Technische Hochschule Georg Agricola

VORLESUNG - ROBOTIK

BEWEGUNGSAUTOMATEN

Bochum

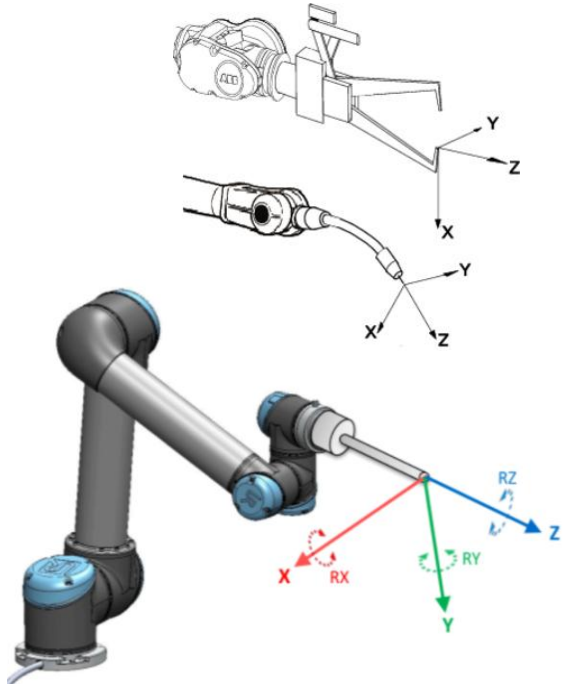
Prof. Dr.-Ing. Lars N. Josler

INHALT DER VORLESUNG

- Koordinatensysteme
- Achsdefinition
- Bewegungstypen
- Genauigkeit

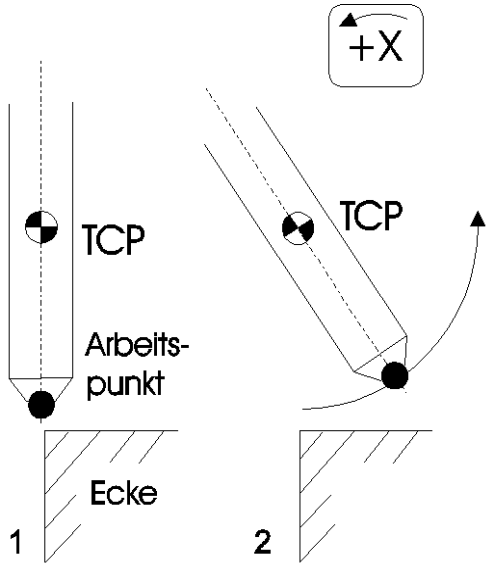
BEGRIFFSDEFINITION

- **Endeffektor**
  - Funktionale Einheit am Ende eines Roboterarms, Schnittstelle zwischen Roboter und Arbeitsobjekt
- **TCP = Tool Center Point (Werkzeugarbeitspunkt)**
  - für eine vorgegebene Anwendung festgelegter Punkt mit Bezug auf das Koordinatensystem der mechanischen Schnittstelle
- **Pose**
  - Gibt den Bezug des Koordinatensystems im Roboterflansch zum Basiskoordinatensystem im Fuß des Roboters an
  - Beinhaltet Position und Orientierung
  - Nicht immer eindeutig bezüglich Gelenkkonfiguration
- **Kinematik**
  - Beschreibt die Pose, Geschwindigkeit und Beschleunigung
- **Dynamik**
  - Beschreibt Kräfte und Drehmomente



