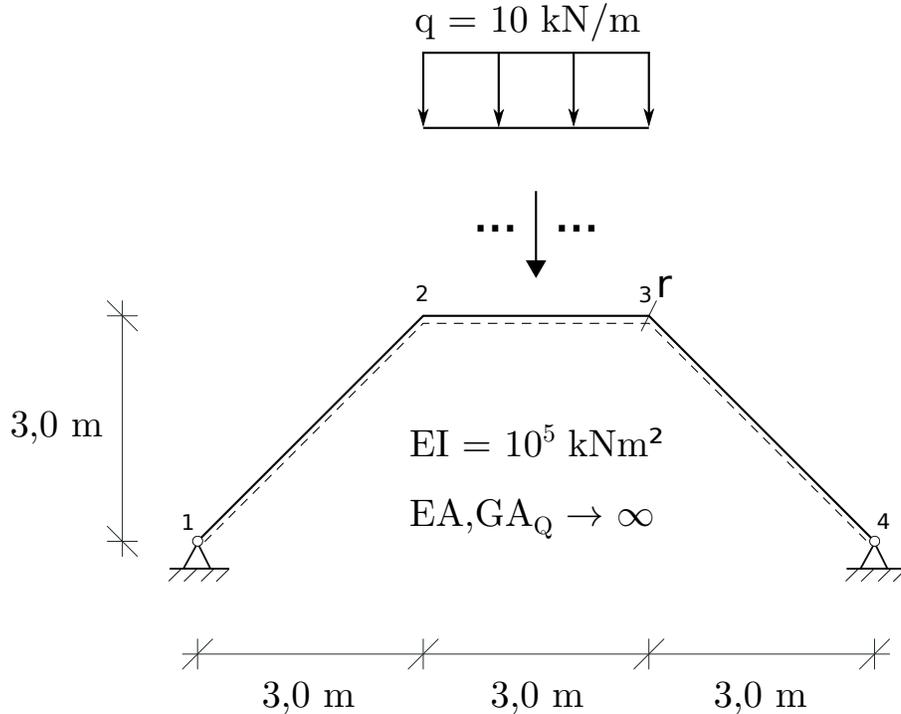






Aufgabe 3

(20 Punkte)

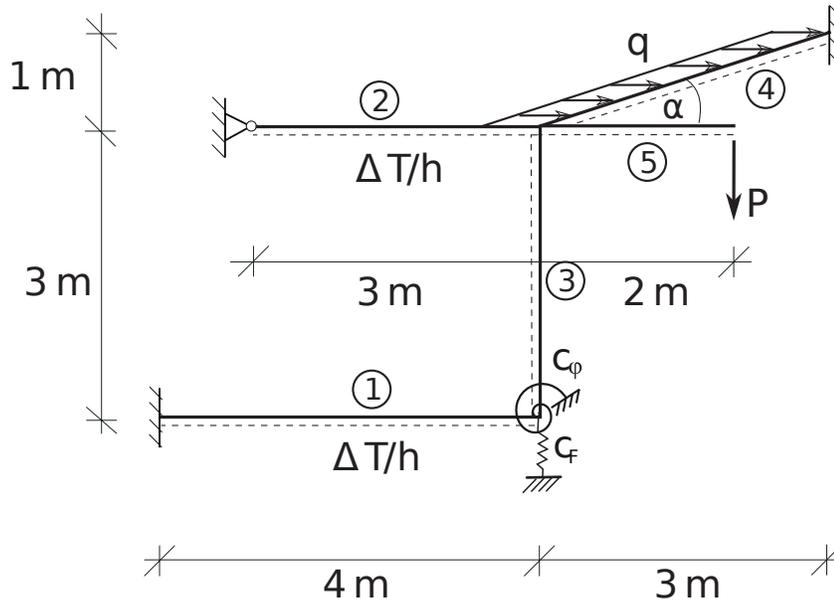


- (1 P.) Bestimmen Sie den Grad der statischen Unbestimmtheit n des dargestellten Systems.
- (16 P.) Ermitteln Sie die Einflusslinie des Moments M_r im Punkt r . Verwenden Sie hierfür das $(n - 1)$ -fach statisch unbestimmte System in Kombination mit dem ω -Verfahren.
- (3 P.) Werten Sie die Einflusslinie für die gegebene Belastung aus.

Hinweis: Die Berechnung der Einflusslinie ist nur für den belasteten Stab (Lastgurt 2-3) erforderlich.

Aufgabe 4

(30 Punkte)



