

# Aufgabenblätter zur Klausur

Robotik I: Einführung in die Robotik

am 16. März 2018, 14:00 – 15:00 Uhr

- Beschriften Sie bitte gleich zu Beginn jedes Lösungsblatt deutlich lesbar mit Ihrem Namen und Ihrer Matrikelnummer.
- Diese Aufgabenblätter werden nicht abgegeben. Tragen Sie Ihre Lösung deshalb ausschließlich in die für jede Aufgabe vorgesehenen Bereiche der Lösungsblätter ein. Lösungen auf separat abgegebenen Blättern werden nicht gewertet.
- Außer Schreibmaterial sind während der Klausur keine Hilfsmittel zugelassen. Täuschungsversuche durch Verwendung unzulässiger Hilfsmittel führen unmittelbar zum Ausschluss von der Klausur und zur Note „nicht bestanden“.
- Soweit in der Aufgabenstellung nichts anderes angegeben ist, tragen Sie in die Lösungsblätter bitte nur die Endergebnisse ein. Die Rückseiten der Aufgabenblätter können Sie als Konzeptpapier verwenden. Weiteres Konzeptpapier können Sie auf Anfrage während der Klausur erhalten.
- Halten Sie Begründungen oder Erklärungen bitte so kurz wie möglich. (Der auf den Lösungsblättern für eine Aufgabe vorgesehene Platz steht übrigens in keinem Zusammenhang mit dem Umfang einer korrekten Lösung!)
- Die Gesamtpunktzahl beträgt 45 Punkte.

*Viel Erfolg und viel Glück!*

**Aufgabe 1 Rotationen**

(4 Punkte)

Gegeben sei die  $3 \times 3$  Rotationsmatrix  $R$  und der Translationsvektor  $t$ :

$$R = \begin{pmatrix} 0.7 & 0 & 0.7 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.7 & 0 & 0.7 \end{pmatrix}, \quad t = \begin{pmatrix} 300 \\ 200 \\ 100 \end{pmatrix}$$

**Hinweis:**  $\sin(\frac{\pi}{4}) = \cos(\frac{\pi}{4}) \approx 0.7$ 

1. Berechnen Sie die zur Rotationsmatrix  $R$  gehörenden  $RPY$ -Winkel (XYZ-Konvention). 1 P.
2. Die Rotationsmatrix  $R$  und der Translationsvektor  $t$  definieren die Lage eines lokalen Objektkoordinatensystems  $OKS$  im Weltkoordinatensystem  $WKS$ . Geben Sie die homogene Transformationsmatrix  ${}^{WKS}T_{OKS}$  an. 1 P.
3. Der Punkt  $p = (-200, 100, 100)^T$  sei im lokalen Objektkoordinatensystem  $OKS$  definiert. Transformieren Sie  $p$  in das Weltkoordinatensystem  $WKS$  aus Aufgabenteil 1.2. 2 P.

## Aufgabe 2 Kinematik

(6 Punkte)

In Abbildung 1 ist ein Roboterarm mit vier Bewegungsfreiheitsgraden (ein Schubgelenk und drei Rotationsgelenke) in seiner Ruhestellung mit den Achsen  $x_i$  und  $z_i$  der rechtshändigen Gelenkkoordinatensysteme dargestellt. Die Segmentlängen sind in Millimetern angegeben.

