

<b>5</b>	<b>Zur Robotik .....</b>	<b>1</b>
5.1	Einführung .....	1
5.1.1	Historische Entwicklung .....	1
5.1.2	Wozu Roboter? .....	2
5.1.3	Heutige Anwendungsbereiche von Industrierobotern .....	3
5.1.4	Neuzeitliche Anwendungsbereiche von Robotern .....	5
5.2	Das System "Industrieroboter" .....	7
5.2.1	Teilsysteme des Industrieroboters und ihre Funktionen .....	7
5.2.2	Grundkonfigurationen von Robotern mit 3 FHG .....	8
5.2.3	Feinbewegung der Effektoren .....	9
5.2.4	Varianten für Effektorbewegungen .....	10
5.3	Kinematik der Roboter .....	11
5.3.1	Notation .....	11
5.3.2	Kinematik des Effektors .....	12
5.3.3	Denavit-Hartenberg-Transformation .....	13
5.3.4	Inverse Kinematik (Rückwärtstransformation) .....	16
5.3.5	Kleine Bewegungsänderungen um einen Arbeitspunkt .....	18
5.3.6	Zusammenfassung der Kinematik von Robotern .....	19
5.4	Steuerung und Programmierung von Robotern .....	20
5.4.1	Prinzip der Robotersteuerung .....	20
5.4.2	Mögliche Bahnkurven .....	21
5.4.3	Mögliche Bahnsteuerungen .....	22
5.4.4	Programmierverfahren .....	23
5.4.5	Programmiersprachen .....	26
5.5	Roboterwerkzeuge .....	27
5.5.1	Greifer .....	27
	Anhang A: Beispiel für ein SRCL-Programm .....	30
	Aufgaben zu Kap. 5 .....	31



## 5 Zur Robotik

### 5.1 Einführung

☞ **Industrieroboter** sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit **mehreren Achsen**, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln **frei** (d.h. ohne mechanischen Eingriff) **programmierbar** und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.  
(VDI-2860 1990)

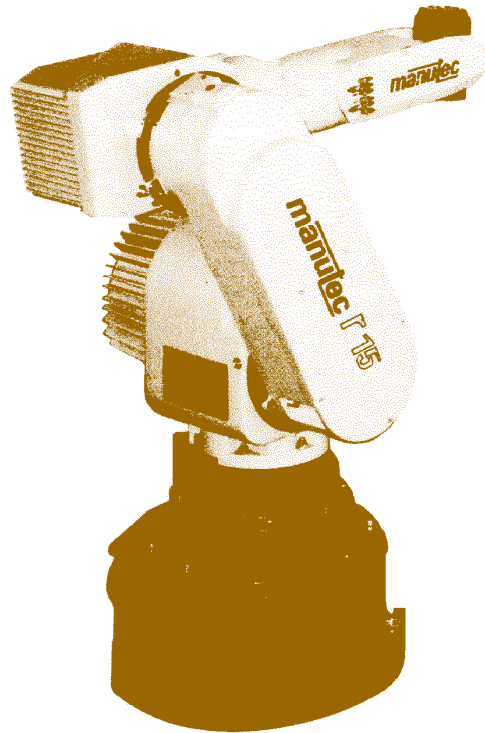


Bild 5.1 Manutec Roboter

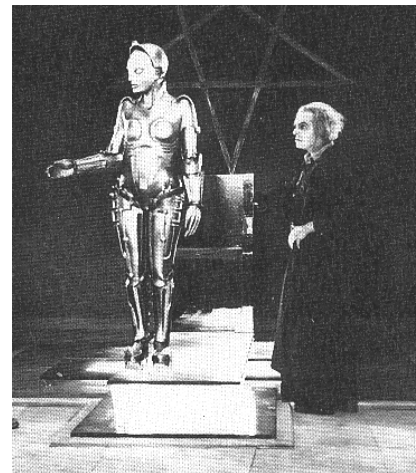
#### 5.1.1 Historische Entwicklung

siehe *Spektrum d. Wissenschaft, Dossier 4/98:*

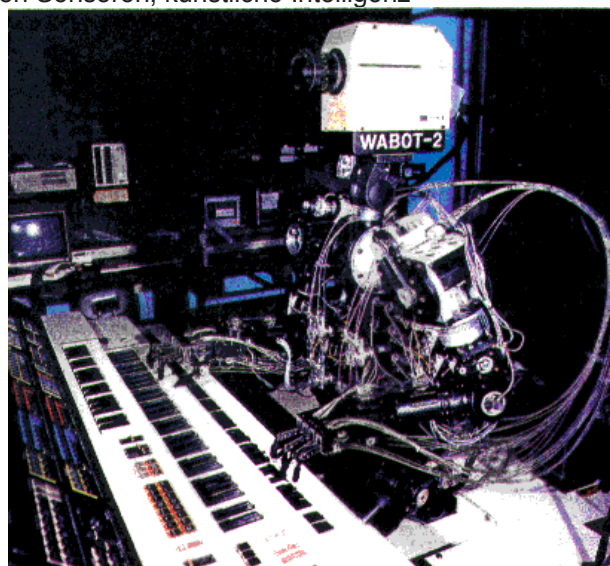
*Roboter Erobern den Alltag,*

☞ **robota** aus dem Slawischen (1920) = Fronarbeit

- ab 1945 Entwicklung von Telerobotern und Kraftsensoren
- ab 1950 Entwicklung von NC-Maschinen,  
einfache fest programmierte Pick-and-Place-Geräte (MIT)
- ab 1960 mechanische Informationsspeicher,  
frei programmierbare Handhabungsgeräte
- ab 1970 elektronische Informationsspeicher,  
rechnergesteuerte Industrieroboter, textuelle  
Programmierung
- ab 1980 Einbeziehung von Sensoren, künstliche Intelligenz



Erster Roboter-Film, D 1926



## 5.1.2 Wozu Roboter?

### ☞ Seine Vorzüge im Bezug zum Menschen

- ◇ Heben schwerer Lasten
- ◇ durchgehend arbeitsfähig
- ◇ Genauigkeit und Schnelligkeit
- ◇ resistent gegen Umweltbelastungen und gefährliche Medien (toxisch, radioaktiv, Gase)

andere Aussagen

- ◇ Produktionssteigerung
- ◇ Lohnkosteneinsparungen (Lohnkosten stiegen in 10 J 3-5 fach, Roboterkosten fallen)
- ◇ vielseitig einsetzbar
- ◇ hohe Flexibilität
- ◇ ermöglicht humanere Arbeitsplätze

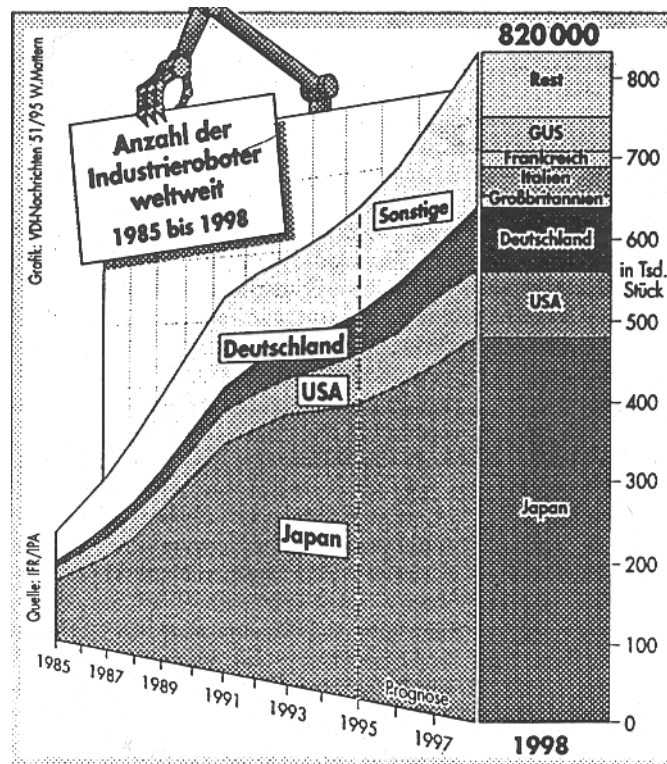
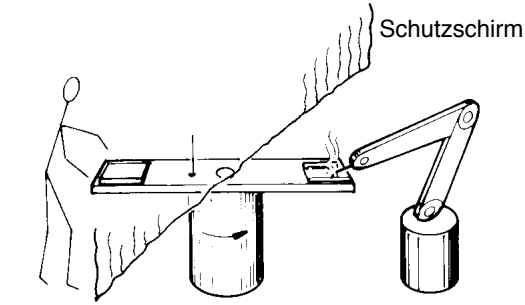
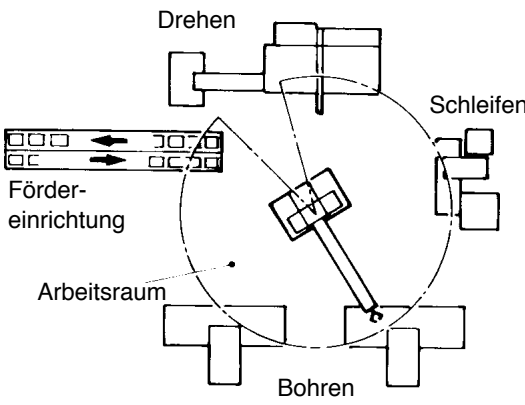
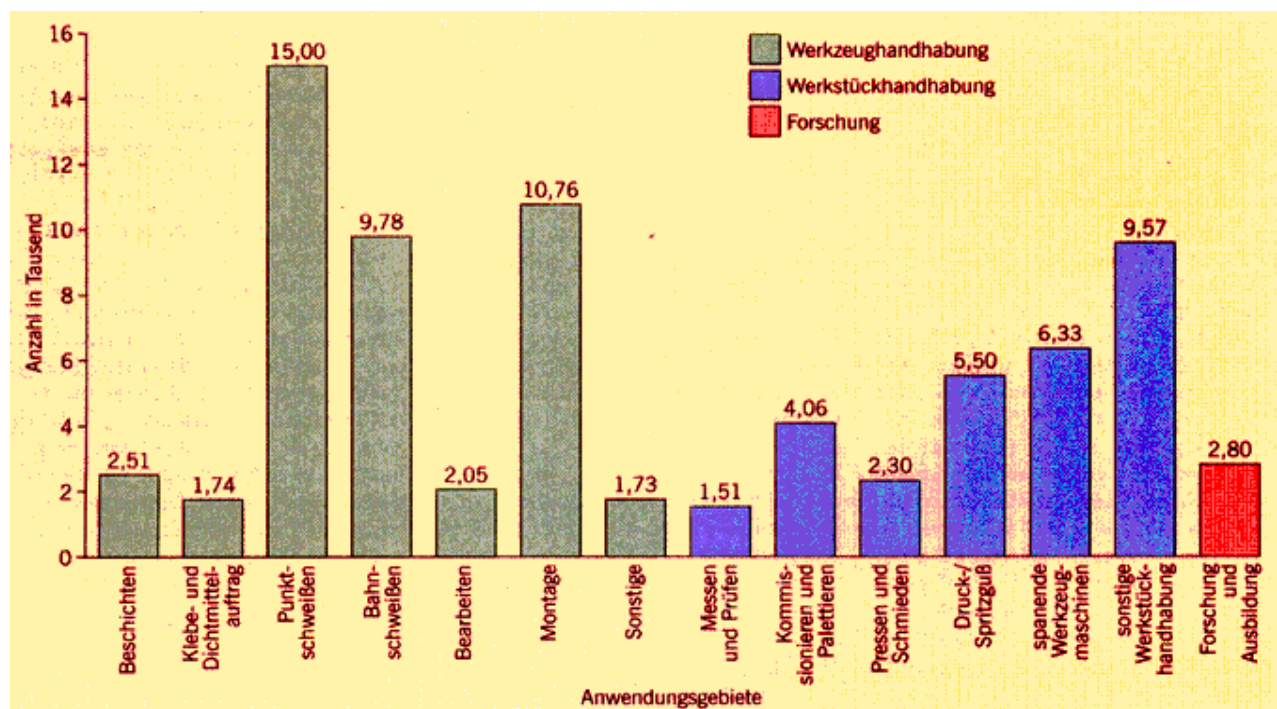


Bild 5.2: Anzahl von Industrierobotern in den führenden Industrienationen, (VDI Nachrichten )

### 5.1.3 Heutige Anwendungsbereiche von Industrierobotern

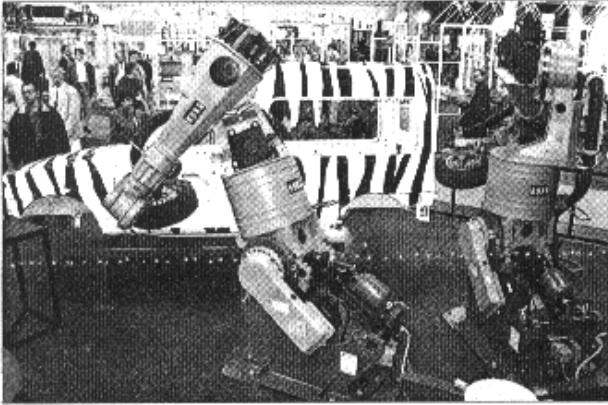
Angaben mit prozentualer Aufteilung (IPA, 1984)

Werkzeughandhabung (58 % in D)	Werkstückhandhabung (39 % in D)
Punktschweißen 28 % Bahnschweißen 20 % Beschichten , Lackieren 11 % Montage 7 % Entgraten 1 % Sonstiges 4 %	Pressen 2 % Schmieden 1 % Druckspritzguß 2 % Werkzeugmaschinen 7 % Sonstige Handhabungen 14 %
Weiter Handhabungen	
Hartlöten Kleben Lackieren Schneiden Fräsen Schleifen Bohren Polieren Messen Fügen	Be-/Entladen Verketteten Palettieren Magazinieren Verpacken Kommissionieren
 <p>Beschicken    Drehtisch    Schweißen</p>	 <p>Drehen    Schleifen    Bohren</p> <p>Förder-einrichtung</p> <p>Arbeitsraum</p>



(VDMA)

### Beispiele aus VDI-Nachrichten:

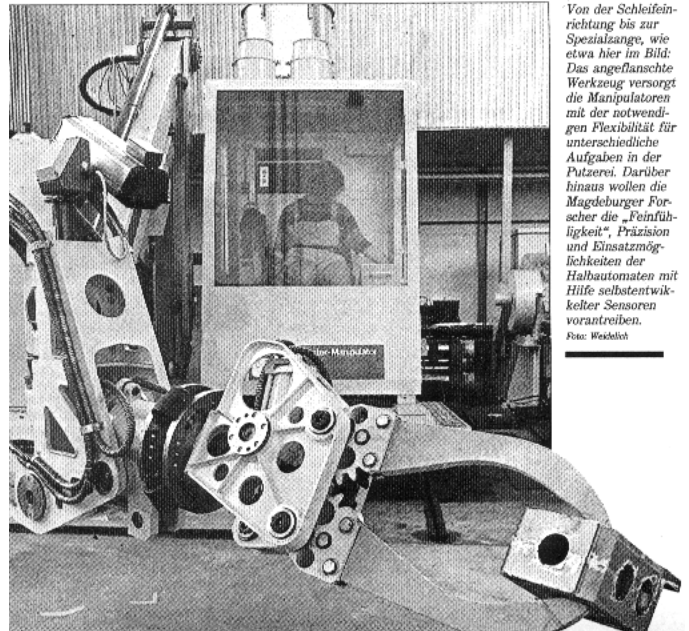


#### Roboter greift um die Ecke:

Diese kinematisch bedingte Fertigkeit des neuen Typs IR761/120.3 bewährte sich hier in Halle 17 der Hannover Messe beim Einlegen von Reserveteilen hinter den Radkasten des Automobils. Während Gelenkroboter bisheriger Bauart eine vertikale Grundach-

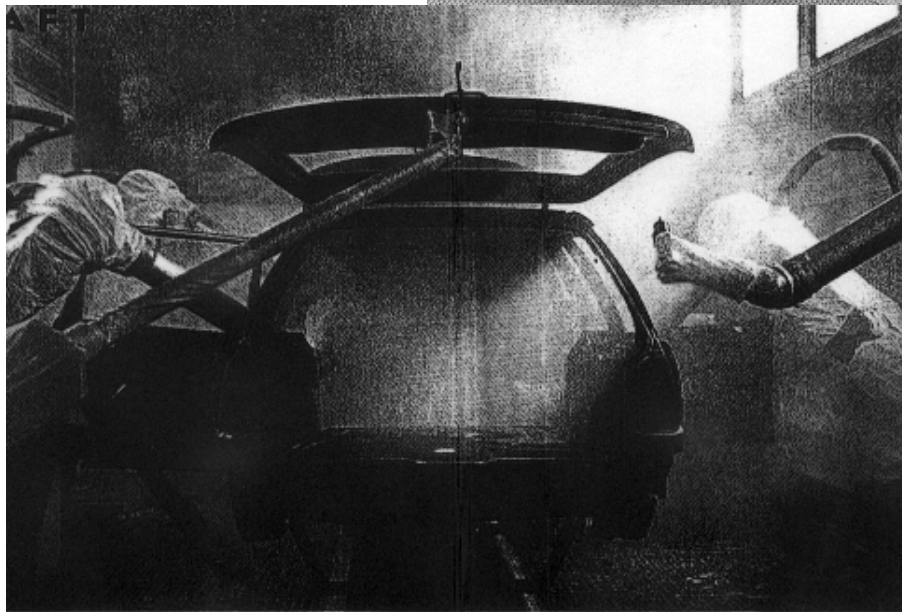
se 1 und eine horizontale Achse 2 haben, ist diese Reihenfolge bei dem Gerät von Kuka vertauscht, sodaß es in jeder Winkelstellung seiner vertikalen Grundbewegung (1) einen kreisförmigen Schwenk-Arbeitsraum (2) bilden kann.