$$EI = 2 \cdot 10^4 \text{ kNm}^2$$

$$GA_Q \rightarrow \infty$$

$$\text{Stäbe 1,2,3,5: } EA \rightarrow \infty$$

$$\text{Stab 4: } EA = 2 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

$$c_F = 2000 \text{ kN/m}$$

$$c_\varphi = \infty$$

$$P = 50 \text{ kN}$$

$$q = 10 \text{ kN/m}$$

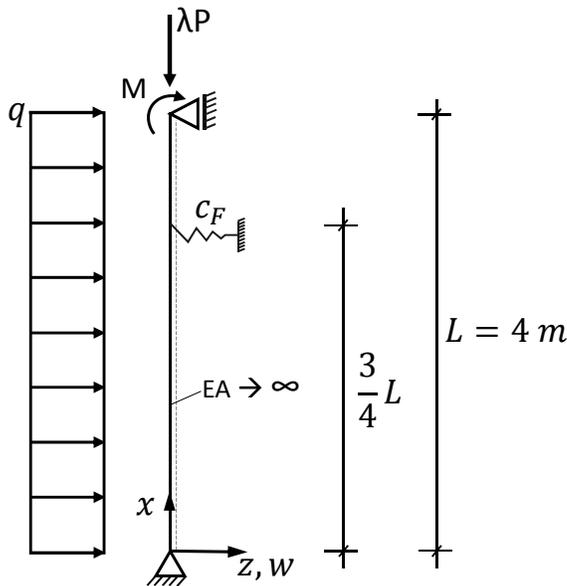
$$\Delta T/h = 40 \text{ K/m}$$

$$\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

- (2 P.) Bestimmen Sie den Grad der geometrischen Unbestimmtheit n_g des gezeigten Systems.
- (28 P.) Ermitteln Sie den zugehörigen Momentenverlauf mit Hilfe des Weggrößenverfahrens und stellen Sie diesen grafisch dar.

Aufgabe 5 (20 Punkte)

Das dargestellte statische System ist unter Berücksichtigung der dargestellten Lasteinleitung nach dem Verfahren von Ritz und unter Verwendung des Prinzips der virtuellen Verschiebungen zu bearbeiten. Verwenden Sie den angegebenen zweigliedrigen Ansatz. Alle Geometrieparameter und Materialdaten sind der Systemskizze zu entnehmen.



Belastung:

$$\begin{aligned} P &= 1200 \text{ kN} \\ M &= 78 \text{ kNm} \\ q &= 350 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Material und Querschnittswerte:

$$\begin{aligned} EI &= 2500 \text{ kNm}^2 \\ c_F &= 170 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

zweigliedriger Ansatz:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 5x \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \\ 5 \frac{x^2}{L} \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \end{bmatrix}$$

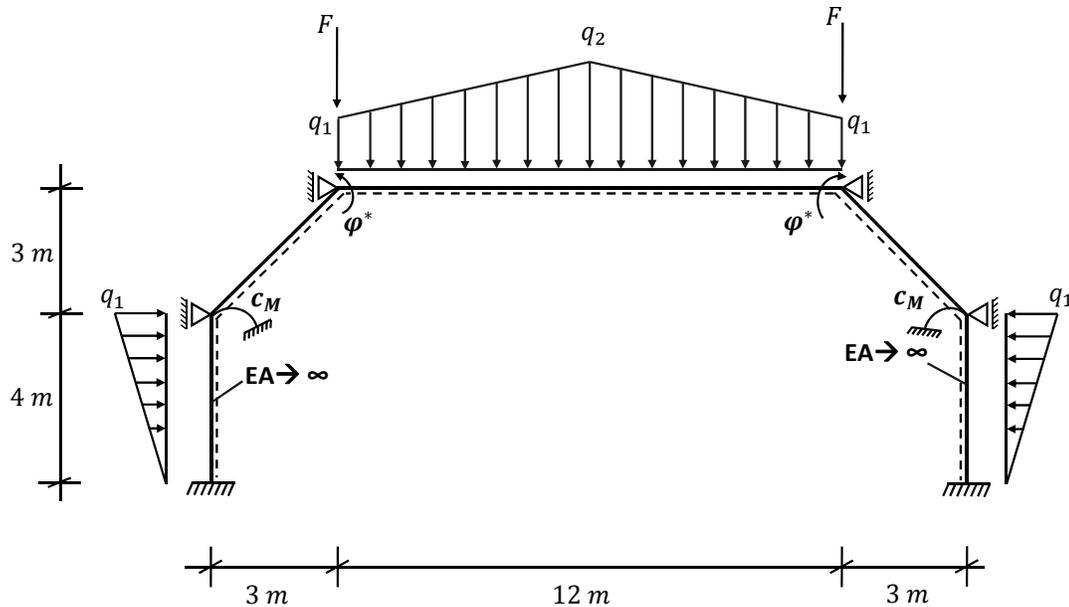
Hinweis: Der Einfluss der Axialdehnung $\varepsilon(x)$ bzw. der virtuellen Axialdehnung $\delta\varepsilon(x)$ ist für den vertikalen Stab zu vernachlässigen!

- (3 P.) Geben Sie das Prinzip der virtuellen Verschiebungen für das dargestellte System an. Drücken Sie alle Schnittgrößen und Verzerrungen durch $w(x)$ bzw. Ableitungen von $w(x)$ aus.
- (4 P.) Prüfen Sie den oben angegebenen zweigliedrigen Ansatz auf seine geometrische Zulässigkeit. Geben Sie hierfür die geometrischen Randbedingungen an.
- (11 P.) Berechnen Sie mit Hilfe des vorgegebenen Verschiebungsansatzes die materiellen Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_m , die Wegfeder-Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_{c_F} und die geometrische Steifigkeitsmatrix \mathbf{G} .
- (2 P.) Bestimmen Sie die 1. kritische Last durch das Lösen des homogenen Gleichungssystems.

Aufgabe 6

(35 Punkte)

Für die dargestellte Rahmenkonstruktion sollen die unbekanntnen Verformungen nach **Theorie 2. Ordnung** bestimmt werden. Die Normalkräfte nach Theorie I. Ordnung wurden bereits, wie auf der folgenden Seite dargestellt, berechnet. Alle Materialparameter und Geometriedaten sind bekannt und können der Systemskizze entnommen werden.