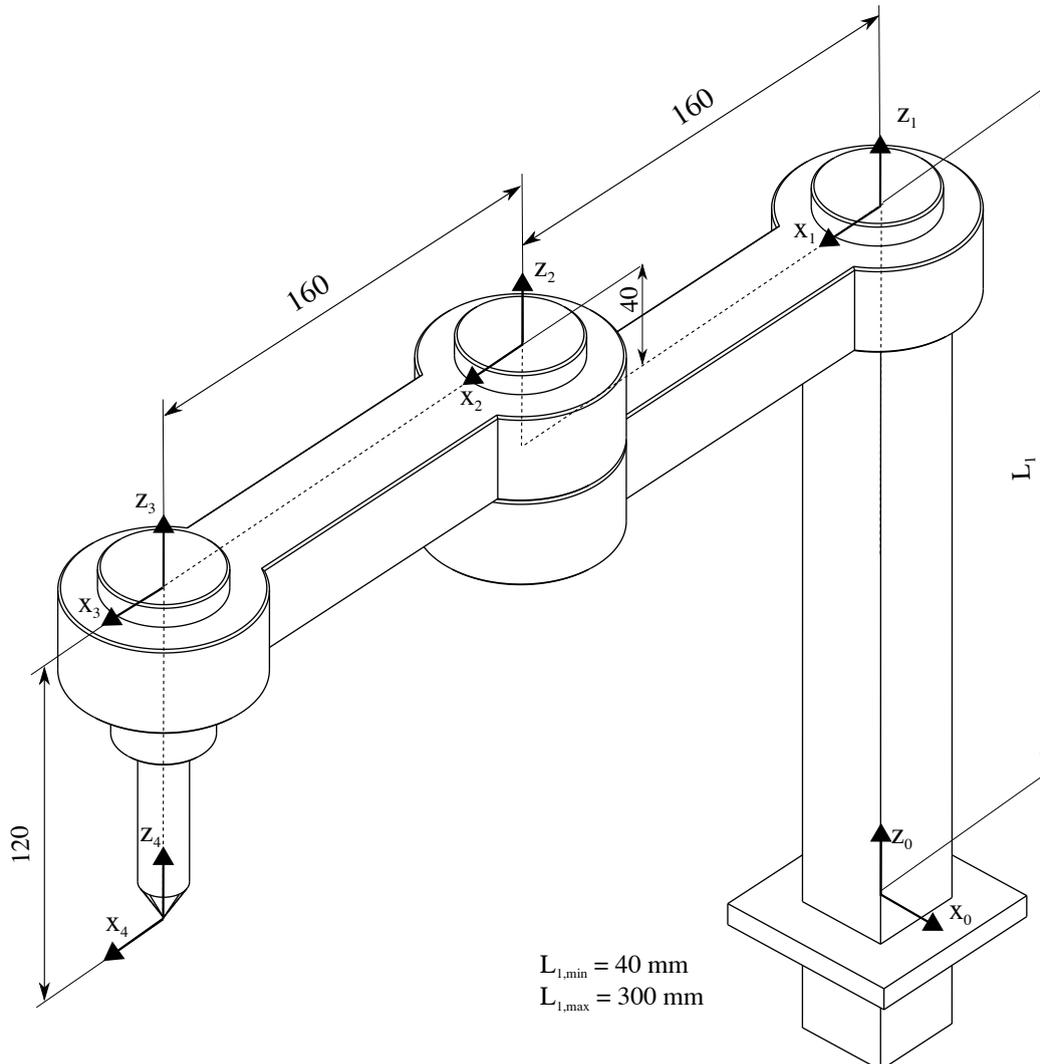


Abbildung 1: Roboterarm in der Ruhestellung

1. Vervollständigen Sie die Tabelle im Lösungsblatt, indem Sie alle fehlenden Denavit-Hartenberg-Parameter eintragen. 4 P.
2. Welcher geometrischen Form entspricht der Arbeitsraum des Roboterarms näherungsweise, wenn alle Rotationsgelenke unendlich drehbar sind? 1 P.
3. Um jede Orientierung des Endeffektors in  $SE(3)$  realisieren zu können, soll der Roboterarm um zwei weitere Gelenke erweitert werden. Welcher DH-Parameter zur Beschreibung dieser zusätzlichen Gelenke muss ungleich 0 sein? 1 P.

### Aufgabe 3 Regelung

(8 Punkte)

1. In Abbildung 2 sei das Blockschaltbild eines Regelkreises gegeben. Benennen Sie in der Tabelle auf dem Lösungsblatt *Block 1* und *Block 2* sowie die fehlenden Größen des Regelkreises. 3 P.

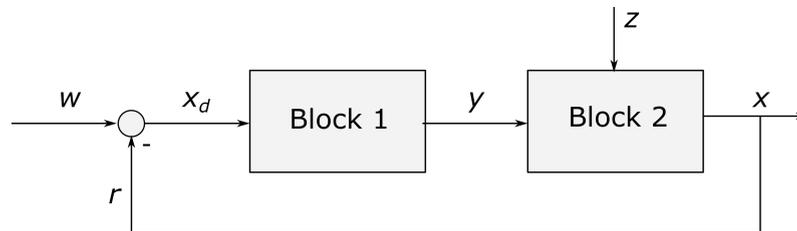


Abbildung 2: Blockschaltbild eines Regelkreises.