Foto: Kuka



Von der Schleifrichtung bis zur Spezialzange, wie etwa hier im Bild: Das angeflanschte Werkzeug versorgt die Manipulatoren mit der notwendigen Flexibilität für unterschiedliche Aufgaben in der Putzerei. Darüber hinaus wollen die Magdeburger Forscher die „Feinfühligkeit“, Präzision und Einsatzmöglichkeiten der Halbautomaten mit Hilfe selbstentwickelter Sensoren vorantreiben.

Foto: Wöckeloh



LACKIEREREI BEI VW: Bisher setzt vor allem die Autoindustrie Roboter ein. Jetzt dringen sie in alle Branchen vor



Die Verbannung des Menschen aus der Fabrik ist in Teilen der Automobilindustrie bereits Wirklichkeit. Die Zahl der Beschäftigten in der Produktion wird noch weiter sinken. Foto: Seidel

### 5.1.4 Neuzeitliche Anwendungsbereiche von Robotern



aus VDI-Nachrichten, Spectrum d.W.

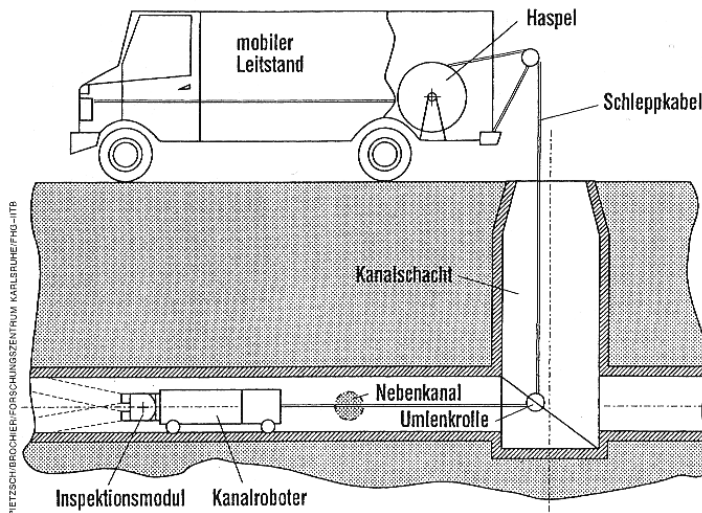
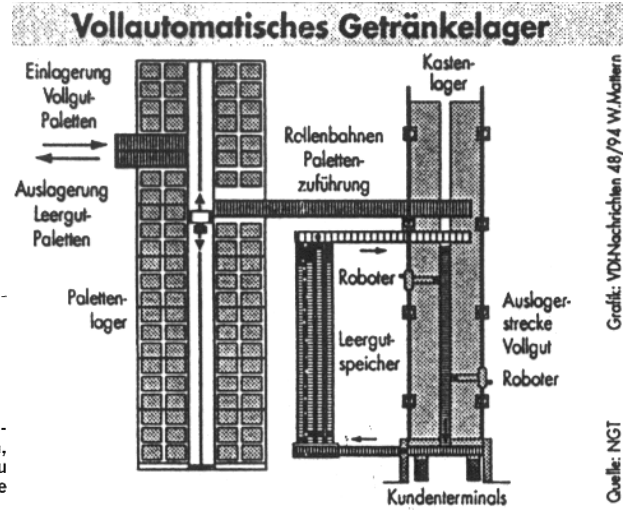
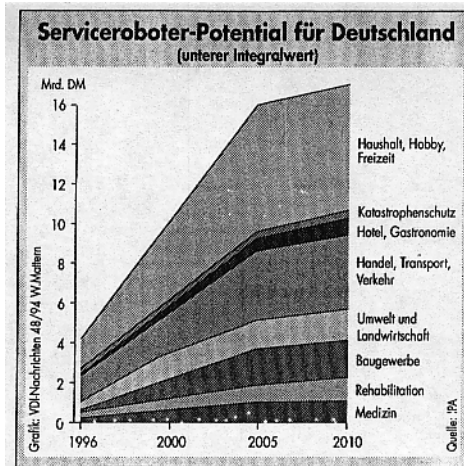


Bild 1: Gesamtsystem KARO. Während der Roboter die Kanäle abfährt, überwacht der Operateur vom Leitstand aus den Verlauf. Beide Einheiten sind über ein Kabel verbunden, das den Roboter mit Energie versorgt und eine Hochfrequenz-Übertragungsleitung enthält. Um zu verhindern, daß das Kabel schlaff durchhängt oder zu sehr unter Zug steht, läuft es über eine kraftgesteuerte Seilwinde (Haspel).



Grafik: VDI-Nachrichten 48/94 W.Mallert

Quelle: NGT



Geschätztes Potential für D: 40 Mrd. DM

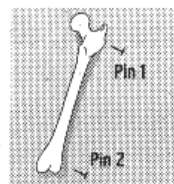


Bild 1: „Le Petit Journal“ erstaunte 1912 das Publikum mit einer „automatischen Krankenschwester“ – einem Serviceroboter, der heute realisiert werden könnte.

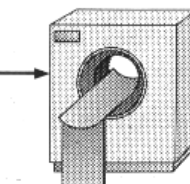
## Hüftschaff-Implantation mit dem OP-Roboter

VDI nachrichten

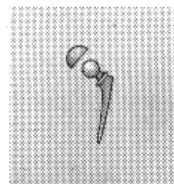
1 Pin-Implantation (Referenzpunkte)



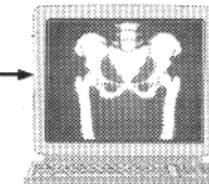
2 Computer-Tomogramm des Oberschenkels



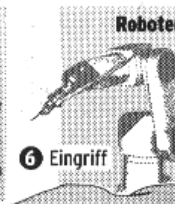
3 Digitale Prothesendaten



4 Virtuelle Implantation am PC



5 Übergabe der Planungsdaten an den Roboter



6 Eingriff



OP-Planung, Start des Eingriffs, Kalibrierung und Überwachung, Implantation, Beendigung

Ausräumen des Schafftraumes im Femur

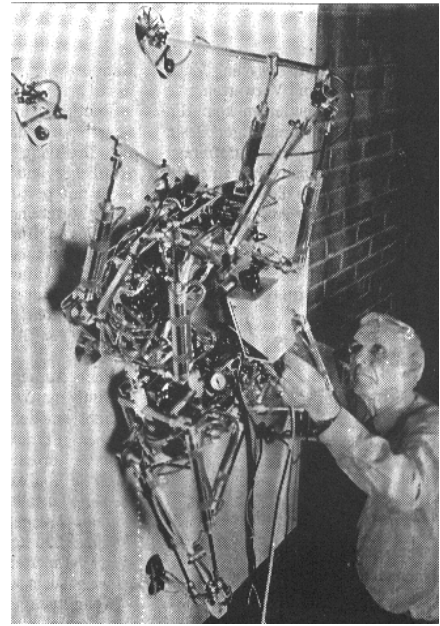
Quelle: Orto Maquet

Grafik: © VDI nachrichten 20/98 W.Mallert





Giftentsorgung



"Klettermax" für Fensterputzarbeiten

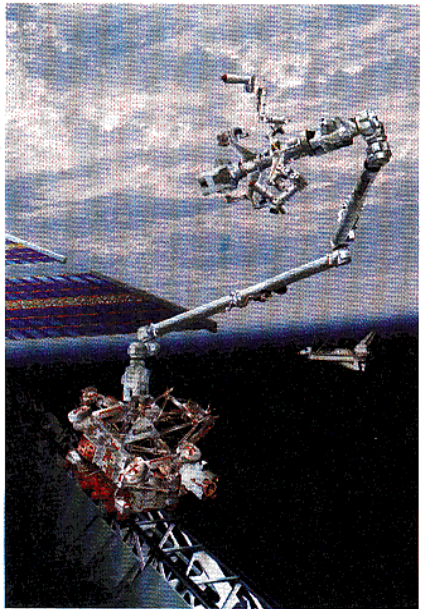
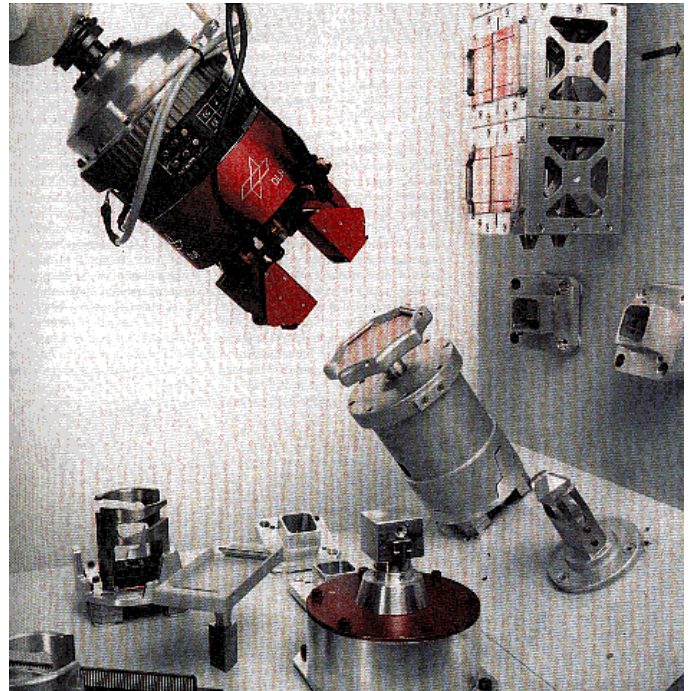
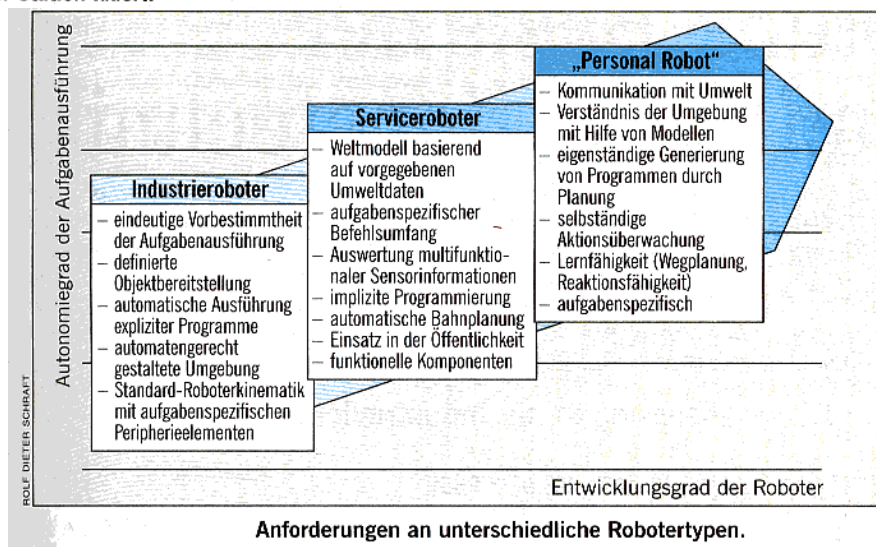


Bild 3: Das in Kanada entwickelte Mehr-Roboter-System der Raumstation arbeitet mit drei Armen, von denen einer das Werkzeug führt, ein weiterer das System an der Station fixiert.



ROTEX, Weltraumroboter der DLR, bei der D2-Mission



Anforderungen an unterschiedliche Robotertypen.



## 5.2 Das System "Industrieroboter"

### 5.2.1 Teilsysteme des Industrieroboters und ihre Funktionen

Die Vielfalt des Menschen

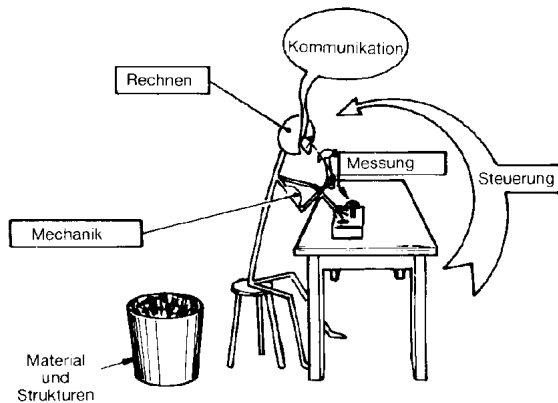


Bild 5.3: Der Mensch als Superautomat

Teilsysteme des Industrieroboters

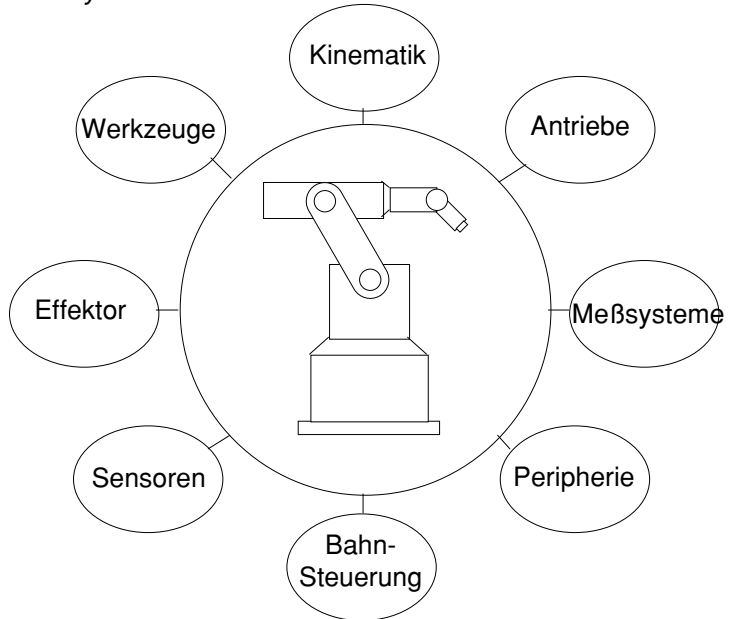


Bild 5.4: Teilsysteme des Industrieroboters

#### Funktionen der Teilsysteme

- Kinematik:** räumliche Zuordnung zwischen Effektor (Greifer) und Handhabungsobjekt, zeitliche Zuordnung zwischen Bewegungsachsen und Effektorbewegung, Sicherung der Position und Orientierung von Handhabungsobjekten,
- Antriebe:** Zuordnung der Stellenergie für Bewegungsachsen und Effektoren
- Meßsystem:** Messung von Position, Orientierung, Geschwindigkeit, Moment der Glieder
- Peripherie:** Programmiersystem: Software zur Erstellung der Steuerprogramme  
Rechner: Durchführung der Steuerprogramme, Verarbeitung von Sensordaten und Modifikation des Steuerprogramms
- Bahnsteuerung:** Steuerung und Überwachung von Handhabungssequenzen auf bestimmten Bahnen.
- Sensoren:** Erfassung der Zustände des Handhabungsobjekts sowie seiner Umgebung, Identifikation und Lagebestimmung von Handhabungsobjekten, Szenenanalyse
- Effektor:** Aufnehmer zum Anbringen von **Greifern** für Handhabung, Montage, Fügen, Verschrauben, etc.; von
- Werkzeugen,** zum Bearbeiten von Werkstücken: Schweißen, Lackieren, ....