Belastung:

$$F = 40 \text{ kN}$$

$$q_1 = 80 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = 120 \text{ kN/m}$$

$$c_M = 375 \text{ kNm/rad}$$

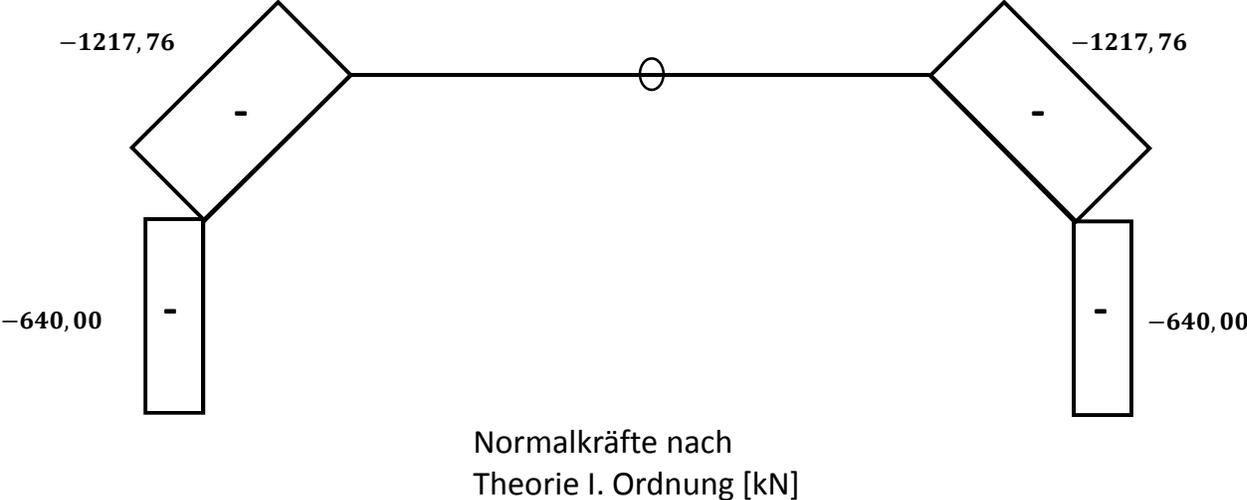
$$\varphi^* = -0,0255 \text{ rad}$$

Material und Querschnittswerte:

$$EA = 4,0 \cdot 10^7 \text{ kN}$$

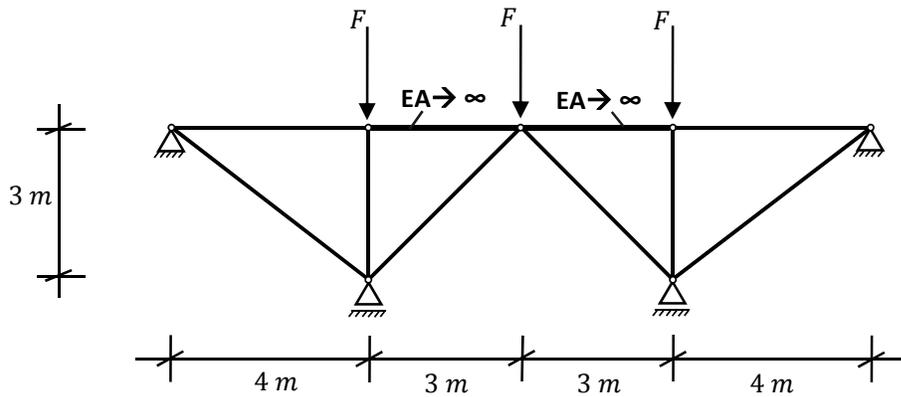
$$EI = 50400 \text{ kNm}^2$$

- (1 P.) Skizzieren Sie die Verformungsfigur für die gegebene Belastung.
- (3 P.) Zeichnen Sie unter Beachtung der Symmetrie die unbekanntnen Knotenfreiheitsgrade ein.
- (19 P.) Berechnen Sie die zu den unbekanntnen Knotenfreiheitsgraden korrespondierende reduzierte Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems \mathbf{K}_{red} .
- (5 P.) Bestimmen Sie den reduzierten Systemlastvektor \mathbf{r}_{red} .
- (7 P.) Berechnen Sie die unbekanntnen Knotenfreiheitsgrade des Tragwerks und vergleichen Sie die berechneten Ergebnisse mit Ihrer erwarteten Verformungsfigur.



Aufgabe 7 (20 Punkte)

Das dargestellte symmetrische Fachwerkssystem ist an drei Knoten mit je einer Einzelkraft F belastet. Alle Materialparameter und Geometriedaten sind der Systemskizze zu entnehmen. Alle Berechnungen sind mit Hilfe der **Finite Elemente Methode** auf Basis linearer Ansatzfunktionen durchzuführen.