2. Auf dem Lösungsblatt ist ein Regelkreis zur Geschwindigkeitsregelung dargestellt. Diese soll später für eine Positionsregelung erweitert werden.

- (a) Vervollständigen Sie das Blockschaltbild auf dem Lösungsblatt für die Geschwindigkeitsregelung. Benutzen Sie folgenden Bezeichnungen: 1 P.

- $\dot{q}_{soll}$  für die Führungsgröße der Geschwindigkeit
- $\dot{q}_{ist}$  für die Regelgröße der Geschwindigkeit

- (b) Erweitern Sie das Blockschaltbild der Geschwindigkeitsregelung in eine kaskadierte Positionsregelung. Benutzen Sie u.a. folgenden Bezeichnungen: 2 P.

- $q_{soll}$  für die Führungsgröße der Position

3. Geben Sie für einen PI-Regler die Gleichungen im Zeit- und Frequenzbereich an. Benutzen Sie als Eingangsgröße  $e(t)$  und als Ausgangsgröße  $u(t)$  des Reglers. 2 P.

**Aufgabe 4 Bewegungsplanung**

(7 Punkte)

1. Gegeben sei das folgende numerierte Feld:

4 P.

|                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>0</b><br>cost: 1  | <b>1</b><br>cost: 1  | <b>2</b><br>cost: 1  | <b>3</b><br>cost: 3  | <b>4</b><br>cost: 1  | <b>5</b><br>cost: 1  |
| <b>6</b><br>cost: 8  | <b>7</b><br>cost: 1  | <b>8</b><br>cost: 8  | <b>9</b><br>cost: 1  | <b>10</b><br>cost: 1 | <b>11</b><br>cost: 1 |
| <b>12</b><br>cost: 1 | <b>13</b><br>cost: 1 | <b>14</b><br>cost: 8 | <b>15</b><br>cost: 1 | <b>16</b><br>cost: 1 | <b>17</b><br>cost: 1 |
| <b>18</b><br>cost: 1 | <b>19</b><br>cost: 1 | <b>20</b><br>cost: 1 | <b>21</b><br>cost: 2 | <b>22</b><br>cost: 2 | <b>23</b><br>cost: 1 |
| <b>24</b><br>cost: 1 | <b>25</b><br>cost: 1 | <b>26</b><br>cost: 1 | <b>27</b><br>cost: 4 | <b>28</b><br>cost: 1 | <b>29</b><br>cost: 1 |
| <b>30</b><br>cost: 1 | <b>31</b><br>cost: 1 | <b>32</b><br>cost: 3 | <b>33</b><br>cost: 1 | <b>34</b><br>cost: 1 | <b>35</b><br>cost: 1 |

Es soll mithilfe des  $A^*$ -Algorithmus eine Bewegung vom Startfeld (Nummer **7**) zum Zielfeld (Nummer **28**) geplant werden. Dazu gelten die folgenden Regeln:

- Jedes Feld hat die als *cost* angegebenen Kosten.
- Die Kosten entstehen durch das Betreten eines Feldes.
- Es sind nur horizontale und vertikale Bewegungen erlaubt.
- Als Heuristik für den  $A^*$ -Algorithmus wird die euklidische Distanz verwendet.

Führen Sie die ersten beiden Schritte des  $A^*$ -Algorithmus aus. Geben Sie für jeden Schritt den zu expandierenden Knoten, das *Open-Set* und *Closed-Set* nach der Expansion an.

Berechnen Sie im ersten Schritt für jeden Knoten aus dem neuen *Open-Set* die akkumulierten Kosten  $g$  und die Heuristik  $h$ . Geben Sie im zweiten Schritt für jeden Knoten aus dem neuen *Open-Set* die akkumulierten Kosten  $g$  an.

**Hinweis:** Die folgenden Teilaufgaben sind unabhängig von der ersten Teilaufgabe.

2. Ist die Manhattan-Distanz eine zulässige Heuristik für den  $A^*$ -Algorithmus in  $\mathbb{R}^2$ ? Begründen Sie Ihre Antwort. 1 P.
3. Für welche Heuristik sind der  $A^*$ -Algorithmus und Dijkstra's Algorithmus äquivalent? 1 P.
4. Nennen Sie zwei Eigenschaften des  $A^*$ -Algorithmus bei Verwendung einer zulässigen Heuristik. 1 P.