## 5.2.2 Grundkonfigurationen von Robotern mit 3 FHG

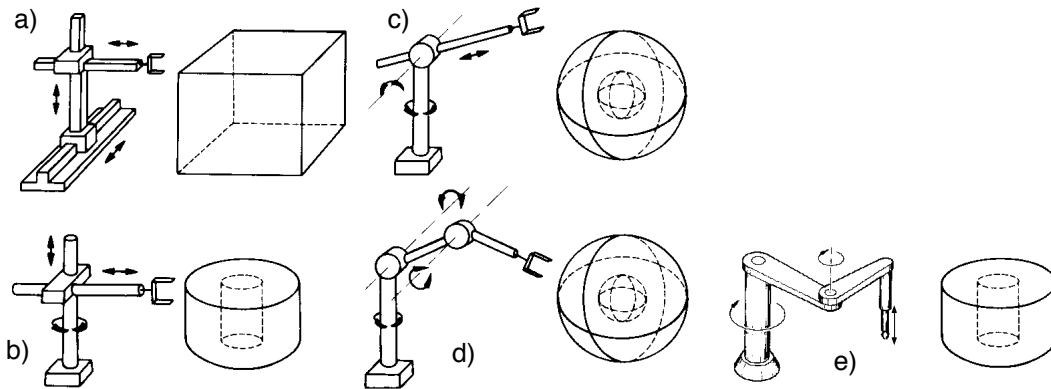
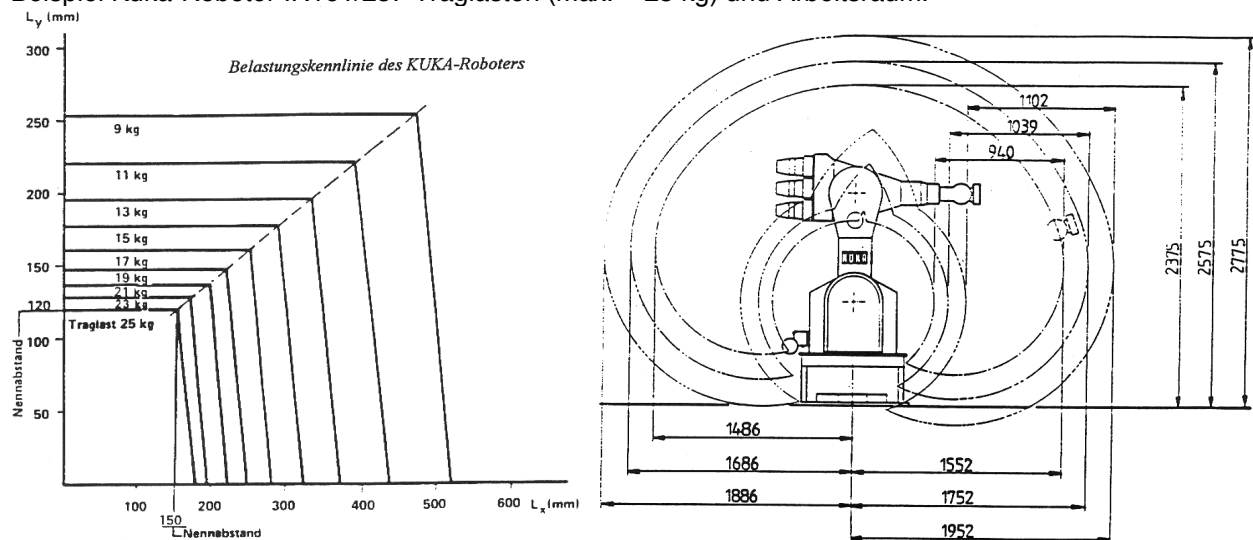


Bild 5.5: Roboter-Grundkonfigurationen mit jeweils drei Freiheitsgraden


- a)  $SS_{\perp}S_{\perp}$  - Roboter: drei Translationen, kartesische Koordinaten, kartesischer Arbeitsraum (Würfel)  
Anwendung bei Portalrobotern (z.B. Dürr, ZF)
- b)  $DS_{\parallel}S_{\perp}$  - Roboter: eine Rotation & zwei Translationen, Zylinderkoordinaten, zylindrischer Arbeitsraum (Hohlzylinder), Anwendung Montageroboter
- c)  $DD_{\perp}S_{\perp}$  - Roboter: zwei Rotationen & eine Translation, Kugelkoordinaten, Arbeitsraum ist Hohlkugel, Anwendung im Knickarmroboter
- d)  $DD_{\perp}D_{\parallel}$  - Roboter: drei Rotationen, Gelenkkoordinaten, Arbeitsraum ist Hohlkugel, Anwendung als Knickarmroboter (z.B. Kuka, Manutec)
- e)  $DD_{\parallel}S_{\parallel}$  - Roboter: zwei Rotationen & eine Translation, Gelenkkoordinaten, Arbeitsraum ist Hohlzylinder, Anwendung im **Scara-Typ (Selective compliance assembly robot arm)**, (z.B. Manutec, Bosch)

Legende: D = Drehgelenk, S = Schubgelenk,  $S_{\perp}$  = Achse senkrecht zur vorherigen,  $S_{\parallel}$  = parallel zur vorherigen

Beispiel Kuka-Roboter IR161/25: Traglasten (max. = 25 kg) und Arbeitsraum.



### 5.2.3 Feinbewegung der Effektoren

 **Effektor** (auch Handgelenk) ist die Einrichtung am Ende der Roboterkette, über die die Wechselwirkung mit dem Handhabungsobjekt stattfindet.

Der allgemeinste Effektor ist der Greifer.

Spezielle Effektoren werden durch Schweißzangen, Bohrer, usw. repräsentiert

Weitere Definitionen siehe VDI 2861, Bl. 2

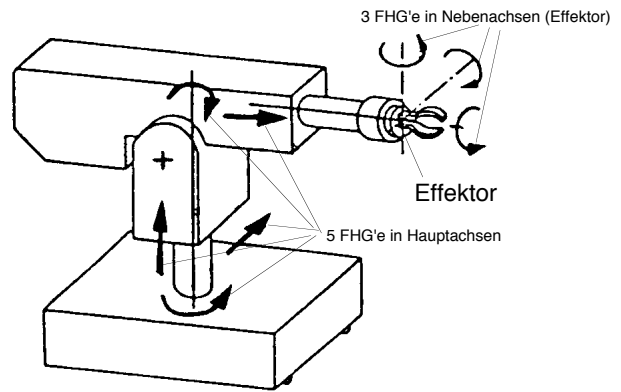




Bild 5.6: Roboter mit Haupt -und Nebenachsen

 Zur Erhöhung der Beweglichkeit und der Feinjustierung sind im Effektor weitere Freiheitsgrade zu realisieren:

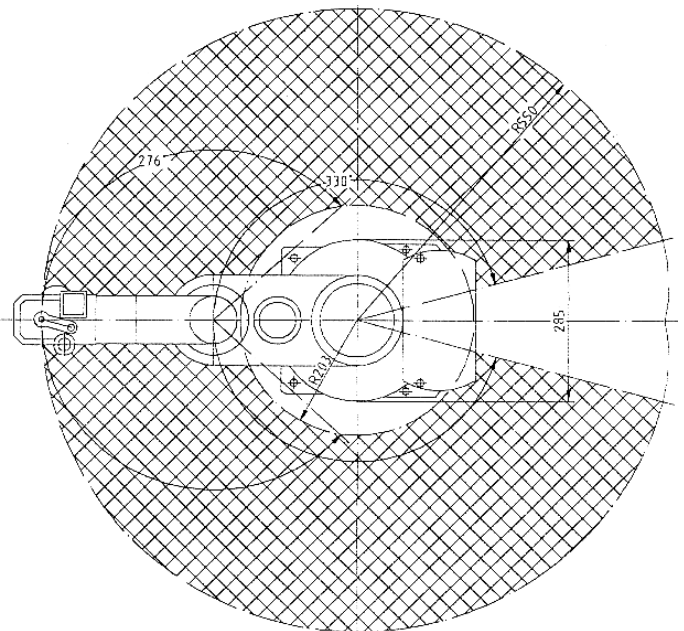
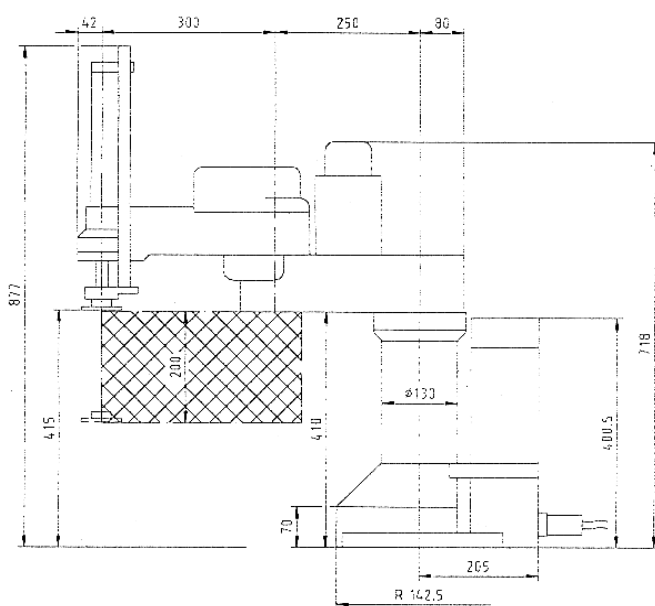
**Hauptachsen** = Freiheitsgrade in der Grundkonfiguration

**Nebenachsen** = Freiheitsgrade im Effektor (in der Regel drei FHG)

 Die Bewegung der Achsen ist aus konstruktiven Gründen vielfach begrenzt.

- ◇ Volle Rotation von  $-180^\circ$  bis  $+180^\circ$
- ◇ Begrenzte Rotation von  $-\theta_{\min}$  bis  $\theta_{\max}$
- ◇ Translation von  $d_{\min}$  bis  $d_{\max}$

Beispiel Scara-Roboter der Fa. Schuster, BR HS, 10 kg, 0.03 mm Wiederholgenauigkeit.





## 5.2.4 Varianten für Effektorbewegungen

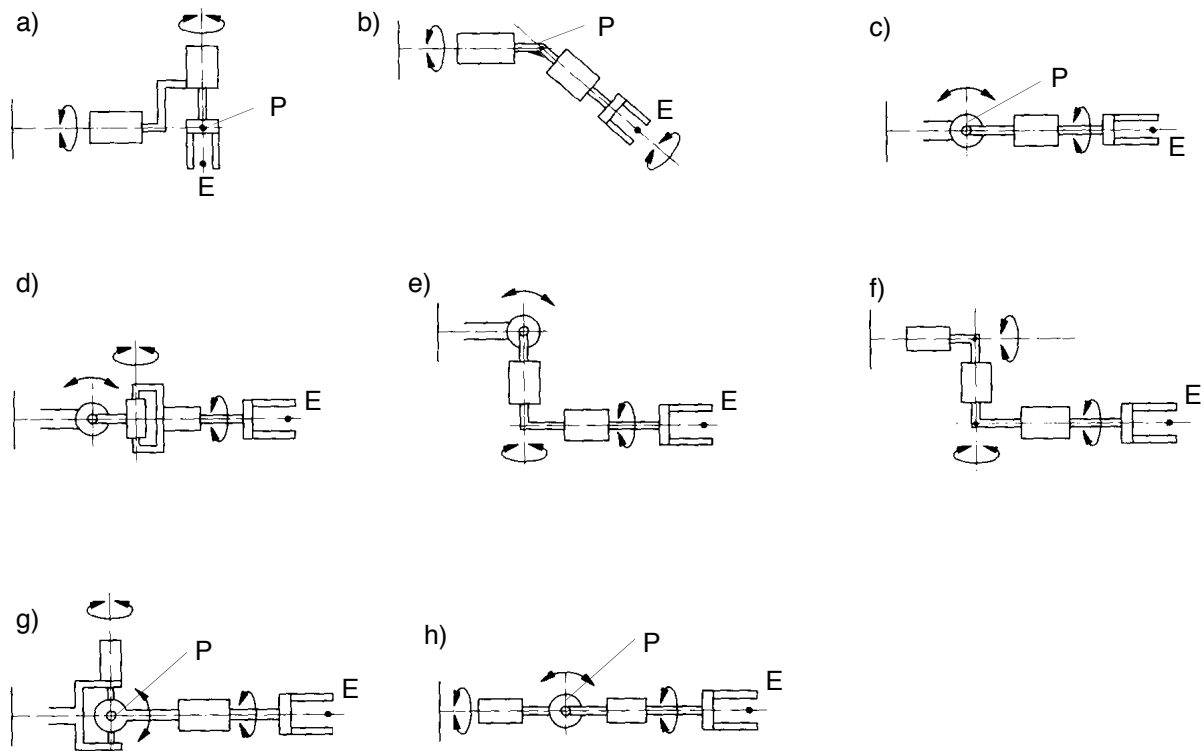


Bild 5.7: Varianten von Nebenachsen-Bewegungen des Typs DD und DDD für Effektoren

Modelle a), b), c), g) und h): Effektor-Drehachsen schneiden sich in einem Punkt P.

Die Lage von P kann man über die Hauptachsenbewegung führen.