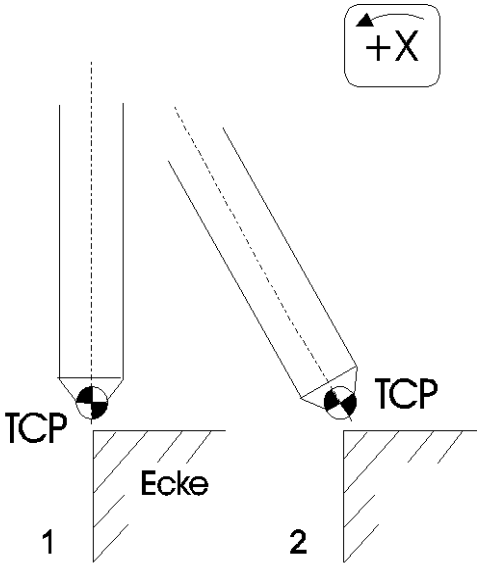
Quelle: universal-robots

FEHLERHAFTES VERSCHIEBEN DES TCPS



a) **falsche Lage des TCP´s**

TCP entspricht **nicht** der Lage des Arbeitspunktes



b) **richtige Lage des TCP´s**

TCP entspricht der Lage des Arbeitspunktes

BEGRIFFSDEFINITION

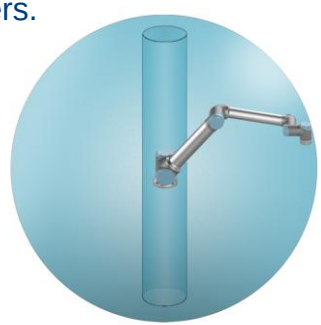
Freiheitsgrad, (DoF, degree of *freedom*)

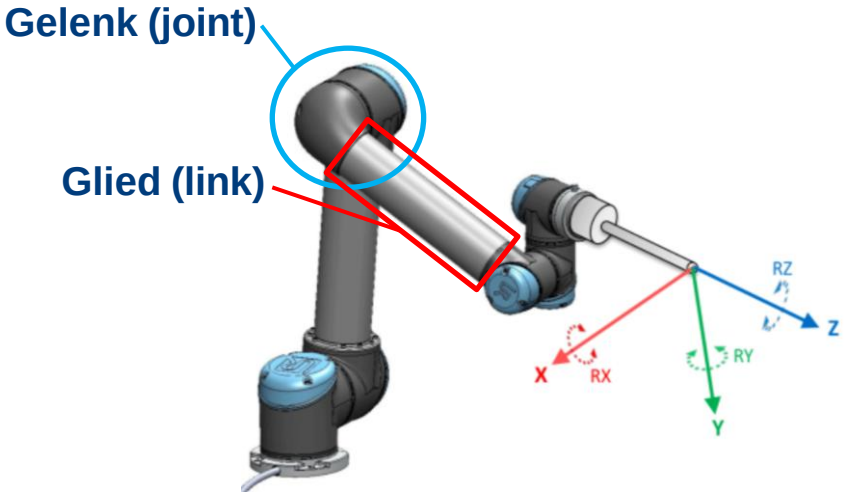
beschreibt die unabhängige Bewegungsmöglichkeit des TCPs. Jeder Freiheitsgrad steht für eine Translation (Bewegung entlang einer Achse) oder eine Rotation (Drehung um eine Achse).

Im Beispiel 6 Freiheitsgrade (3 translatorisch und 3 rotatorisch) Besteht aus 6 Drehgelenken

Arbeitsraum, (work space)

räumlichen Bereich, in dem sich das Endeffektor bewegen und arbeiten kann. Er ergibt sich aus der Kombination aller möglichen Bewegungen der einzelnen Achsen und Gelenke des Roboters.