**Aufgabe 5 Greifplanung**

(6 Punkte)

Gegeben ist ein dreifingeriger planarer Griff (2D) mit folgenden Wrenches in der Form  $w = (f_x, f_y, \tau)$ :

$$\begin{aligned} w_{a,1} &= (1, -1, 0), & w_{b,1} &= (-1, -1, 1) \\ w_{a,2} &= (-1, 1, 0), & w_{b,2} &= (1, 1, 1) \\ w_{a,3} &= (-1, 2, 1), & w_{b,3} &= (1, 1, 0) \end{aligned}$$

1. Zeichnen Sie die 2D-Projektion des *Grasp Wrench Space* (GWS) auf die  $(f_x, f_y)$ -Ebene und die  $(f_y, \tau)$ -Ebene in die vorgegebenen Koordinatensysteme im Lösungsblatt ein. 4 P.
2. Ist der Griff kraftgeschlossen? Begründen Sie ihre Antwort. 2 P.

**Aufgabe 6 Bildverarbeitung**

(8 Punkte)

1. Gegeben sei eine Lochkamera in Positivlage mit der Brennweite  $f = 20 \text{ mm}$ . Berechnen Sie die Projektion eines Szenenpunktes  $(100 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 200 \text{ mm})^T$  auf einen Bildpunkt  $(u, v)^T$  mit Hilfe des zweiten Strahlensatzes. Geben Sie Ihren Lösungsweg an. 2 P.
2. Gegeben sei das Graustufenbild  $B_1$ : 3 P.

$$B_1 = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 4 \end{pmatrix}$$

Berechnen Sie das Ergebnis der Filterung von  $B_1$  mit dem  $(3 \times 3)$ -Mittelwertfilter. Nehmen Sie 0 als konstanten Wert für die Randpixel an.

3. Wenden Sie die morphologische Operation *Erosion* auf das Bild  $B_2$  an. 3 P.

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 255 & 255 & 255 \\ 0 & 0 & 0 & 255 & 255 & 255 \\ 0 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 0 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 0 & 0 & 0 & 255 & 255 & 255 \\ 0 & 0 & 0 & 255 & 255 & 255 \end{pmatrix}.$$

Gehen Sie dabei von einer 8er-Nachbarschaft aus. Ignorieren Sie dabei die Randpixel, d.h. das Ergebnis ist ein  $4 \times 4$  Bild.

**Aufgabe 7** *Symbolisches Planen*

(6 Punkte)

Gegeben sei die folgende STRIPS-Planungsdomäne mit initialem Zustand, Zielzustand und verfügbaren Planungsoperatoren.

```
Initial state: Location(L1), Location(L2),
              Block(A), Block(B), Block(C)
              On(A,B), On(B,C), On(C, L1),
              Clear(A), Clear(L2),
              HandEmpty
```

```
Goal state:   On(C,B), On(B,A), On(A,L2)
```

Actions:

```
// Agent nimmt einen Block X von Ort/Block Y auf.
```

```
pickup(X, Y)
```

```
Preconditions: Clear(X), On(X,Y), HandEmpty
```

```
Effects:       !Clear(X), !On(X,Y), !HandEmpty,
              InHand(X), Clear(Y)
```

```
// Agent platziert einen gegriffenen Block X auf Ort/Block Y.
```

```
putdown(X, Y)
```

```
Preconditions: InHand(X), Clear(Y)
```

```
Effects:       !InHand(X), !Clear(Y),
              HandEmpty, On(X,Y), Clear(X)
```

**Hinweis:** Ein Ausrufezeichen negiert ein Prädikat.

1. Geben Sie eine minimale Aktionssequenz an, die den Initialzustand in den Zielzustand überführt. Achten Sie dabei auf die korrekte Parametrisierung der Aktionen. 3 P.

2. Aufgrund welcher Annahme werden im Initialzustand keine negierten Prädikate benötigt? 1 P.

3. Gegeben sei der folgende modifizierte Zielzustand: 2 P.

```
Goal state:   On(C,B), On(B,A), On(A,L1)
```

Kann das Planungsproblem gelöst werden? Begründen Sie Ihre Antwort.