Die Bewegung des Effektors ändert die Lage dieses Punktes P nicht (sphärisches Getriebe)

## 5.3 Kinematik der Roboter

### 5.3.1 Notation

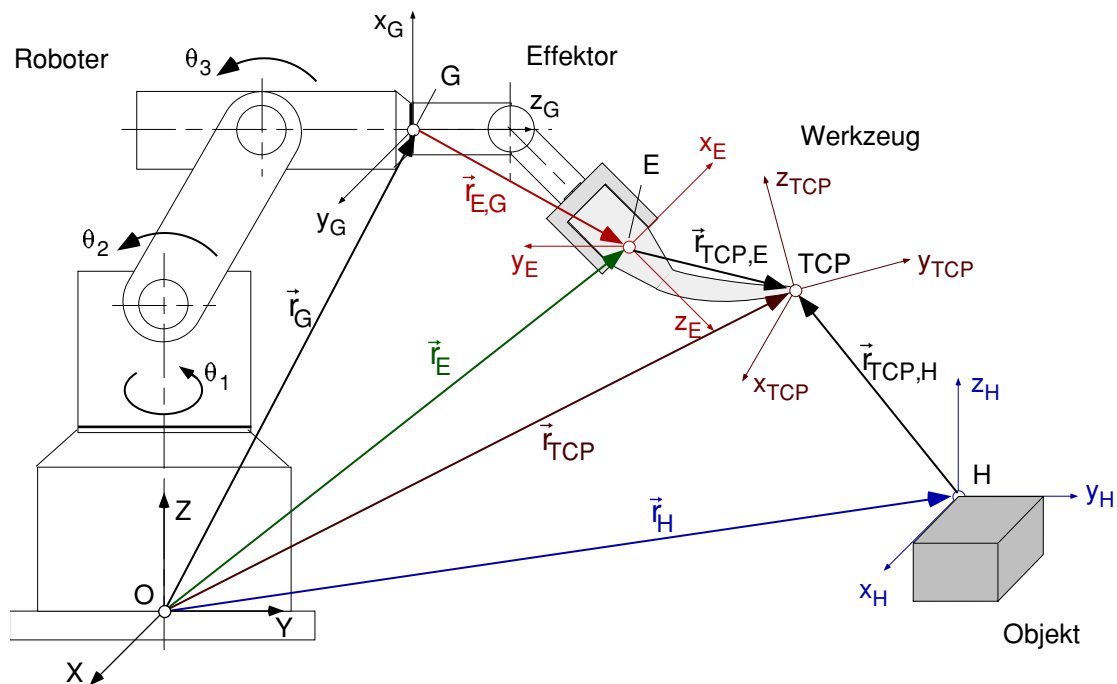


Bild 5.8: Koordinatensysteme am Roboter (kartesische und rechte Handsysteme)

O	Ursprung des Weltkoordinatensystems, kurz WKS (O; X, Y, Z) oder $K_0$ genannt
X, Y, Z	Achsen des WKS, (vielfach mit $x_0, y_0, z_0$ bezeichnet), Basisvektoren $\vec{e}_{0x}, \vec{e}_{0y}, \vec{e}_{0z}$
$O_i$	Ursprung eines gliedfesten Koordinatensystems i, kurz $K_i$ ( $O_i; x_i, y_i, z_i$ ) genannt, $i = 0, n$ , Gestell meist 0
$x_i, y_i, z_i$	Koordinaten eines gliedfesten Koordinatensystems, $i = 0, n$ oder eines Punktes, Basisvektoren lauten $\vec{e}_{ix}, \vec{e}_{iy}, \vec{e}_{iz}$
G	Endpunkt der Roboter-Hauptachsenkette
E	Endpunkt Effektor
TCP	Werkzeugpunkt (Tool Center Point)
H	Punkt eines zu handhabenden Objekts
$\theta_i, d_i$	Gelenkkoordinaten oder Roboterkoordinaten im Gelenk i des Gliedes i gegenüber Glied i-1 $\theta_i$ ist die Variable für Rotation (rad, Grad), $\Rightarrow$ Drehachse $d_i$ die Variable für Translation (mm, cm, m) $\Rightarrow$ Linearachse
<b>q</b>	Zusammenfassung aller Roboterkoordinaten $\theta_i, d_i$ zu einer Matrix.
$\vec{r}_i, \vec{r}_{ij}$	Ortsvektor vom Punkt O zum Punkt $O_i$ , vom Punkt $O_i$ zum Punkt $O_j$
${}^0\mathbf{r}_{i0} = \mathbf{r}_i$	$3 \times 1$ -Vektor der Weltkoordinaten des Ortsvektors $\vec{r}_i$ gemessen im WKS, Index $i = 0$ weggelassen.
$\boldsymbol{\vartheta}_i = (\alpha, \beta, \gamma)^T$	Drehwinkel um die WKS-Achsen X, Y, Z in das körperfesten Systems x, y, z. Nach VDI 2861 auch A, B, C genannt.
<b>p</b>	$= \begin{pmatrix} \mathbf{r}_i \\ \boldsymbol{\vartheta}_i \end{pmatrix}$ , Zusammenfassung aller Weltkoordinaten des Effektors
Hauptachsenbewegung	Bewegen des Punktes G bez. O
Nebenachsenbewegung	Bewegung des Punktes E bez. G oder O(absolut)
Werkzeugbewegung	Bewegung des Punktes TCP bez. E oder O(absolut)
Objektbewegung	Bewegung des Objekts H bez. O

### 5.3.2 Kinematik des Effektors

#### Probleme der Roboterkinematik:

##### Vorwärtstransformation

Weltkoordinaten des Effektors als Funktion der Roboterkoordinaten

Beispiel  $\mathbf{r}_G = \mathbf{r}_G(\mathbf{q})$ ,  $\mathbf{\vartheta}_G = \mathbf{\vartheta}_G(\mathbf{q})$ ,

##### Rückwärtstransformation

Roboterkoordinaten als Funktion der Weltkoordinaten

Beispiel  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{r}_G, \mathbf{\vartheta}_G)^T = \mathbf{q}(X_G, Y_G, Z_G, \alpha_G, \beta_G, \gamma_G)^T = \mathbf{q}(\mathbf{p})$ .

#### Verwendete Koordinatensysteme:

WKS oder  $K_0 = (O; X, Y, Z)$ ,  $K_G = (G; x_G, y_G, z_G)$ ,  $K_E = (E; x_E, y_E, z_E)$ :

#### Orientierung des Effektors (Basis $K_E$ )

gegenüber WKS

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{e}}_0 &= \mathbf{A}^{0E} \vec{\mathbf{e}}_E = \mathbf{A}^{0G} \mathbf{A}^{GE} \vec{\mathbf{e}}_E \\ \Rightarrow \mathbf{A}^{0E} &= \mathbf{A}^{0G} \mathbf{A}^{GE} \end{aligned}$$

#### Position des Effektors in Weltkoordinaten

(Punkt E ist Ursprung von  $K_E$ )

$$\vec{\mathbf{r}}_G = \vec{\mathbf{e}}_0^T \mathbf{r}_G = \mathbf{r}_G$$

$$\vec{\mathbf{r}}_E = \vec{\mathbf{e}}_0^T \mathbf{r}_E = \mathbf{r}_E$$

$$\vec{\mathbf{r}}_E = \vec{\mathbf{r}}_G + \vec{\mathbf{r}}_{EG}$$

Ortsvektor  $\vec{\mathbf{r}}_{EG}$  in Koordinaten von  $K_G$

$$\vec{\mathbf{r}}_{EG} = \vec{\mathbf{e}}_G^T \mathbf{r}_{EG}$$

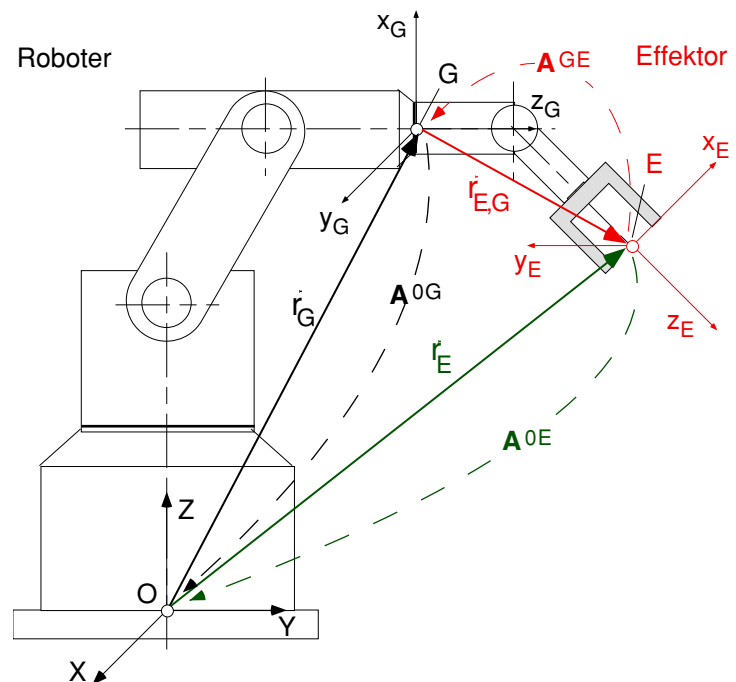


Bild 5.11: Koordinatensysteme und Vektoren am Effektor

$\vec{\mathbf{r}}_E = {}^0\vec{\mathbf{r}}_E = {}^0\vec{\mathbf{r}}_G + \mathbf{A}^{0G} {}^G\vec{\mathbf{r}}_{EG}$  mit der Drehmatrix  $\mathbf{A}^{0G}$ , um WKS in  $K_G$  zu drehen.



### 5.3.3 Denavit-Hartenberg-Transformation

#### A) 4 x 4 – Transformationsmatrix $T$ , vgl. Abschn. 4.5

Sie beschreibt die Transformation eines Vektors vom Ursprung  $O_i$  zu einem beliebigen Punkt  $P_j$ , dessen Koordinaten in der Basis  $i$  vorliegen. Die Transformation umfaßt eine Schiebung und eine Drehung, so daß sich als Ergebnis die Koordinaten des Vektors vom Ursprung  $O_i$  zum Punkt  $P_j$  als Koordinaten in der Basis  $i$  ergeben.

Die Transformationsmatrix setzt sich aus der Drehmatrix  $A^{ij}$  und den Koordinaten  ${}^i r_{ji}$  zusammen:

<b>Transformationsmatrix</b>	$T^{ij} = \begin{pmatrix} A^{ij} & {}^i r_{ji} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
<b>Vorwärtstransformation</b> von z.B. $K_0$ bez. $K_5$ $T^{05} = T^{01} T^{12} \dots T^{45}$	

Beachte: Die Transformationsmatrizen werden multipliziert!

#### B) Ausrichtung der Koordinatensysteme nach Denavit-Hartenberg

☞ Roboter sind so gebaut, daß ihre Gelenke nur Dreh-, Schub- oder Schraubgelenke aufweisen und die Anordnung ihrer Gelenke z.B. von  $j$  bez.  $i = j-1$  meist durch parallele oder senkrecht stehende Achsen zu beschreiben sind. Es sind somit maximal zwei Drehungen um zwei verschiedene Achsen und zwei Verschiebungen in zwei Achsrichtungen erforderlich.

Nach Vorgabe einer festen Position und Orientierung der Koordinatensysteme  $K_j$  bez.  $K_i$  weist die **Transformationsmatrix nach Denavit-Hartenberg**  $DH^{ij} = T^{ij}$  nur 4 unabhängige (Relativ-) Parameter  $\theta_j$ ,  $\lambda_j$ ,  $d_j$  und  $l_j$  auf, siehe Bild 5.12:

Beachte:  $c = \cos$ ,  $s = \sin$

Koordinaten von  $O_j$  bez.  $O_i$  in WKS      ${}^i r_{ji} = \begin{pmatrix} l_j c\theta_j \\ l_j s\theta_j \\ d_j \end{pmatrix}$

Drehmatrix von  $K_j$  bez.  $K_i$       $A^{ij} = \begin{matrix} \begin{matrix} 1. \text{ Drehung} & & 2. \text{ Drehung} \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 \\ s\theta_j & c\theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\lambda_j & -s\lambda_j \\ 0 & s\lambda_j & c\lambda_j \end{pmatrix} \end{matrix}$

☞ DH-Matrix von $K_j$ bez. $K_i$	$DH^{ij} = \begin{pmatrix} c\theta_j & -s\theta_j c\lambda_j & s\theta_j s\lambda_j & l_j c\theta_j \\ s\theta_j & c\theta_j c\lambda_j & -c\theta_j s\lambda_j & l_j s\theta_j \\ 0 & s\lambda_j & c\lambda_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
----------------------------------	--

☞ Die Parameter findet man aus:

$$\tan\theta_j = \frac{DH_{21}}{DH_{11}}, \quad \tan\lambda_j = \frac{DH_{32}}{DH_{33}}, \quad d_j = DH_{34}, \quad l_j = \sqrt{DH_{14}^2 + DH_{24}^2}$$

Beachte: Taschenrechner ermittelt arctan-Werte nur zwischen  $-\pi/2$  und  $+\pi/2$ !

**C) Regeln , siehe Bild 5.12:**

1. Jedem Glied  $j$  wird ein Koordinatensystem  $K_j$  zugeordnet, (fortlaufende Numerierung),  
Gestell kann 0 oder 1 sein, z. B.  $j = 0, 1, \dots, n$
2. Starte mit Gestell, jedoch **gilt generell**:
3.  $z_{i-1}$ -Achse wird mit frei wählbarem Richtungssinn in die Gelenkachse ( $\vec{u}_i$ ) des Gelenk  $j$  zwischen Glied  $i$  und Glied  $j = i+1$  gelegt.
4.  $x_i$ -Achse auf gemeinsamen **Lot** der  $z_{i-1}$ - und der  $z_i$ -Achse in Richtung von  $z_{i-1}$  nach  $z_i$ -Achse, d.h.  $x_i \perp z_{i-1}$  und  $x_i \perp z_i$ .  
Falls sich  $z_{i-1}$  und  $z_i$ -Achse scheiden oder  $z_{i-1}$  nicht vorhanden, Achsrichtung von  $x_i$  frei wählbar.
5. Ursprung  $O_i$  liegt im Schnittpunkt der  $z_i$ - und  $x_i$ -Achse.
- Falls  $z_{i-1}$ - und  $z_i$ -Achse parallel oder  $z_{i-1}$  nicht vorhanden, Ursprung  $O_i$  ist frei wählbar.
6.  $y_i$ -Achse so, daß ein Rechtshand-System entsteht.
7. Winkel  $\theta_j$  aus Drehung der  $x_i$ -Achse in die  $x_j$ -Achse um die  $z_i$ - Achse.
8. Abstand  $d_j$  als Maß zwischen  $x_i$ -Achse und  $x_j$ -Achse in Richtung  $z_i$ -Achse.
9. Abstand  $l_j$  als Maß zwischen  $z_i$ - Achse und  $z_j$ - Achse in Richtung  $x_j$ - Achse.
10. Winkel  $\lambda_j$  aus Drehung der  $z_i$ - Achse in die  $z_j$ - Achse um die  $x_j$ - Achse.

Beachte: Parameter  $\theta_j$ ,  $\lambda_j$ ,  $d_j$  und  $l_j$  mit Vorzeichen angeben!

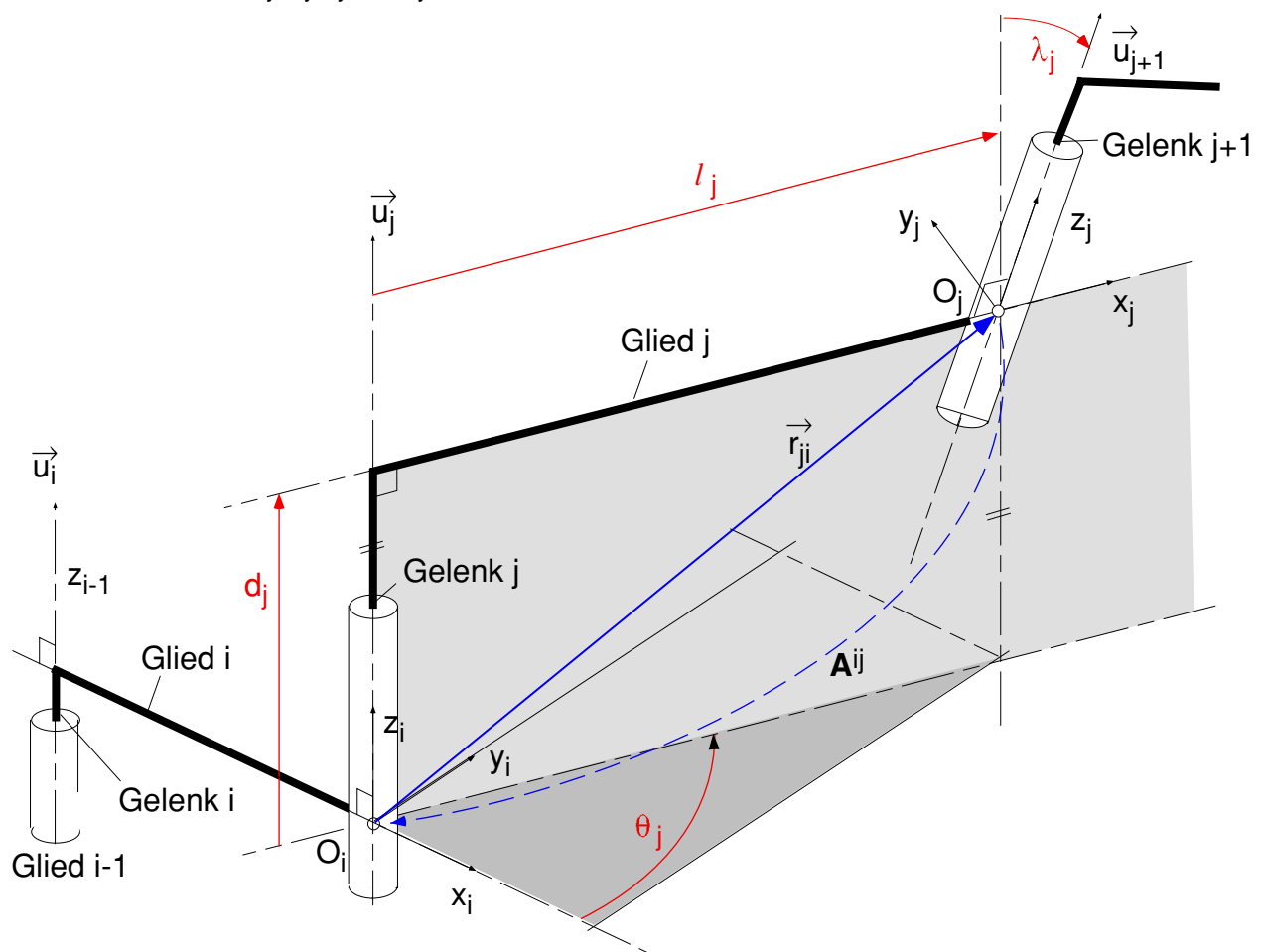


Bild 5.12: Koordinatensysteme nach Denavit-Hartenberg

**Übung 5.1: (siehe Lösungen im Internet)**

Bestimme die DH-Parameter und berechne die DH-Matrix  $DH^{03}$  eines dreiachsigen Roboters vom Typ  $DD_{\perp}D_{||}$ , siehe Bild 5.13. Es gilt die Annahme, daß alle Gelenke in der Bildebene liegen.  $O_3 = G$ .