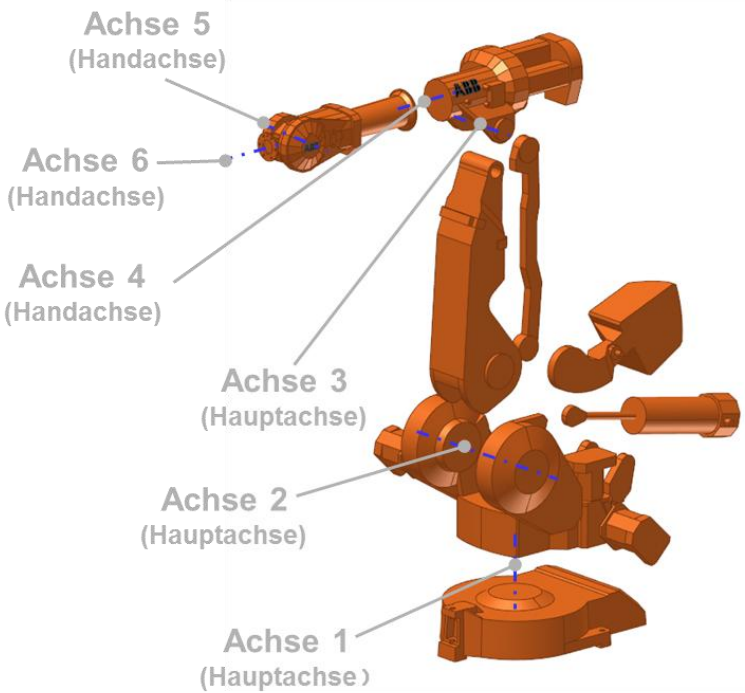




Quelle: universal-robots

DEFINITION DER ACHSEN EINES INDUSTRIEROBOTERS

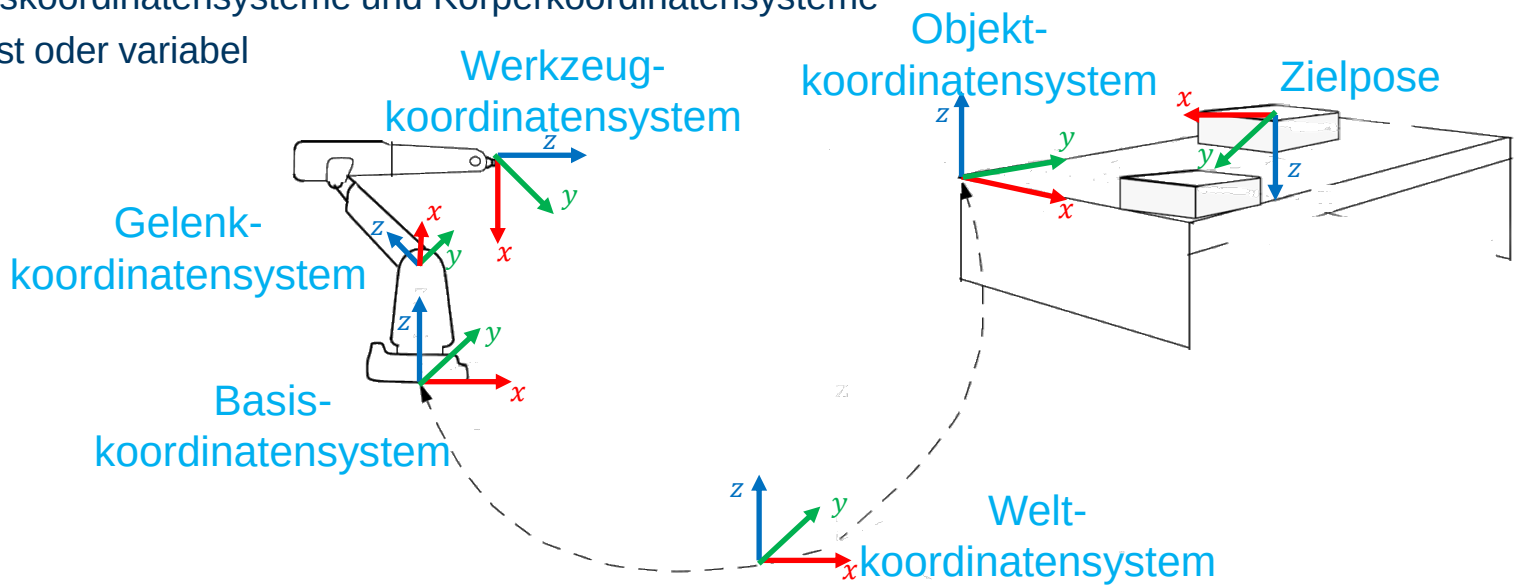
- **Achsen** sind geführte, unabhängig voneinander angetriebene Glieder. Entsprechend der Führung unterscheidet man rotatorische Achsen (Drehachsen) und translatorische (linear) Achsen.
- Bei **Industrierobotern** dienen diese zur Erzeugung definierter Bewegungen zum Positionieren und Orientieren von Objekten. Hilfseinrichtungen, wie z.B. zum Spannen oder Pendeln (beim Schweißen) werden nicht zu den Roboterachsen gezählt.
- **Hauptachsen** tragen wesentlich zur Ausbildung des Arbeitsraumes eines Industrieroboters bei. Sie dienen vornehmlich der Positionierung des Tool Center Point (TCP).
- **Handachsen** dienen vornehmlich der Orientierung des TCP. Sie haben nur einen geringen Einfluss auf die Ausbildung des Arbeitsraumes.