# Lösungsblätter zur Klausur

Robotik I: Einführung in die Robotik

am 16. März 2018, 14:00 – 15:00 Uhr

|       |          |                 |
|-------|----------|-----------------|
| Name: | Vorname: | Matrikelnummer: |
|-------|----------|-----------------|

|           |               |
|-----------|---------------|
|           |               |
| Aufgabe 1 | von 4 Punkten |
| Aufgabe 2 | von 6 Punkten |
| Aufgabe 3 | von 8 Punkten |
| Aufgabe 4 | von 7 Punkten |
| Aufgabe 5 | von 6 Punkten |
| Aufgabe 6 | von 8 Punkten |
| Aufgabe 7 | von 6 Punkten |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Gesamtpunktzahl:</b> |  |
|-------------------------|--|

|  |              |
|--|--------------|
|  | <b>Note:</b> |
|--|--------------|

## Aufgabe 1 *Rotationen*

1. RPY-Winkel von  $R$ :

2. Homogene Transformationsmatrix  ${}^{WKS}T_{OKS}$ :

3. Transformation von  $p$  in das Weltkoordinatensystem  $WKS$ :

## Aufgabe 2 *Kinematik*

1. DH-Parameter des Roboters:

| <i>Gelenk</i> | $\theta_i$ [°] | $d_i$ [mm] | $a_i$ [mm] | $\alpha_i$ [°] |
|---------------|----------------|------------|------------|----------------|
| G1            |                |            |            |                |
| G2            |                |            |            |                |
| G3            | $\theta_3$     | 0          | 160        | 0              |
| G4            |                |            | 0          | 0              |

2. Arbeitsraum:

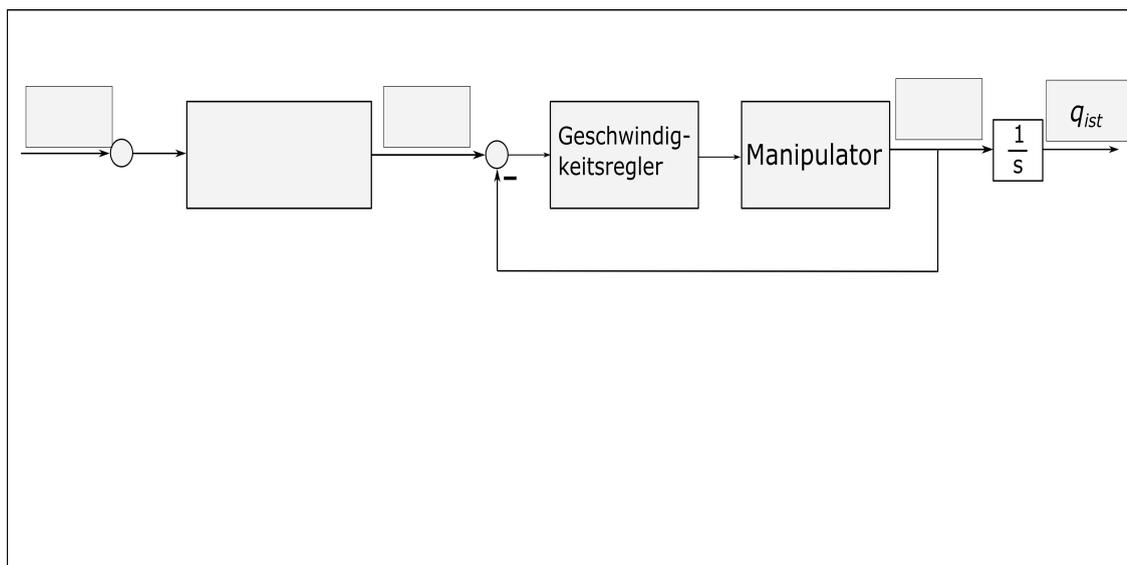
3. DH-Parameter ungleich 0:

## Aufgabe 3 *Regelung*

1. Vervollständigen Sie die Tabelle:

| Regelkreisgröße | Name          |
|-----------------|---------------|
| Block 1         |               |
| Block 2         |               |
| $w$             |               |
| $x_d$           |               |
| $y$             | Stellgröße    |
| $x$             |               |
| $r$             | Rückführgröße |
| $z$             |               |

2. Vervollständigen Sie das Blockschaltbild:



3. Gleichungen für den PI-Regler im Zeit und Frequenzbereich:

•  $u(t) =$

•  $U(s) =$

## Aufgabe 4 *Bewegungsplanung*

1.  $A^*$ -Schritte:

**Schritt 1:**  $O = \{7\}$        $C = \{\}$        $g(7) = 0$

– Expandierter Knoten:

– Neues Closed Set:  $C = \{ \quad \quad \quad \}$

– Neues Open Set:

| Knoten | Kosten ( $g$ ) | Heuristik ( $h$ ) |
|--------|----------------|-------------------|
|        |                |                   |

**Schritt 2:** – Expandierter Knoten:

– Neues Closed Set:  $C = \{ \quad \quad \quad \}$

– Neues Open Set:

| Knoten | Kosten ( $g$ ) |
|--------|----------------|
|        |                |

2. Manhattan-Distanz zulässige Heuristik in  $\mathbb{R}^2$ :

3. Heuristik für Dijkstra's Algorithmus:

$$h(x) =$$

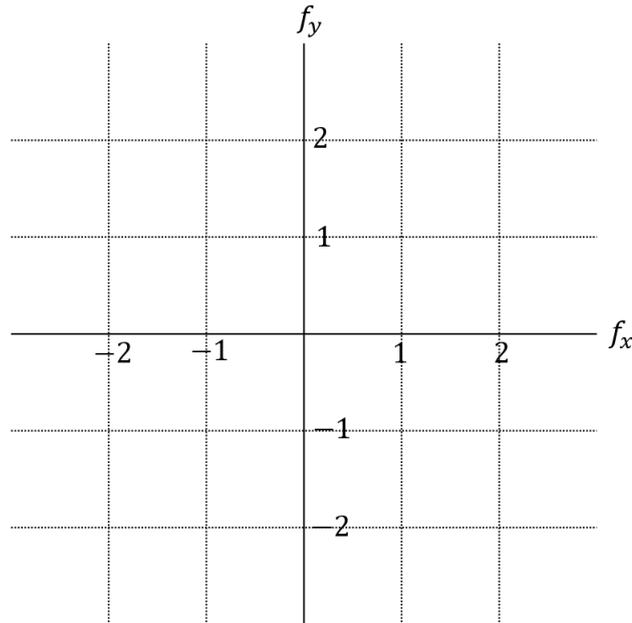
4. Zwei Eigenschaften des bei zulässiger Heuristik:

1)

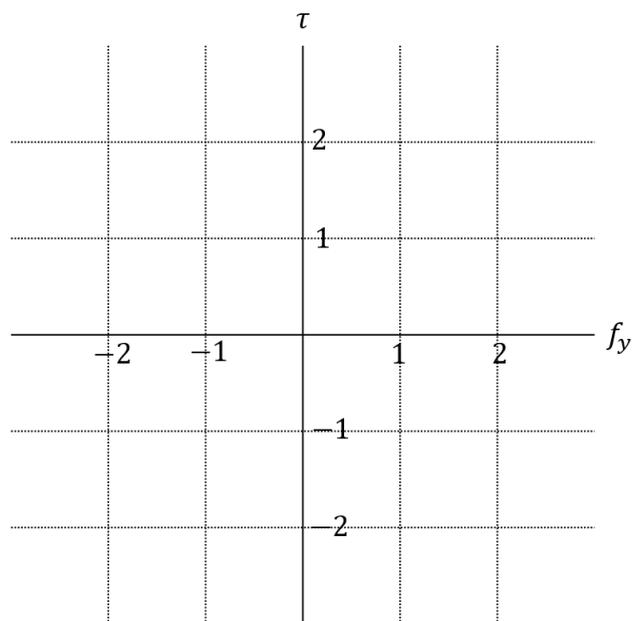
2)

## Aufgabe 5 Greifplanung

1. (a) Projektion auf die  $(f_x, f_y)$ -Ebene:



- (b) Projektion auf die  $(f_y, \tau)$ -Ebene:



2. Kraftgeschlossenheit:

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

8

## **Aufgabe 6** *Bildverarbeitung*

1. Projektion des Szenenpunktes:

2. Ergebnis der Mittelwert-Filterung:

3. Ergebnis der Erosion:

## Aufgabe 7 *Symbolisches Planen*

1. Minimale Aktionssequenz:

2. Wieso keine negierten Prädikate benötigt?

3. Kann das modifizierte Planungsproblem gelöst werden?