Belastung:

$$F = 50 \text{ kN}$$

Material und Querschnittswerte:

$$EA = 63000 \text{ kN}$$

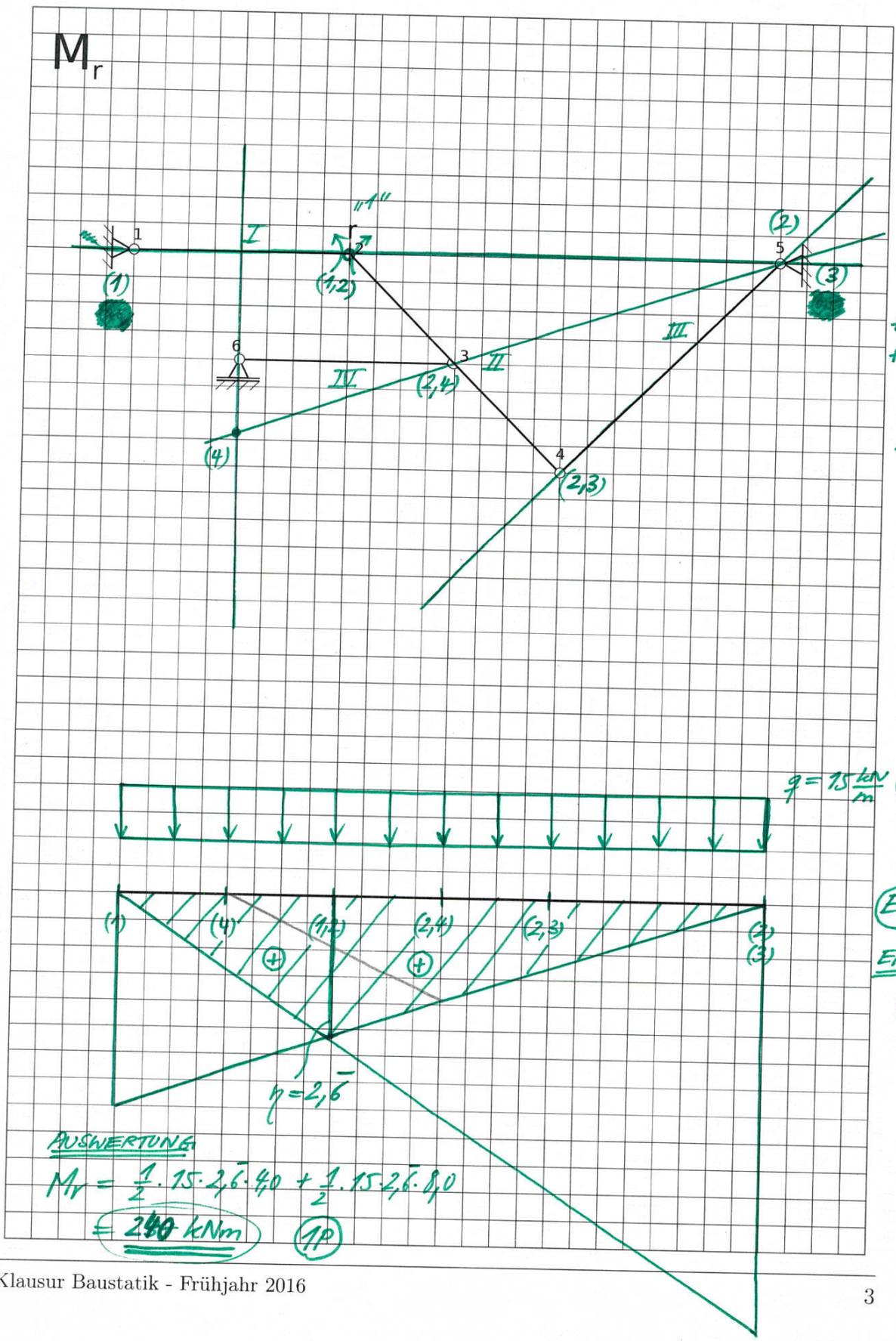
- (1 P.) Skizzieren Sie die Verformungsfigur des Systems.
- (2 P.) Wieviel unabhängige Freiheitsgrade hat das System unter Berücksichtigung der Symmetrie?
- (11 P.) Bestimmen Sie alle notwendigen Einträge der Elementsteifigkeitsmatrizen \mathbf{k}^e .
- (1 P.) Bestimmen Sie die zu den unbekanntenen Knotenfreiheitsgraden korrespondierende reduzierte Gesamtsteifigkeitsmatrix \mathbf{K}_{red} des Systems.
- (2 P.) Bestimmen Sie den reduzierten Systemknotenlastvektor \mathbf{r}_{red} .
- (3 P.) Berechnen Sie die Verformungen \mathbf{u} des Systems und vergleichen Sie die berechneten Ergebnisse mit Ihrer erwarteten Verformungsfigur.

Aufgabe 2 (25 Punkte)