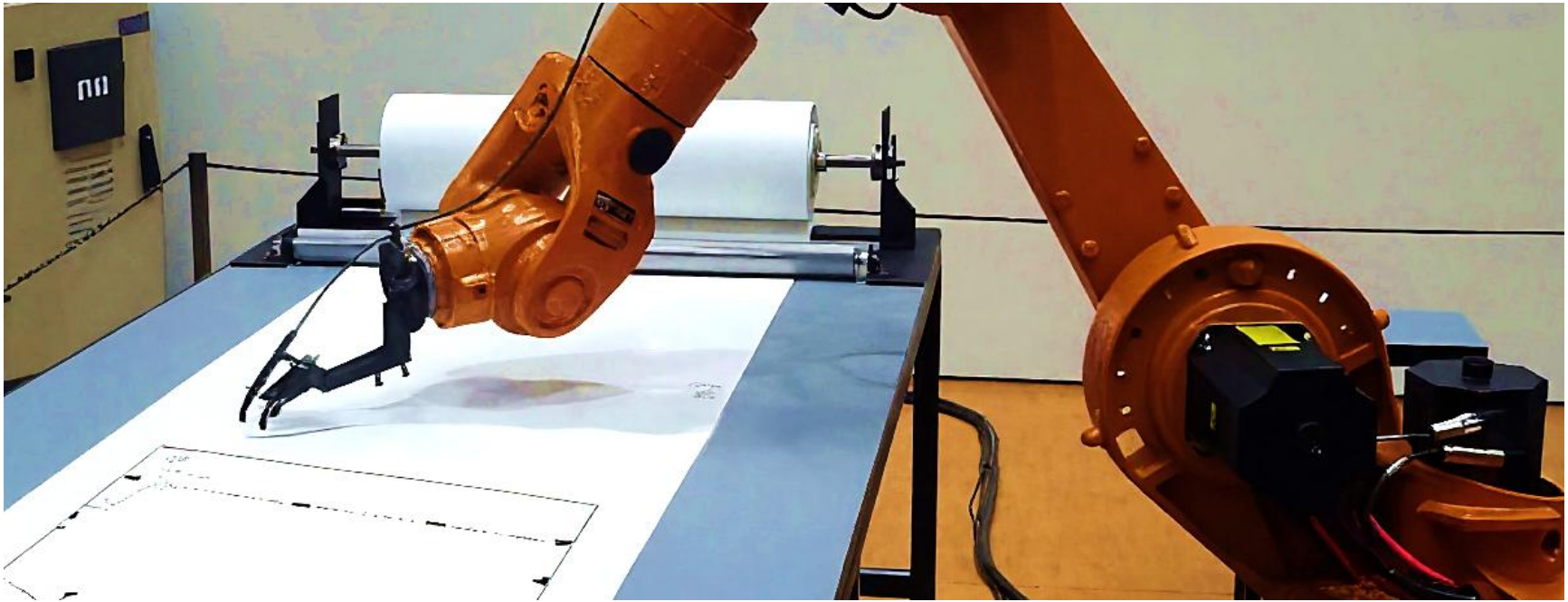
Quellen: VDI 2861 und ABB

ROBOTERKOORDINATENSYSTEME

- Roboter beschreiben **Posen (Position und Orientierung)** im Arbeitsbereich mit verschiedenen Koordinatensystemen
  - Bezugskoordinatensysteme und Körperkoordinatensysteme
  - Ortsfest oder variabel



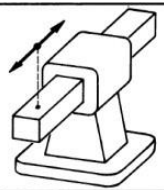
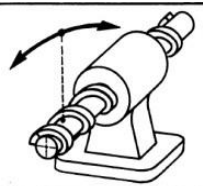
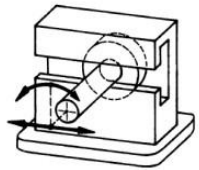
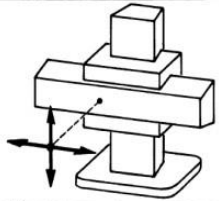
ÜBUNG