Daten: Abstände  $OO_1 = 440 \text{ mm}$ ,  $O_1O_2 = 560 \text{ mm}$ ,  $O_2O_3 = 360 \text{ mm}$ .

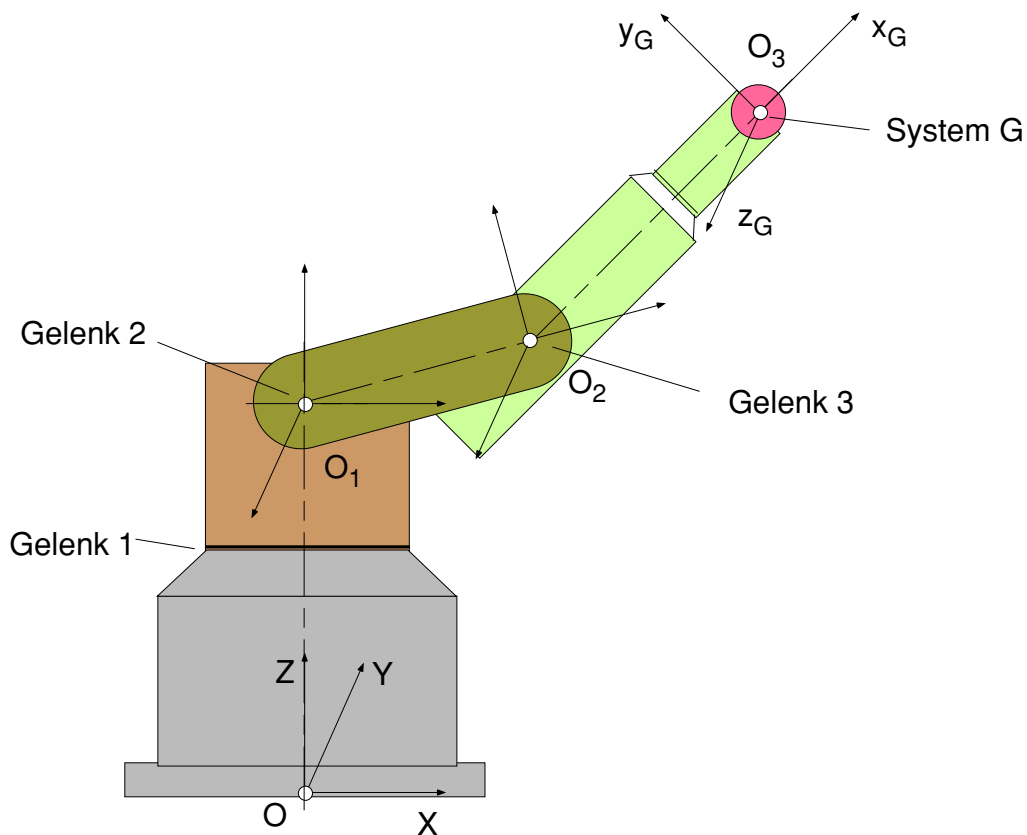


Bild 5.13: Ein dreiachsiger Industrieroboter

DH-Parameter zu Bild 5.13

Gelenk j zw. Glied i und j	Winkel $\theta_j$ $= \angle(x_i, x_j) \text{ um } z_i$	Abstand $d_j$ $= \perp(x_i, x_j) \text{ in } z_i$	Abstand $l_j$ $= \perp(z_i, z_j) \text{ in } x_j$	Winkel $\lambda_j$ $= \angle(z_i, z_j) \text{ um } x_j$
1				
2				
3				



### 5.3.4 Inverse Kinematik (Rückwärtstransformation)

- ☞ Mit der DH-Matrix liegt die Vorwärtstransformation (vom Gestell bis zum Gelenkpunkt, Effektor oder TCP) als Funktion der Gelenkkoordinaten vor.  
Beispiel: DD<sub>⊥</sub>D<sub>||</sub> - Roboter mit drei FHG, vgl. Übung 5.1:

$$\text{Punkt G: } \mathbf{r}_G = \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\theta_1(l_2 c\theta_2 + l_3 c\theta_{23}) \\ s\theta_1(l_2 c\theta_2 + l_3 c\theta_{23}) \\ d_1 + l_2 s\theta_2 + l_3 s\theta_{23} \end{pmatrix} = \mathbf{g}(\theta_1, \theta_2, \theta_3), \quad c = \cos, s = \sin, \theta_{23} = \theta_2 + \theta_3.$$

- ☞ Die analytische Auflösung dieser Vorwärtskinematik nach den Gelenkkoordinaten gelingt nur für einfache Beispiele und mit mathematischen Substitutionen, siehe z.B. (Desoyer, Kopacek et al. 1985)

$$\text{Beispiel: Die Gleichungen } \mathbf{r}_G = \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\theta_1(l_2 c\theta_2 + l_3 c\theta_{23}) \\ s\theta_1(l_2 c\theta_2 + l_3 c\theta_{23}) \\ d_1 + l_2 s\theta_2 + l_3 s\theta_{23} \end{pmatrix} = \mathbf{g}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \text{ des DD}_{\perp}\text{D}_{||} \text{ - Roboters}$$

mit drei FHG lassen sich mit Mathematica zwar numerisch, nicht aber symbolisch auflösen.

- ☞ Die Lösungen sind in der Regel mehrdeutig, da
- $\tan(\theta + k\pi) = \tan(\theta)$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  d.h.  $\theta = \theta - 180^\circ$  ist ebenfalls eine Lösung!  
 $\cos(\theta) = \cos(-\theta)$ .

- Bei mehr als 3 FHG sind mehr Variable als Gleichungen vorhanden:

Abhilfe: Vorgabe weiterer Bedingungen

- z.B. Orientierung des Effektors
- Minimierung der Stellenergie, minimale Wege, Kollision mit Gegenständen, usw.
- Einsatz von Optimierungsroutinen.

**Übung 5.2:** Lösung des  $DD_{\perp}D_{||}$  - Roboters von Hand, bei einer Betrachtung in der R-Z-Ebene:Geg:  $X_G, Y_G, Z_G$ ,Ges:  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 

Lös:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{Y_G}{X_G}\right), \quad (1)$$

$$R_G = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2}, \quad (2)$$

$$c = \sqrt{R_G^2 + (Z_G - d_1)^2}, \quad (3)$$

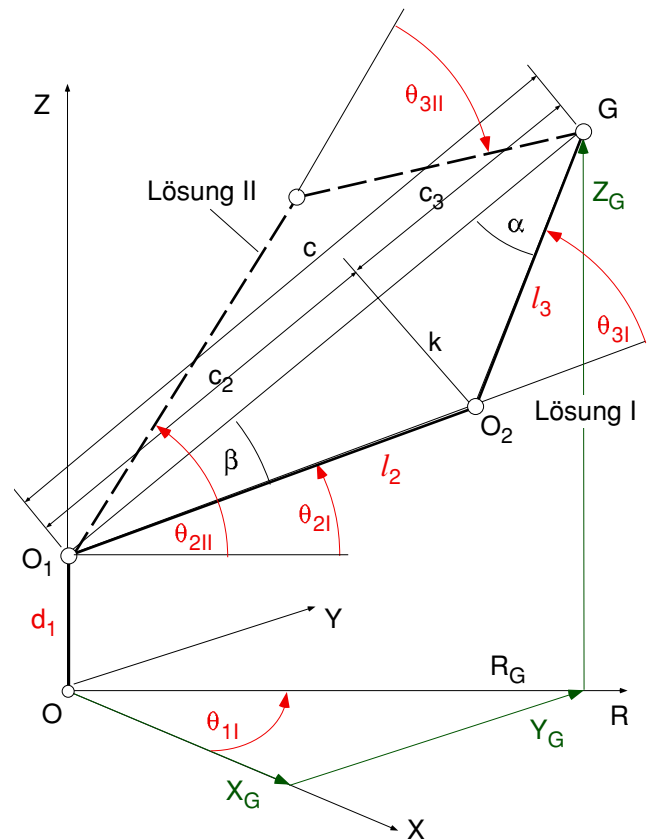
$$\cos \alpha = \frac{l_3^2 + c^2 - l_2^2}{2cl_3}, \quad (4)$$

$$k = l_3 \sin \alpha, \quad (5)$$

$$\sin \beta = \frac{k}{l_2} = \frac{l_3}{l_2} \sin \alpha, \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{Z_G - d_1}{R_G}\right) - \beta, \quad (7)$$

$$\theta_3 = \alpha + \beta. \quad (8)$$



Werte die Gleichungen der Roboterkoordinaten für  $\mathbf{r}_G = (600, 340, 990)^T$  mm und die DH-

Parameter nach Übung 5.1 ( $d_1 = 440$  mm,  $l_2 = 560$  mm,  $l_3 = 360$  mm) aus.

### 5.3.5 Kleine Bewegungsänderungen um einen Arbeitspunkt

☞ Kleine Bewegungsänderungen des Roboters um einen Arbeitspunkt (\*) können anstelle der Auswertung nach  $\mathbf{r}_G = \mathbf{g}(\mathbf{q})$ , z.B.  $\mathbf{q} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$  näherungsweise durch eine Taylorreihe repräsentiert werden:

Arbeitspunkt \* von G in Weltkoordinaten:  $\mathbf{r}_G^* = \mathbf{g}(\mathbf{q}^*)$ , z.B.  $\mathbf{q}^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*)^T$

Neue Position  $\mathbf{r}_G = \mathbf{r}_G^* + \Delta \mathbf{r}_G = \mathbf{g}(\mathbf{q}^* + \Delta \mathbf{q})$ , z.B.  $\Delta \mathbf{q} = (\Delta q_i) = (\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3)^T$

Taylorreihe um (\*)  $\mathbf{r}_G = \mathbf{r}_G^* + \Delta \mathbf{r}_G = \mathbf{g}(\mathbf{q}^*) + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{q}^T} \right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \Delta \mathbf{q} + \sum_i \sum_j \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{g}}{\partial q_i \partial q_j} \bigg|_{\substack{q_i=q_i^* \\ q_j=q_j^*}} \Delta q_i \Delta q_j + \dots$

**Abweichung 1. Ordnung der Weltkoordinaten von (\*):**  $\Delta \mathbf{r}_G = \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{q}^T} \right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}_G \Delta \mathbf{q}$

mit  $\mathbf{J}_G$  als Jakobimatrix 1. Ordnung .

**Abweichung 1. Ordnung der Roboterkoordinaten vom Arbeitspunkt (\*)**

$$\Delta \mathbf{q} = (\mathbf{J}_G)^{-1} \Delta \mathbf{r}_G \stackrel{\text{z.B.}}{\Rightarrow} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{pmatrix} = (\mathbf{J}_G)^{-1} \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix}$$

**Übung 5.3:** Berechne die Jakobimatrix 1. Ordnung des DD<sub>⊥</sub>D<sub>||</sub> - Roboters (siehe Übung 5.1) und bestimme die Abweichungen der Roboterkoordinaten für  $\Delta \mathbf{r}_G = (10, 10, 10)^T$  mm und  $\mathbf{r}_G^* = (600, 340, 990)^T$  mm und  $\boldsymbol{\theta}^* = (29.5, 25.4, 33.8)^\circ$  aus Übung 5.2.

Vergleiche das Ergebnis mit dem der exakten Rechnung gemäß Übung 5.2.

### 5.3.6 Zusammenfassung der Kinematik von Robotern

Es sei  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(t)$  der Vektor aller Gelenkkoordinaten des Roboters z.B.  $\mathbf{q} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$   
 $\mathbf{p} = \mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_E \\ \vartheta_E \end{pmatrix}$  als Vektor aller Weltkoordinaten, wo  $\mathbf{r}_E$  die Position und  
 $\vartheta_E$  die Kardanwinkel der Orientierung des Effektors (E) zum Zeitpunkt  $t$  im WKS

so gilt

#### Vorwärtskinematik von E bez. WKS : Finde die Weltkoordinaten

Position  $\mathbf{r}_E = \mathbf{r}_E(\mathbf{q})$

Orientierung  $\vartheta_E = \vartheta_E(\mathbf{q})$

Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_E = \mathbf{J}_{vE}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$  mit der Jacobimatrix der Translation  $\mathbf{J}_{vE}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{r}_E(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}^T}$

Winkelgeschwindigkeit  $\boldsymbol{\omega}_E = \mathbf{J}_{\omega E}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$  mit der Jacobimatrix der Rotation  $\mathbf{J}_{\omega E}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \vartheta_E(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}^T}$

Beschleunigung  $\mathbf{a}_E = \mathbf{J}_{vE}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{a}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  mit  $\bar{\mathbf{a}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \left[ \frac{\partial \mathbf{J}_{vE}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}^T} \dot{\mathbf{q}} \right] \dot{\mathbf{q}}$

Winkelbeschleunigung  $\dot{\boldsymbol{\omega}}_E = \mathbf{J}_{\omega E}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \bar{\boldsymbol{\alpha}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  mit  $\bar{\boldsymbol{\alpha}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \left[ \frac{\partial \mathbf{J}_{\omega E}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}^T} \dot{\mathbf{q}} \right] \dot{\mathbf{q}}$

#### Rückwärtskinematik von E bez. WKS : Finde die Gelenkkoordinaten

Lage der Gelenkkoordinaten  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{r}_E, \vartheta_E)$

Geschwindigkeit  $\dot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{vE}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}_{\omega E}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_E \\ \boldsymbol{\omega}_E \end{pmatrix}$ , sofern die Jakobimatrix invertierbar ist

Beschleunigung  $\ddot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{vE}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}_{\omega E}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_E \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{a}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \bar{\boldsymbol{\alpha}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{pmatrix}$

#### Übung 5.3-2: Anwendung der Kinematikbeziehung für statische Aussagen - Mechanische Äquivalenz!

Berechne die Gelenkmomente des DD<sub>⊥</sub>D<sub>||</sub> - Roboters (siehe Übung 5.1) bei einer Last an G von

$\mathbf{F}_G = (100, 200, -300)^T$  N und Jacobimatrix  $\mathbf{J}_G$  aus Übung 5.3.

## 5.4 Steuerung und Programmierung von Robotern

### 5.4.1 Prinzip der Robotersteuerung

- ☞ Robotersteuerung bringe Stellkräfte und Momente in den Gelenkantrieben so auf, daß der Effektor von einer Lage 0 ( $P_0$  mit  $r_E(t_0)$  und Orientierung  $\vartheta_E(t_0)$ ) in eine Lage 1 ( $P_1$  mit  $r_E(t_1)$  und Orientierung  $\vartheta_E(t_1)$ ) auf einer definierten Bahn und gegebenen Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$  gelangt, siehe Bild 5.15.