Lösung auf folgenden Seiten

Lösung

بسم الله



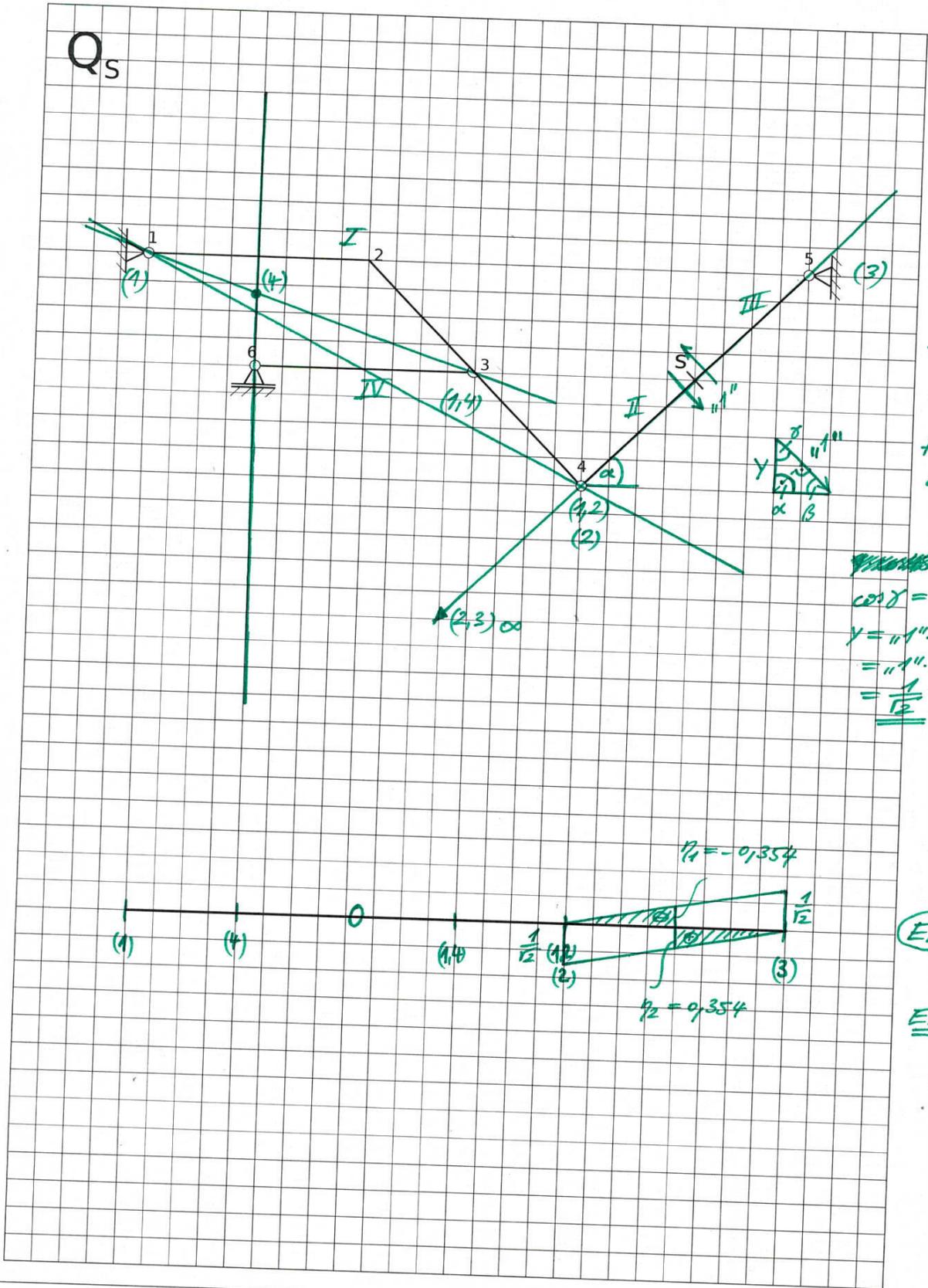
POLPLAN
 4HP $\hat{=}$ (3P)
 + 3NP $\hat{=}$ (1P)
 + Konstruktion $\hat{=}$ (1P)

 Σ (5P)

EL-Mr
EINFLUSSLINIE
 (5P)

AUSWERTUNG
 $M_1 = \frac{1}{2} \cdot 15 \cdot 2,6 \cdot 4,0 + \frac{1}{2} \cdot 15 \cdot 2,6 \cdot 8,0$
 $= 240 \text{ kNm}$ (1P)

/Σ 12P



POLPLAN
 $4 \cdot HPE \hat{=} (3P)$
 $+ 3 \cdot NPE \hat{=} (2P)$
 $+ 1 \cdot \text{Konstruktion} \hat{=} (1P)$
 $\Sigma (5P)$