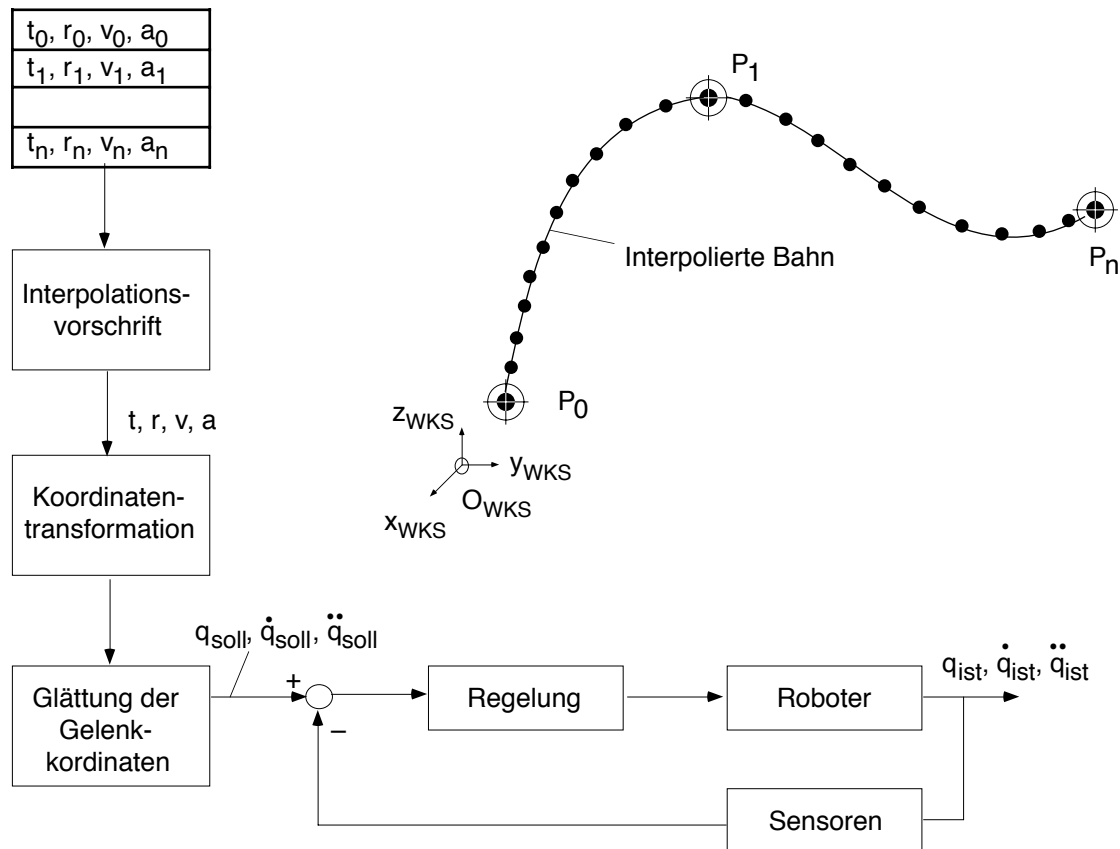
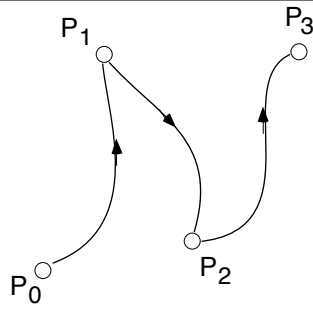
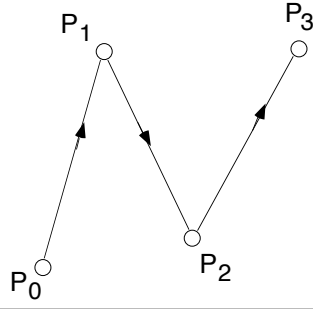
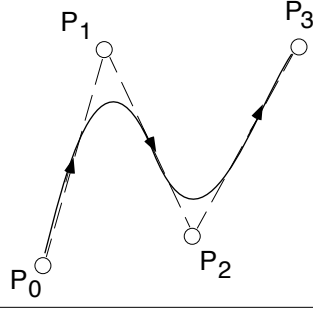
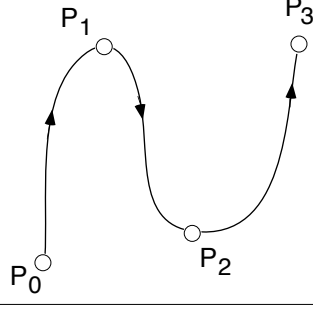


Bild 5.15 Prinzip der Steuerung eines Roboters

Anstelle des Abgleichs in  $\mathbf{q}$  kann  $\mathbf{p}(\mathbf{q})$  noch ausgewertet werden und der Abgleich bei  $\mathbf{p}$  erfolgen!



## 5.4.2 Mögliche Bahnkurven

1.	Punkt zu Punkt Planung mit beliebiger Raumbahn	
2.	Lineare Interpolation zwischen den Bahnsegmenten	
3.	Interpolierte geradlinige Bahnsegmente mit fließenden Übergängen (überschleifen)	
4.	Planung mit Interpolation höherer Ordnung (Polynome)	
5.	Planung von Bahnsegmenten zwischen bewegten Raumpunkten (Tracking Verfahren)	

### 5.4.3 Mögliche Bahnsteuerungen

- ◇ **Geometrische Steuerung:** nach Vorgabe von Punkten  $P_0, P_1, P_2$ , usw. werden die erforderlichen Gelenkkoordinaten aus den exakten Gleichungen der Rückwärtskinematik berechnet.  
Die Geschwindigkeiten werden aus dem Zeitintervall bestimmt:  $v = \Delta r / \Delta t$ .

Vorteil: exakte Lage der Rückrechnung

Nachteil: aufwendige kinematische Formeln, eindeutige Lösung erforderlich  
nur für einfache Systeme möglich!

- ◇ **Kinematische Steuerung:** nach Vorgabe von Punkten  $P_0, P_1, P_2$ , usw. werden die erforderlichen Gelenkkoordinaten aus den Näherungsgleichungen der Rückwärtskinematik kleiner Störungen berechnet (Taylorentwicklung um den Punkt  $k$ ) :

$$\mathbf{p}_{k+1}(\mathbf{q}_k) = \mathbf{p}_k(\mathbf{q}_k) + \Delta \mathbf{p}_k(\mathbf{q}_k)$$

$$\Rightarrow \mathbf{q}_{k+1}(\mathbf{p}_k + \Delta \mathbf{p}_k) = \mathbf{q}_k(\mathbf{p}_k) + \Delta \mathbf{q}_k(\mathbf{p}_k) \quad \text{mit} \quad \Delta \mathbf{q}_k(\mathbf{p}_k) = (\mathbf{J}(\mathbf{q}_k))^{-1} \Delta \mathbf{p}_k$$

Die Geschwindigkeiten werden aus dem Zeitintervall bestimmt:  $v = \Delta r / \Delta t$ , jedoch liegen die Zeitintervalle im Bereich von ms.

Vorteil: Einfache (schnelle) Auswertung

für beliebig komplexe Systeme einsetzbar!

Nachteil: Folgefehler, eindeutige Lösung erforderlich,

Abhilfe: Regelung mit Meßsystem einsetzen.

<b>Ablauf</b> für Werte von $k$ :	Schritt 0:	Start und Endwert von $\mathbf{p}_k$ festlegen
	Schritt 1:	$\Delta \mathbf{p}$ für eine geforderte Bahn und Geschwindigkeit und vorgeben
	Schritt 2:	$\mathbf{J}$ ableiten
	Schritt 3:	$\mathbf{J}$ für $\mathbf{q}_k$ auswerten
	Schritt 4:	$\mathbf{J}^{-1}$ berechnen
	Schritt 5:	$\Delta \mathbf{q}_k$ berechnen
	Schritt 6:	$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \Delta \mathbf{q}_k$ berechnen
	Schritt 7:	Zurück zu Schritt 3

- ◇ **Kontinuierliche Regelung:** Durch Rückführung der gemessenen Gelenkkoordinaten oder/und Effektorbewegung wird die Stellgröße der Gelenke modifiziert. --> Siehe Regelungstechnik

**Übung 5.4:** Der  $DD_{\perp}D_{||}$  - Roboter aus Übung 5.1 soll vom Punkt  $G_1$  mit  $\mathbf{r}_{G1} = (600, 340, 990)^T$  den Punkt  $G_2$  mit  $\mathbf{r}_{G2} = (0, 540, 790)^T$  auf einer geradlinigen Bahn in 2 sec. mit konstanter Geschwindigkeit anfahren.

Berechne die Gelenkkoordinaten nach dem ersten Zeitschritt, wenn  $\Delta t = 50$  ms sein soll und die kinematische Steuerung zur Anwendung kommen soll.

### 5.4.4 Programmierverfahren

☞ Programmieren heißt, einer Maschine einen Funktionsablauf beizubringen.

Die wichtigsten Programmierverfahren für Industrieroboter zeigt Bild 5.16

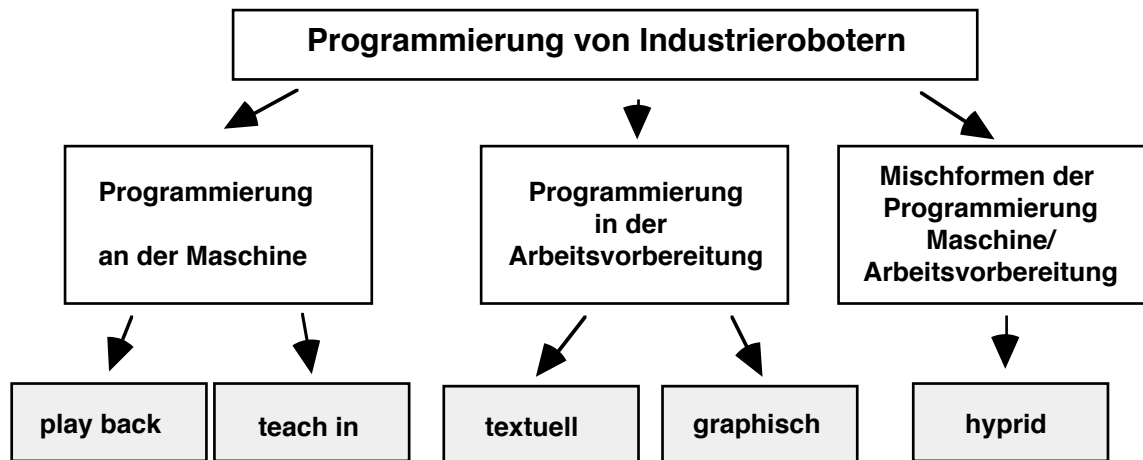


Bild 5.16:

#### Play-Back-Programmierung: Bild 5.17

1. durch direktes Führen des Effektors per Muskelkraft --> schwer, gefährlich
2. durch Führen eines leichten Master-Gerätes, das mit Roboter gekoppelt ist, Effektor fährt synchron nach.
3. durch Teleprogrammierung an leichtem Handgerät

Nachteil: Zur Programmierung muß der Roboter aus dem Produktionsprozeß genommen werden.

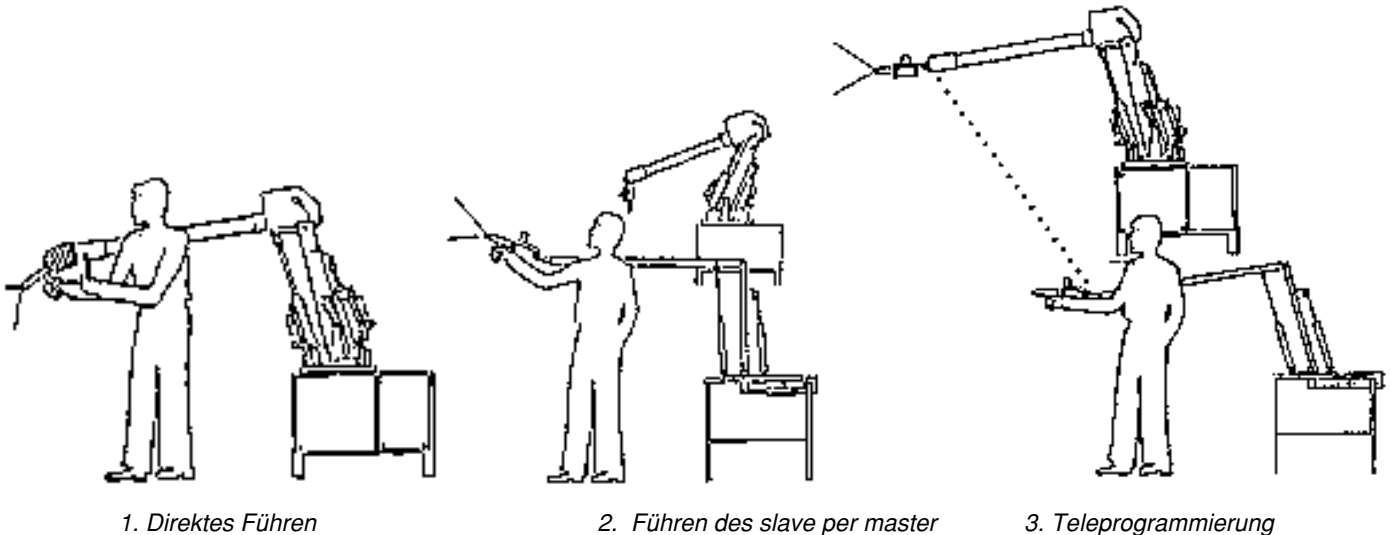


Bild 5.17: Play-Back-Programmierung

### Teach-in-Programmierung:

Zum Bewegen des Roboters dient ein Handprogrammiergerät (Teach-Pendant). Per Tastendruck werden Funktionen des Roboters angesprochen und gespeichert, siehe Bild 5.18.

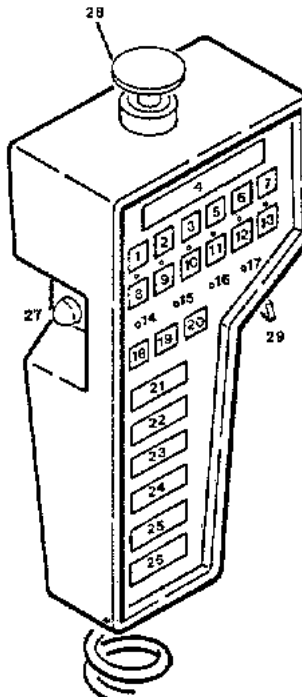
27	Arm Motoren ein/aus	
28	Notaus	
29	Geschwindigkeit schnell/langsam	
4	LED-Anzeige	
1	Record Taste	
2	Umschaltung Joint/Linear Interpolation	
3	Greifer 1 auf/zu	
5	Greifer 2 auf/zu	
6	Vorwärts blättern in Teach - Punktliste	
7	Rückwärts blättern in Teach - Punktliste	
8	Kontrolle zurück an Terminal	
9	Bewegen in Werkzeugkoordinaten (TCP)	
10	Bewegen in Weltkoordinaten (WKS)	
11	Bewegen einzelner Achsen	
12	Lösen der Bremsen einzelner Achsen	
12	Schrittweises Durchfahren einer Bahn	
14-17	Kontrolllampen	
18	Anfahren eines geteachten Punktes	
19	Nächster Programmschritt	
20	Kurzfristiges Anhalten des Arms	
21-26	Verfahren der einzelnen Achsen bzw. Bewegen in den 6 Koordinatenrichtungen	

Bild 5.18: Handprogrammiergerät für Teach-in-Programmierung

### Textuelle Programmierung:

In der Arbeitsvorbereitung wird am Rechner mittels Strukturelementen die Bewegung des Roboters beschrieben und das Programm der Robotersteuereinheit übertragen.

Strukturelemente zeigt Bild 5.19.

Leider gibt es **keine normierte** Robotersprachen.

Bewegungs- anweisungen	Ablaufanweisungen / Arithmetik	Kommunikations- anweisungen	Kontroll- und Überwachungs- anweisungen
Bewegung zu Punkt	Stops	Eingabe	Sensoranweisungen
Bewegung auf Gerade	Sprünge	Ausgabe	
Bewegung entlang Kurve	Schleifen	Eingänge überwachen	Notverhalten
Überschleifen	Logische Anweisungen	Ausgänge setzen	
Geschwindigkeit	Berechnungen	DNC-Anweisungen	Stör- und Fehler- anweisungen
Beschleunigung			

Bild 5.19: Strukturelemente einer Programmiersprache für Roboter

**Graphische Programmierung:**

wird **am Modell** des Roboters, der Umgebung und der Montageobjekte am Rechner durchgeführt. Es dienen dazu Computerprogramme mit graphischen Oberflächen, siehe Bild 5.20.

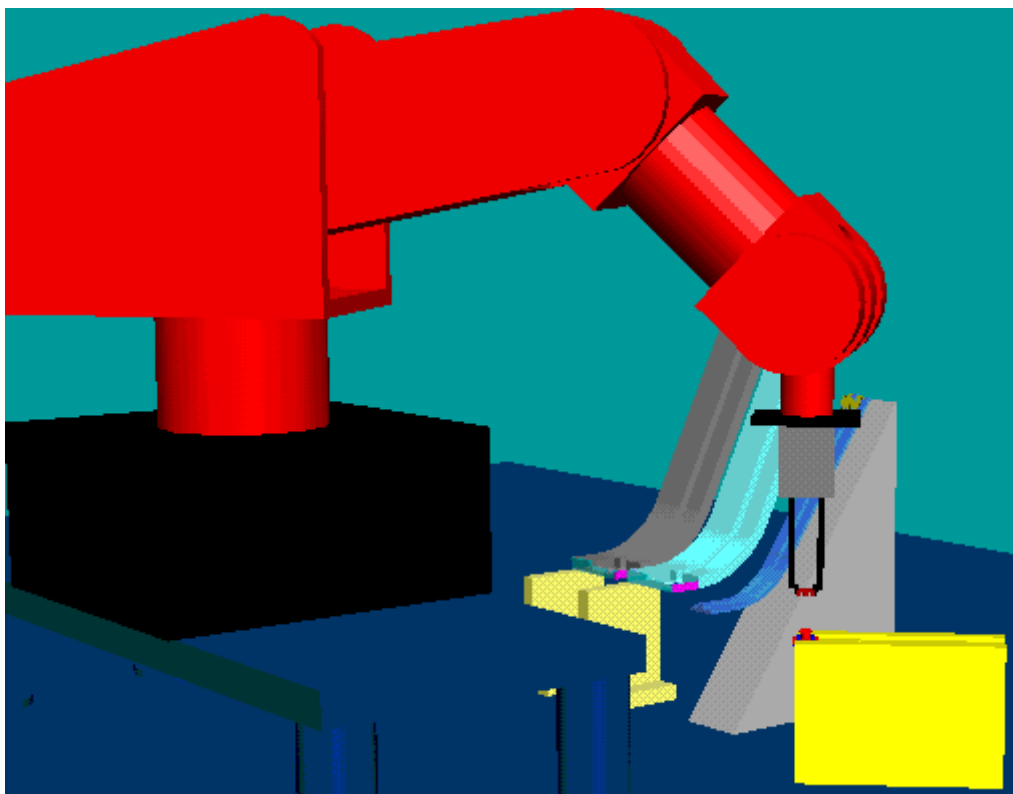
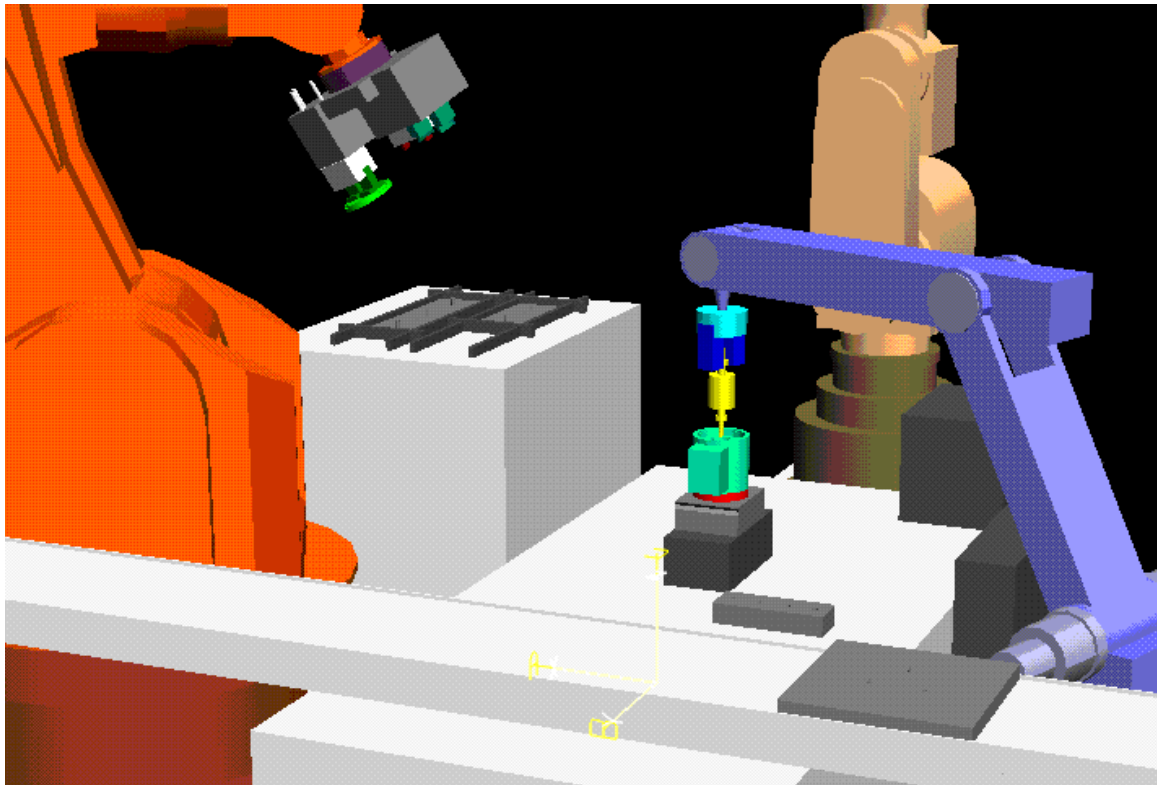


Bild 5.20: unten: Simulation der Motormontage, mit 3 Robotern, HR-Praktikum WS97.  
oben: Simulation der Spulenmontage, Mitsubishi-Roboter, HR-Praktikum SS 98.



## 5.4.5 Programmiersprachen

☞ Programmiersprachen dienen zum textuellen Programmieren von Robotern.

Leider gibt es **keine** internationale Norm!!

### ◇ spezielle Sprachen von Roboterentwicklern und Institutionen

SRCL	(SIEMENS Robot Control Language)	Siehe <b>Anhang A</b>
	Menüorientierte Programmiersprache	-> KUKA & MANUTEC
ARLA	Menüorientierte Programmiersprache	-> ASEA
VALII	(Variable Assembly Language)	
	PASCAL - ähnliche Programmiersprache	-> UNIMATION (PUMA) & ADEPT
KARAL	PASCAL - ähnliche Programmiersprache	-> GMF (General Motors/Fanuc)
AML	(A Manufacturing Language)	
	Assembler - ähnliche Programmiersprache	-> IBM
LAMA	Aufgaben - orientierte Programmiersprache	-> MIT

### ◇ Höhere Computersprachen

- PASCAL
- FORTRAN
- C

**Übung 5.5:** Schreibe ein SRCL-Programm zum Bewegen eines Objekts vom Punkt  $P1 = (500, -500, 350)$  und  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$  nach  $P2 = (500, 500, 250)$  mm und  $(0^\circ, 0^\circ, 60^\circ)$  bei anschließendem Einschieben um 30 mm in x-Richtung (P3). Fahre wieder zum Ausgangspunkt leer zurück. Greifen bei P1, loslassen bei P3.

## 5.5 Roboterwerkzeuge

- ☞ Roboterwerkzeuge werden auf den Effektor aufgesteckt und sind den Aufgaben des Roboters angepaßt, siehe Abschn. 5.1.3, 5.1.4.

Wichtige Werkzeuge sind: Greifer, Schrauber, Schweißgerät, Schleifer, Sprüher, usw.

Das Bezugskoordinatensystem der Werkzeuge ist **TCP** (Tool Center Point)

- ☞ Die Kopplung zwischen Effektor und Werkzeug ist **mechanisch, energetisch und informativ**.  
Ein automatischer Verschluß erlaubt, verschiedene Werkzeuge aus einem Magazin aufzustecken.

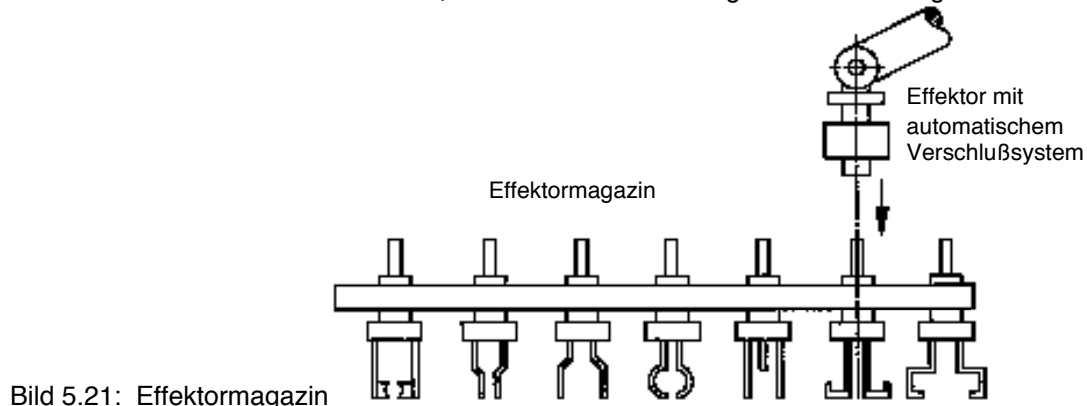


Bild 5.21: Effektormagazin

### 5.5.1 Greifer

- ☞ Das meist verwendete Werkzeug in der Montage und Handhabung von Werkstücken ist der Greifer. Greifer dienen zum Transport bzw. der Veränderung der Position oder Orientierung der Werkstücke unter Einfluß von Kräften und Momenten

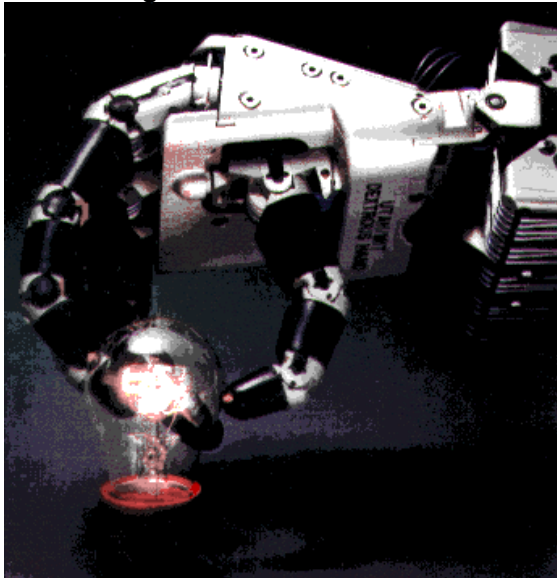
#### Die Menschliche Hand, der ideale Greifer

- 6 unabhängige Bewegungen der Hand gegenüber Körper
- 22 FHG in der Hand
- komplexes Sensoren für Lage, Kraft, Moment, Temperatur, Feuchtigkeit, Statik, Dynamik
- Tast- und Drucksensoren

#### Technische Greifer sind gekennzeichnet durch

- Anzahl der Finger
- Anzahl der Fingergelenke
- Art der Kraft- und Formsensoren, Tastsensoren, Abstandsensoren
- Antrieb
- Greifkraft
- Abmessungen und Gewicht

## Greiferentwicklungen



Utah/MIT-Hand



4-Finger-Roboterhand der DLR

☞ Technische Greifertypen sind mechanische Greifer, Sauggreifer und Magnetgreifer.

### Mechanische Greifer

- ◇ meist mit zwei oder drei Fingern (Backen) ausgestattet
- ◇ Lagefixierung der Werkstücke erfolgt kraftschlüssig bzw. bei entsprechender Gestalt der Backen auch formschlüssig.
- ◇ Verschiedene Bewegungsformen und Antriebe der Backen zeigt Bild 5.22.

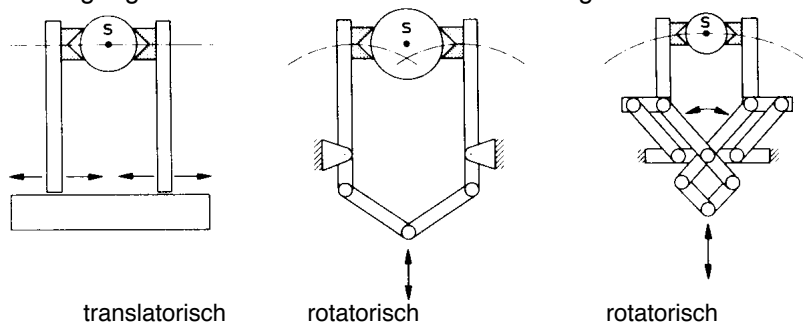


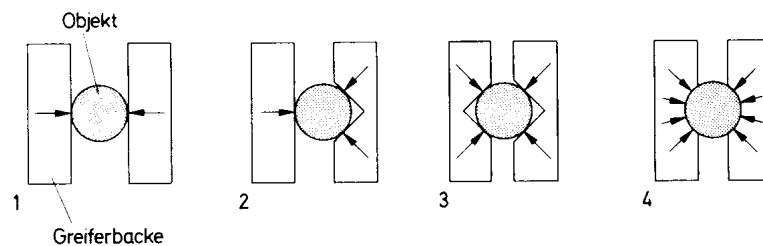
Bild 5.22: Bewegungsmöglichkeiten der Greiferbacken. Achtung:  $\emptyset$  hat Einfluß auf exakte Greifposition!

- ◇ Hebekraft eines 2 Backengreifers = Reibkraft =  $2 \mu$  Spannkraft

Zur Bestimmung der Kinematik und Antriebskraft siehe Kap. 3 und Kap. 6.

- ◇ Antriebe sind pneumatisch, elektrisch-mechanisch, hydraulisch, magnetisch
- ◇ Vergrößerung der Wirkflächen der Greifer verbessert die Tragfähigkeit, Bild 5.23.

### Zweibackengreifer



### Dreibackengreifer

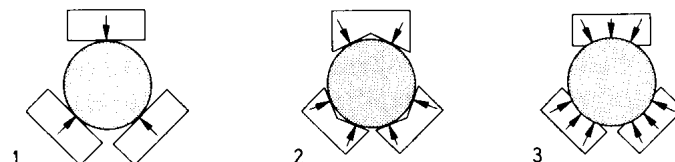


Bild 5.23: Wirkflächen der Greiferbacken

### Sauggreifer (Vakuumgreifer)

- ◇ Kraftschluß wird durch Saugglocke erzeugt, die auf glatter Oberfläche aufliegt.
- ◇ Einsatz bei Glas,  
glatte lackierte Oberflächen,  
großflächige labile Stoffe (z.B. Türdichtfolien),  
Teile, die nur von einer Seite fixiert werden können, z.B. gestapelte Blechteile  
Elektronikbausteine, die mit der Pipette gefaßt werden.