$\tan \alpha = \frac{4}{4}$
 $\alpha = 45^\circ = \beta = \delta$

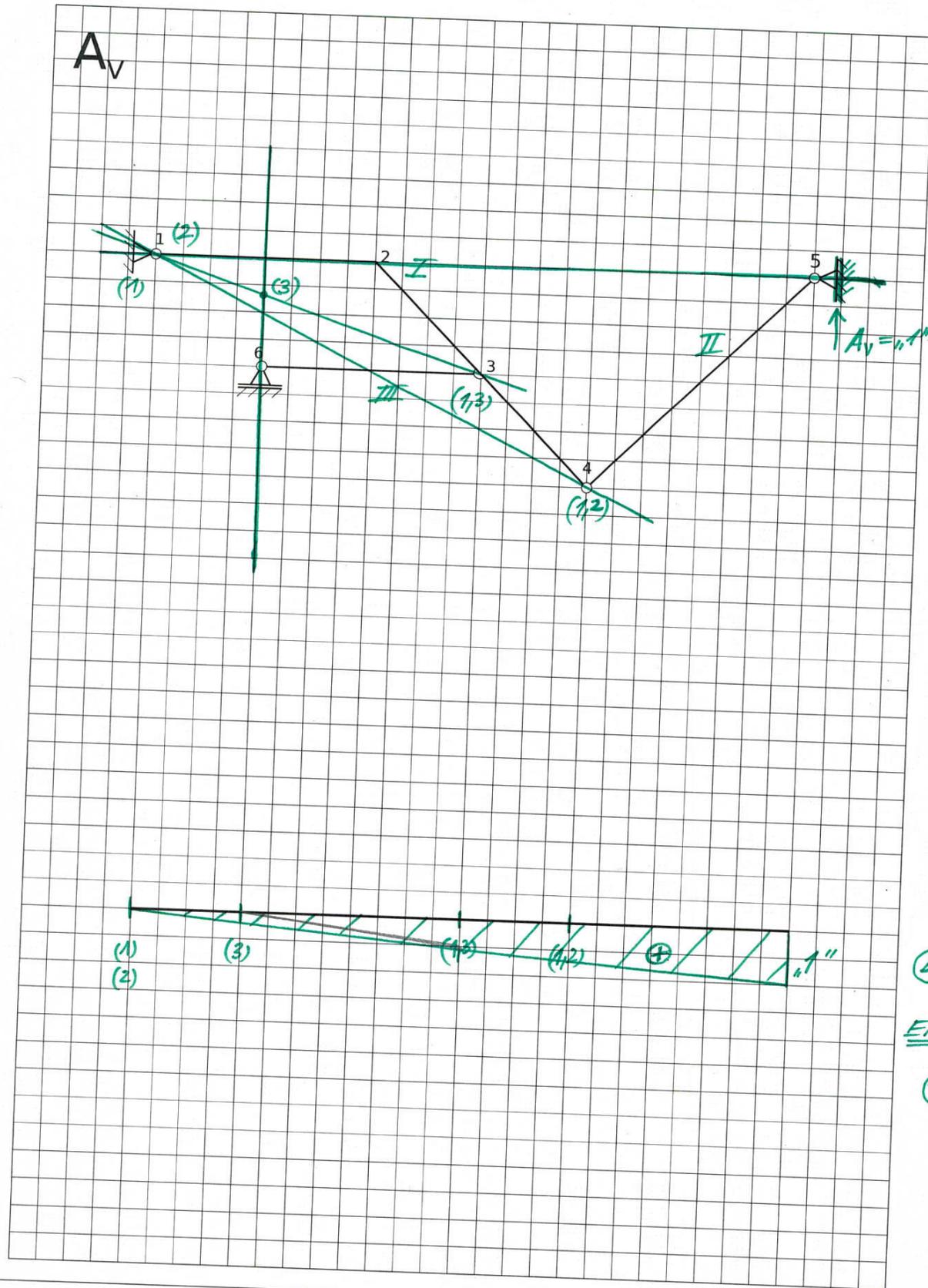


~~Winkel~~
 $\cos \delta = \frac{y}{1.4}$
 $y = 1.4 \cdot \cos \delta$
 $= 1.4 \cdot \cos 45^\circ$
 $= \frac{1}{\sqrt{2}}$

EL-Q₆

EINFLUSSLINE

4P



POLPLAN

1,5P

3HP, 2NP
+ Konstruktion

EL-AV

EINFLUSSLINIE

1,5P

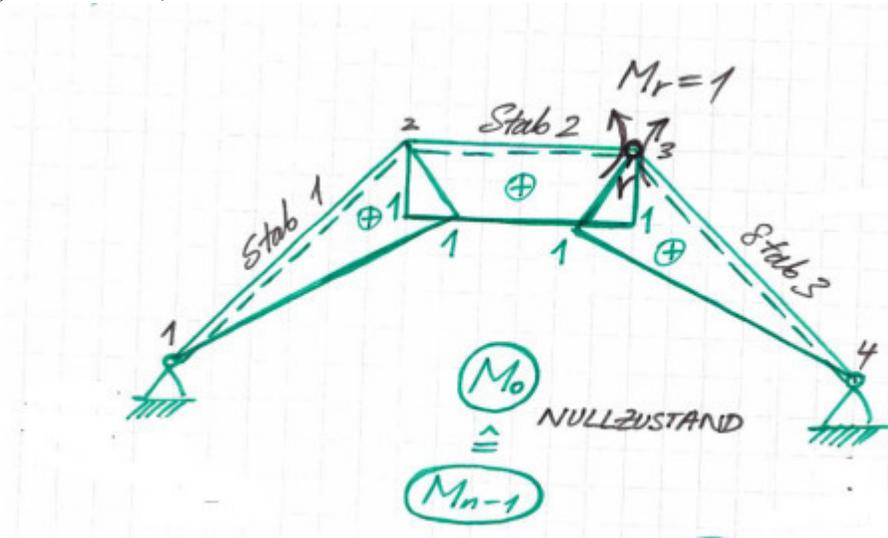
Aufgabe 3

(20 Punkte)

b) Nur für belasteten Stab nötig:

$$w(x) = 4,5 \cdot 10^{-5}(x/3 - x^2/9) + 2,914 \cdot 10^{-5}(1 - x/3) - 2,914 \cdot 10^{-5}x/3$$

$$f = -17157,2875$$



c) $M_r = -3,86 \text{ kNm}$

Aufgabe 4

(30 Punkte)

b) $\varphi = -1,0727 \cdot 10^{-3}$

$w = 2,3545 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$M_i^1 = 27,2587$