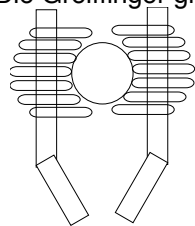
◇  $\text{Hebekraft} = \text{Saugkraft} = \text{Saugfläche} (\text{Saugdruck} - \text{atmosphärischer Druck})$

### Magnetische Greifer

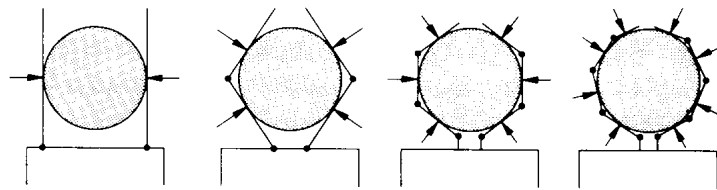
- ◇ Kraftschluß wird durch Magneten (Dauer- oder Elektromagnet) erzeugt
- ◇ Einsatz nur bei ferromagnetischen Werkstoffen
- ◇ sehr variabel gestaltbar
- ◇  $\text{Hebekraft} = \text{Magnetkraft}$  (siehe z.B. Physikbuch)

### Abformgreifer

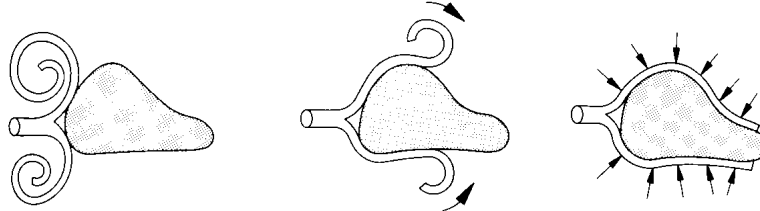
- ◇ Die Form der Backen oder Saugglocke oder Magnetplatte ist der Werkstückform angepaßt.
- ◇ Die Greiffinger greifen um das Werkstück herum, Bild 5.24.



Abformbacken



Mehrfingersysteme



Softgreifer

Bild 5.24. Abformgreifer / Softgreifer

☞ Technische Greifer finden Sie in Katalogen einschlägiger Firmen.

## Anhang A: Beispiel für ein SRCL-Programm

**Voraussetzung:** Die Steuerung ist eingeschaltet und der Roboter ist referiert.  
Die Programmierung erfolgt in folgenden Schritten:

DEF HP 1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mit der DEF-Anweisung wird das Hauptprogramm eingerichtet (evtl. eine andere HP-Nr ).</li></ul>
GES BAN 20	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bevor ein Bewegungssatz ausgeführt werden kann, sollte eine Geschwindigkeit programmiert werden, z.B. 20 m/min für Bahngeschwindigkeit.</li></ul>
GES ALL 50	<ul style="list-style-type: none"><li>• mit 50 % der maximalen Achsgeschwindigkeit fahren</li></ul>
PTP X1 Y1 Z1 A1 B1 C1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mit den Handverfahrtasten den Roboter in die Warteposition fahren und die Position 1 teachen.</li></ul>
GRF 1 AUF	<ul style="list-style-type: none"><li>• Den Greifer 1 öffnen</li></ul>
WRT E1 H	<ul style="list-style-type: none"><li>• Auf ein Teil warten (High-Signal an Eingang 1)</li></ul>
PTP X2 Y2 Z2 A2 B2 C2	<ul style="list-style-type: none"><li>• Teil anfahren (Punkt 2)</li></ul>
GRF 1 ZU	<ul style="list-style-type: none"><li>• Teil greifen</li></ul>
PTP X3 Y3 Z3 A3 B3 C3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Werkzeugmaschine anfahren (Punkt 3)</li></ul>
LIN X4 Y4 Z4 A4 B4 C4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Teil einlegen (Punkt 4 anfahren)</li></ul>
GRF 1 AUF	<ul style="list-style-type: none"><li>• Den Greifer öffnen</li></ul>
LIN X5 Y5 Z5 A5 B5 C5	<ul style="list-style-type: none"><li>• Arm aus der Maschine herausfahren (Punkt 5)</li></ul>
S IA 1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Maschine starten (Impulsausgang 1 setzen)</li></ul>
WRT E2 H	<ul style="list-style-type: none"><li>• Auf Fertigmeldung warten (High-Signal auf Eingang 2)</li></ul>
LIN X4 Y4 Z4 A4 B4 C4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fertigteil erneut anfahren</li></ul>
GRF 1 ZU	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fertigteil greifen</li></ul>
LIN X5 Y5 Z5 A5 B5 C5	<ul style="list-style-type: none"><li>• Arm aus der Maschine herausfahren (erneut)</li></ul>
PTP X6 Y6 Z6 A6 B6 C6	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ablage anfahren (Punkt 5)</li></ul>
GRF 1 AUF	<ul style="list-style-type: none"><li>• Teil ablegen</li></ul>
END HP 1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Programmende (wird automatisch erzeugt)</li></ul>



## Aufgaben zu Kap. 5

**Hinweis: Setze Mathe-Programme ein, siehe Lösungen im Internet.**

### Aufgabe 5.1: Kinematik zu Abschnitt 5.3.2, Bild 5.11.

- Berechne  $\mathbf{r}_E$ , wenn eine Drehmatrix  $\mathbf{A}^{0G}$  mit  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = \gamma = 0^\circ$  vorliegt und die Vektoren die folgenden Koordinaten haben:  $\mathbf{r}_G = (80, 40, 125)^T \text{ cm}$  und  ${}^G\mathbf{r}_{EG} = (20, -10, -20)^T \text{ cm}$ .
- Bestimme die Drehmatrix  $\mathbf{A}^{GE}$  mit den Winkeln  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 45^\circ$  und  $\gamma = 0$  und die Matrix  $\mathbf{A}^{0E}$ .
- Bilde aus den Drehmatrizen und Ortsvektoren die Transformationsmatrizen  $\mathbf{T}^{0G}$ ,  $\mathbf{T}^{GE}$ ,  $\mathbf{T}^{0E}$ .
- Bestimme aus  $\mathbf{A}^{0E}$  die Drehwinkel  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .
- Bestimme aus  $\mathbf{DH}^{0E} = \mathbf{T}^{0E}$  die 4 DH-Parameter.

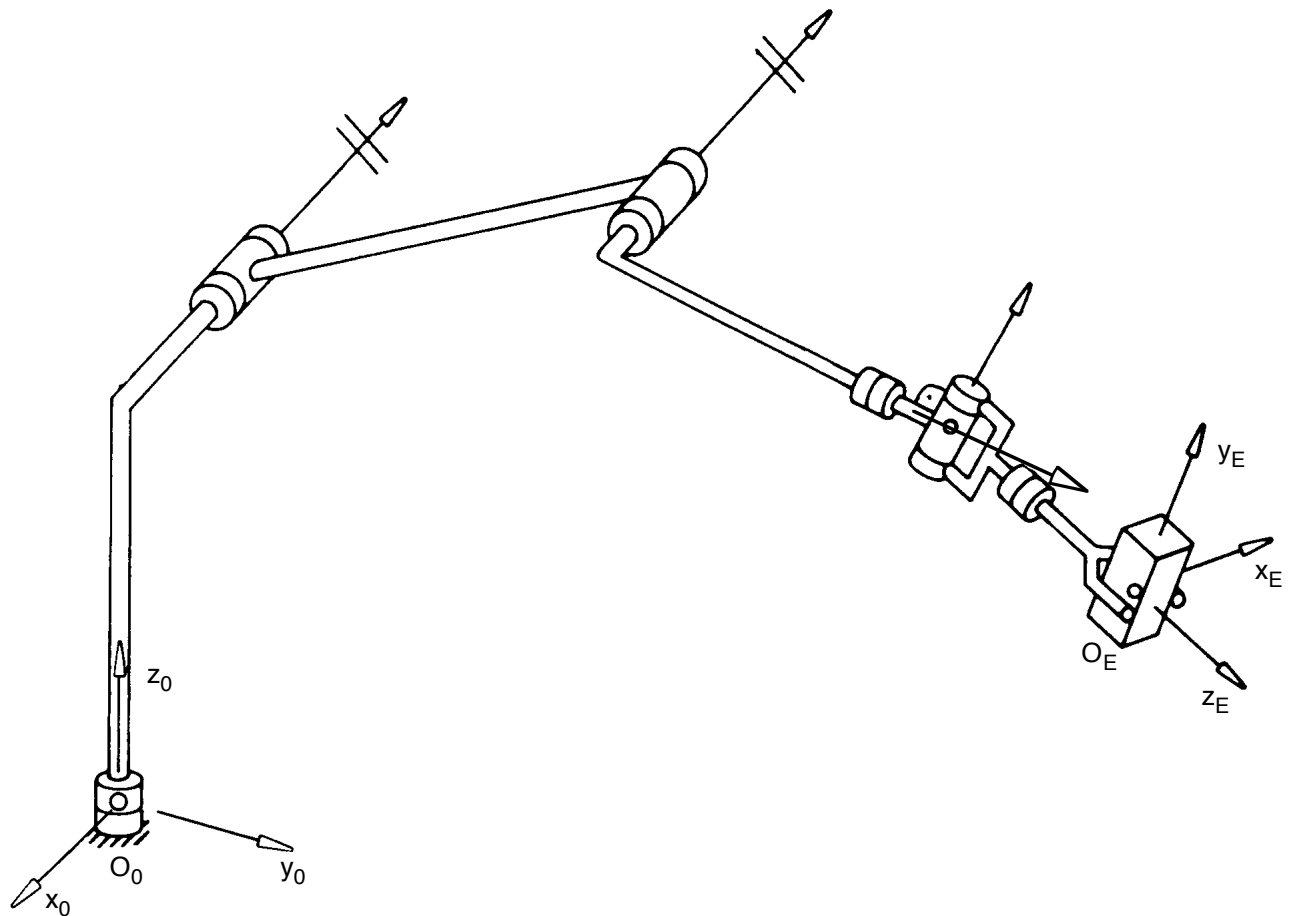
---


$$\text{Lösung: } \mathbf{T}^{0G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & 0 & -1 & 40 \\ 0 & 1 & 0 & 125 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{T}^{GE} = \begin{pmatrix} 0.707 & 0 & 0.707 & 20 \\ 0 & 1 & 0 & -10 \\ -0.707 & 0 & 0.707 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{T}^{0E} = \begin{pmatrix} 0.707 & 0 & 0.707 & 100 \\ 0.707 & 0 & -0.707 & 60 \\ 0 & 1 & 0 & 115 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$\alpha, \beta, \gamma = 90, 45, 0^\circ$ ;  $\theta_j, \lambda_j, d_j, l_j = 45^\circ, 90^\circ, 115, 116.62, \Rightarrow$  falsch, da  $\mathbf{T}^{0E}$  keine DH-Matrix!

**Aufgabe 5.2: Zu DH-Matrizen**

Bestimme die DH-Parameter des sechs-achsigen Knickarm-Roboters und stelle die 6 DH-Matrizen auf.

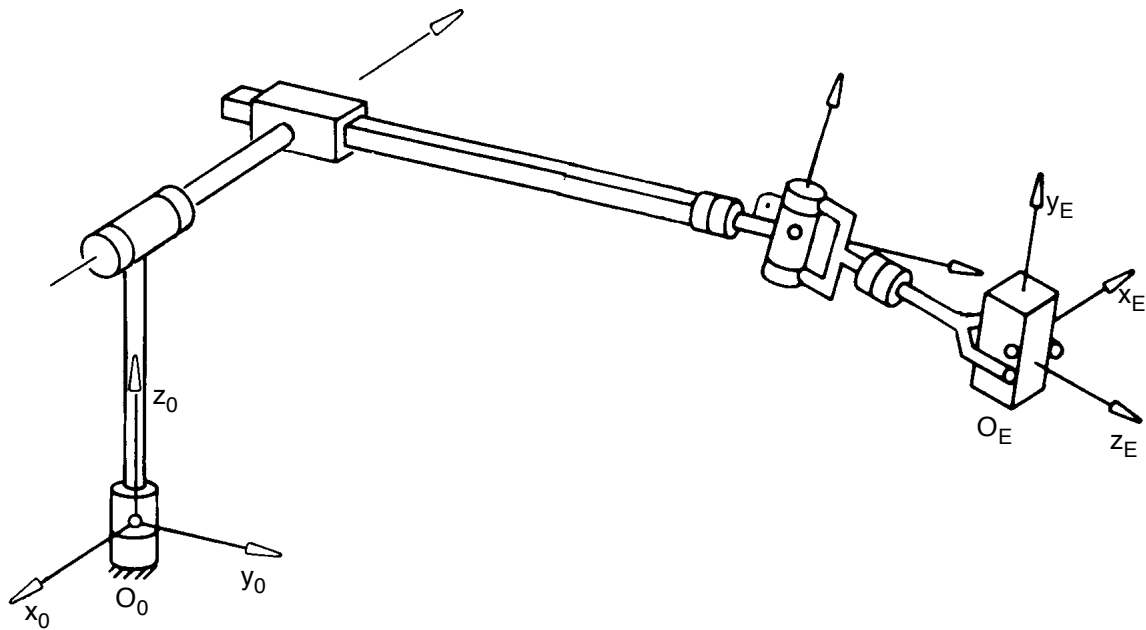


Gelenk j zw. Glied i und j	Winkel $\theta_j$ $= \angle(x_i, x_j) \text{ um } z_i$	Abstand $d_j$ $= \perp(x_i, x_j) \text{ in } z_i$	Abstand $l_j$ $= \perp(z_i, z_j) \text{ in } x_j$	Winkel $\lambda_j$ $= \angle(z_i, z_j) \text{ um } x_j$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Lösung: Gelenk 1:  $(\theta_1, d_1, 0, -90^\circ)$ , Gelenk 2:  $(\theta_2, d_2, l_2, 0)$ , Gelenk 6:  $(\theta_6, d_6, 0, 0)$ ,

**Aufgabe 5.3: Zu DH-Matrizen**

Bestimme die DH-Parameter des sechs-achsigen Roboters mit "Stanford-Arm" sowie die 6 DH-Matrizen



Gelenk j zw. Glied i und j	Winkel $\theta_j$ $= \angle(x_i, x_j)$ um $z_i$	Abstand $d_j$ $= \perp(x_i, x_j)$ in $z_i$	Abstand $l_j$ $= \perp(z_i, z_j)$ in $x_j$	Winkel $\lambda_j$ $= \angle(z_i, z_j)$ um $x_j$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

**Aufgabe 5.4: Kinematik des DDS-Roboters**

a) Stelle die DH-Parameter und DH-Matrizen für alle Gelenke auf.

b) Bestimme exakt die Gelenkkordinaten des Scara-Roboters

für eine Position  $\mathbf{r}_E = (200, 400, 300)^T$  mm.

i) mittels Graphik, Längenmaßstab  $M_S = 1 \text{ mm} / 50 \text{ mm}$  Wirklichkeit.

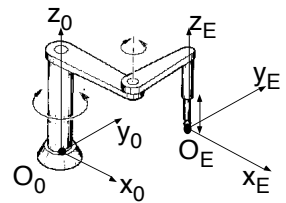
ii) mittels analytischen Gleichungen (siehe Abschn. 5.3.4)

c) Ermittle die neuen Gelenkkordinaten für eine Positionsänderung  $\Delta \mathbf{r}_E = (20, 20, 20)^T$  mm

i) mittels Graphik:

ii) mittels Jakobimatrix, (siehe Abschn. 5.3.4)

Geg: Höhe des Turms: 600mm, Länge Oberarm: 400 mm, Länge Unterarm: 350 mm, Höhe des Effektors 200 mm, Koordinatensysteme nach Skizze -->>.



Gelenk j zw. Glied i und j	Winkel $\theta_j$ $= \angle(x_i, x_j)$ um $z_i$	Abstand $d_j$ $= \perp(x_i, x_j)$ in $z_i$	Abstand $l_j$ $= \perp(z_i, z_j)$ in $x_j$	Winkel $\lambda_j$ $= \angle(z_i, z_j)$ um $x_j$
1				
2				
3				

Lösung: b) I:  $\theta_1 = 15^\circ$ ,  $\theta_2 = 107^\circ$ ,  $d_3 = -300$  mm; Lösung II:  $\theta_1 = 112^\circ$ ,  $\theta_2 = -107^\circ$ ,  $d_3 = -300$  mm

c) Lösung I:  $\theta_1 = 16^\circ$ ,  $\theta_2 = 102^\circ$ ,  $d_3 = -280$  mm; Lösung II:  $\theta_1 = 109^\circ$ ,  $\theta_2 = -102^\circ$ ,  $d_3 = -280$  mm

**Aufgabe 5.5: Sauggreifer**

Eine Glasplatte mit einem Gewicht von 10 kg soll durch einen Sauggreifer mit 4 Saugnapfen angehoben werden. Der Saugdruck ist 0.7 bar. Normaldruck = 1 bar, rechne mit  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

Wie groß muß der Durchmesser eines Napfes mindestens sein, um die Platte zu heben?