$M_k^1 = 8,0587$

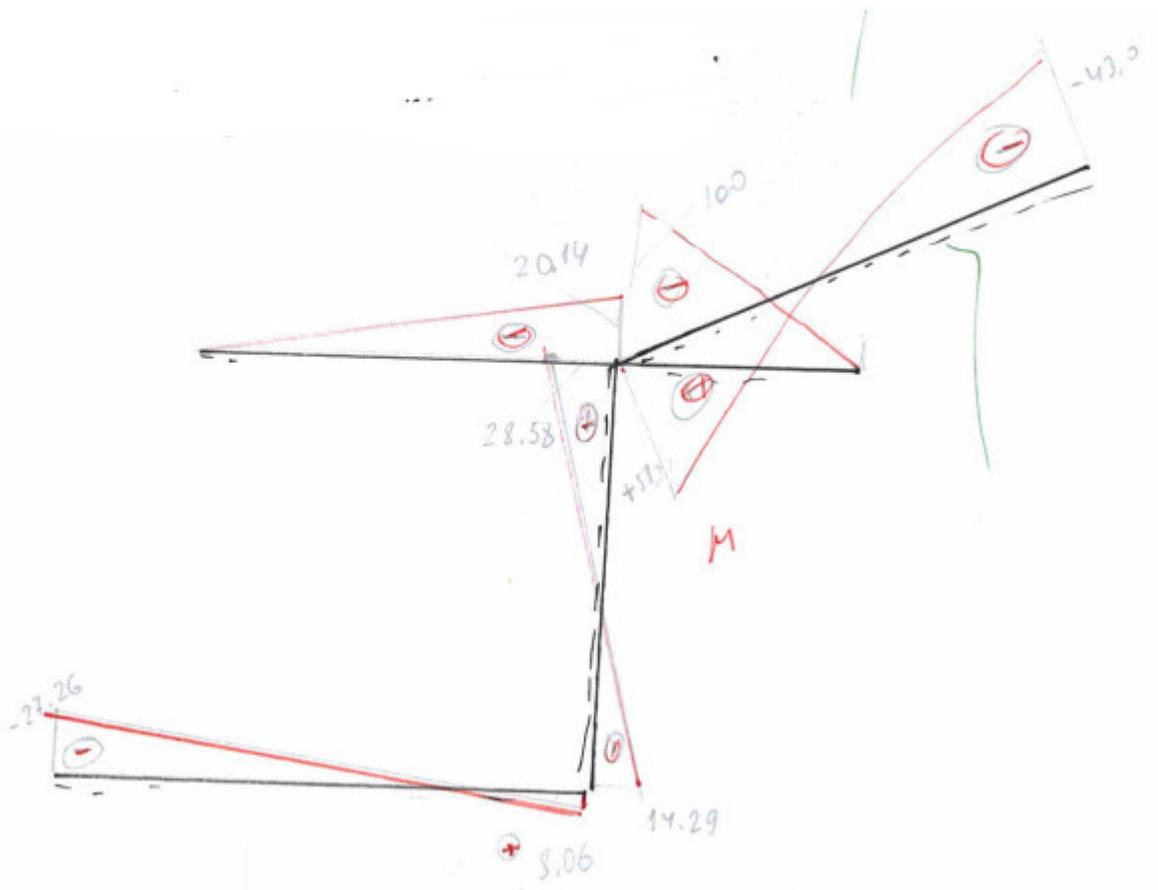
$M_k^2 = -20,1383$

$M_i^3 = -28,5798$

$M_k^3 = -14,2899$

$M_i^4 = -51,2819$

$M_k^4 = -42,9958$



Aufgabe 5 (20 Punkte)

a)

$$\begin{aligned}\delta W &= \delta W_{\text{int}} - \delta W_{\text{ext}} = 0 \\ \delta W_{\text{int}} &= \int_0^L EI w^{II} \delta w^{II} dx - \lambda P \int_0^L w^I \delta w^I dx + c_F w(3) \delta w(3) \\ \delta W_{\text{ext}} &= \int_0^L q \delta w dx - M(-\delta w^I(4))\end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned}h_1 &= 5x \left(\frac{x}{L} - 1 \right) & h_1' &= 10 \frac{x}{L} - 5 & h_1'' &= \frac{10}{L} \\ h_2 &= 5 \frac{x^2}{L} \left(\frac{x}{L} - 1 \right) & h_2' &= 15 \frac{x^2}{L^2} - 10 \frac{x}{L} & h_2'' &= 30 \frac{x}{L^2} - \frac{10}{L}\end{aligned}$$

geometrische Randbedingungen überprüfen:

$$\begin{aligned}w(x=0) = 0 &\rightarrow h_1(0) = 0\checkmark & h_2(0) &= 0\checkmark \\ w(x=L) = 0 &\rightarrow h_1(L) = 0\checkmark & h_2(L) &= 0\checkmark\end{aligned}$$

c) materielle Steifigkeitsmatrix

$$\mathbf{K}_m = \begin{bmatrix} 62500 & 31250 \\ 31250 & 62500 \end{bmatrix}$$

Wegfedersteifigkeitsmatrix

$$\mathbf{K}_{c_F} = \begin{bmatrix} 2390,63 & 1792,97 \\ 1792,97 & 1344,73 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow \mathbf{K}_{ges} = \mathbf{K}_m + \mathbf{K}_{c_F} = \begin{bmatrix} 64890,63 & 33042,97 \\ 33042,97 & 63844,73 \end{bmatrix}$$

geometrische Steifigkeitsmatrix

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 40000 & 20000 \\ 20000 & 16000 \end{bmatrix}$$

d) $P_{krit} = P \cdot \lambda_{\text{maßgebend}} = 1946,40 \text{ kN}$

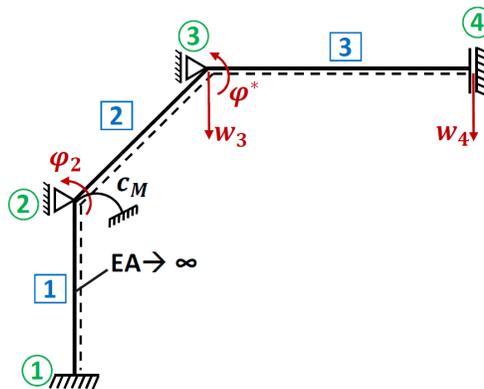
Aufgabe 6

(35 Punkte)

a) Verformungsfigur



b) Knotenfreiheitsgrade



c)

$$k^1_{\text{red}} = [50059, 80]$$

$$k^2_{\text{red}} = \begin{bmatrix} 46828,57 & 11794,26 & 23936,98 \\ 11794,26 & 4717833,32 & 11794,26 \\ 23936,98 & 11794,26 & 46828,57 \end{bmatrix}$$

$$k^3_{\text{red}} = \begin{bmatrix} 2800 & -8400 & -2800 \\ -8400 & 33600 & 8400 \\ -2800 & 8400 & 2800 \end{bmatrix}$$

Assemblieren:

$$\mathbf{K}_{red} = \begin{bmatrix} 97263,37 & 11794,26 & 0 & 23936,98 \\ 11794,26 & 4720633,32 & -2800 & 3394,26 \\ 0 & -2800 & 2800 & 8400 \\ 23936,98 & 3394,26 & 8400 & 80428,57 \end{bmatrix}$$

d) Knotenlastvektor

$$r_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 40 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Elementlastvektoren

$$r_p^1 = [63,98]$$

$$r_p^3 = \begin{bmatrix} 276 \\ -288 \\ 324 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{r}_{red} = \begin{bmatrix} 63,98 \\ 316 \\ 324 \\ -288 \end{bmatrix}$$

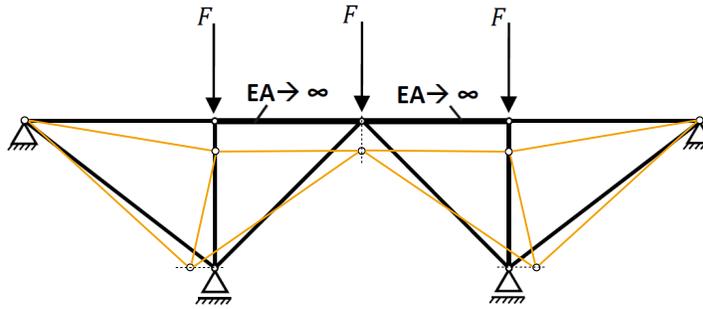
e)

$$\begin{bmatrix} \varphi_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 97263,37 & 11794,26 & 0 \\ 11794,26 & 4720633,32 & -2800 \\ 0 & -2800 & 2800 \end{bmatrix}^{(-1)} \begin{bmatrix} 674,37 \\ 402,55 \\ 538,20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00691 \\ 0,000182 \\ 0,1924 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{rad} \\ \text{m} \\ \text{m} \end{bmatrix}$$

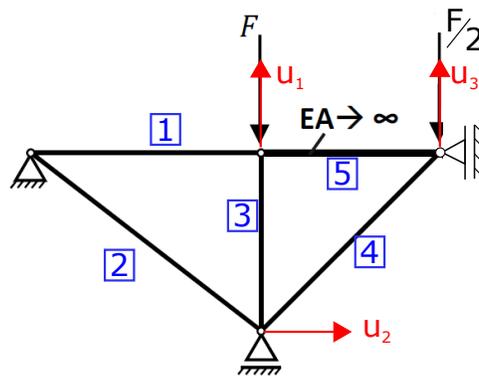
Die berechneten Werten stimmt mit der Verformungsfigur überein.

Aufgabe 7 (20 Punkte)

a) Verformungsfigur



b) 3 unabhängige Freiheitsgrade



c)

$$k^1_{\text{red}} = [0]$$

$$k^2_{\text{red}} = [8063, 98]$$

$$k^3_{\text{red}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 21000 \end{bmatrix}$$

$$k_{\text{red}}^4 = \begin{bmatrix} 7424,62 & -7424,62 \\ -7424,62 & 7424,62 \end{bmatrix}$$

$$k_{\text{red}}^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

d) Assemblieren:

$$\mathbf{K}_{\text{red}} = \begin{bmatrix} 21000 & 0 & 0 \\ 0 & 15488,60 & -7424,62 \\ 0 & -7424,62 & 7424,62 \end{bmatrix}$$

e) $\mathbf{r}_{\text{red}} = \begin{bmatrix} -50 \\ 0 \\ -25 \end{bmatrix}$

f)

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,00238 \\ -0,00310 \\ -0,00647 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{m} \\ \text{m} \\ \text{m} \end{bmatrix}$$

Die berechneten Werten stimmt mit der Verformungsfigur überein.