INHALT DER VORLESUNG

- Koordinatensysteme
- Achsdefinition
- Bewegungstypen
- Genauigkeit

AUSWAHL VERSCHIEDENER GELENKE NACH VDI 2156 (I)

f = 1			
	D Drehgelenk	S Schubgelenk	W Schraubgelenk
f = 2			
	DS Drehschubgelenk	DS Rollgleitgelenk	S_2 Doppelschubgelenk
	D_2 Kreuzgelenk	D_2 Kreuzgelenk	

D = Drehung

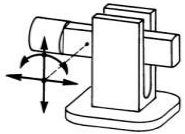
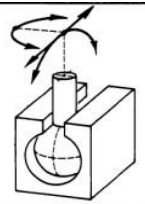
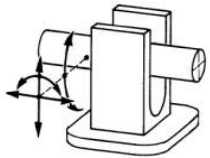
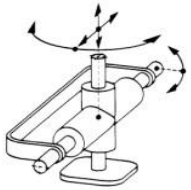
S = Schiebung

W = Windung

Index = Anzahl der Bewegungsformen

Quelle: VDI

AUSWAHL VERSCHIEDENER GELENKE NACH VDI 2156 (II)

f = 3			
	D_3 Kugelgelenk	DS_2 Plattengelenk	D_2S Kugelrillengelenk
f = 4			
	D_2S_2 Zylinderflächengelenk	D_3S Kugelrohrgelenk	D_2S_2 Doppeldrehschubgelenk
f = 5			
	D_3S_2 Kugelflächengelenk		

D = Drehung

S = Schiebung

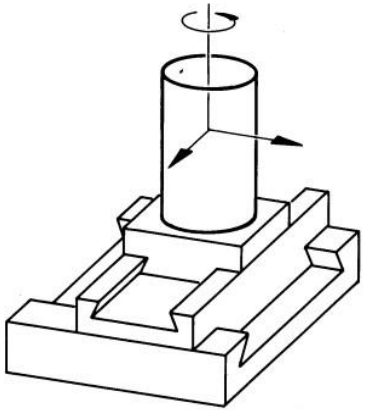
W = Windung

Index = Anzahl der Bewegungsformen

Quelle: VDI

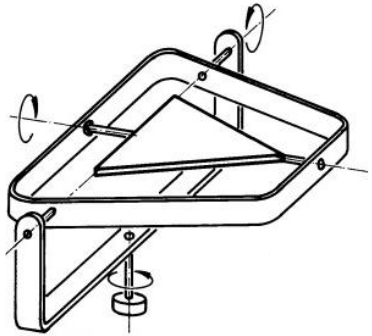
EBENE, SPHÄRISCHE UND RÄUMLICHE BEWEGUNG

Ebene Bewegung



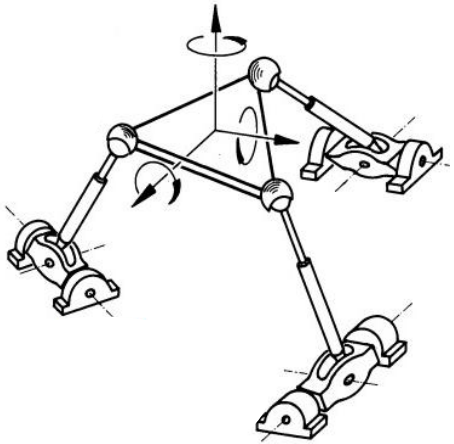
$$F_{trans} = 2$$
$$F_{rot} = 1$$
$$F_{eben} = 3$$

Sphärische Bewegung



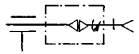
$$F_{trans} = 0$$
$$F_{rot} = 3$$
$$F_{sphär} = 3$$

Räumliche Bewegung



$$F_{trans} = 3$$
$$F_{rot} = 3$$
$$F_{raum} = 6$$

ACHSKONFIGURATION NACH VDI 2861

	Symbol	Bemerkung, Beispiel
Linearachse fluchtend		
Linearachse nicht fluchtend		
Verfahrachse		
Rotationsachse fluchtend		
Rotationsachse nicht fluchtend		
Werkzeuge		Spritzpistole, Schweißzange
Greifer		Zangengreifer
Systemgrenze		kurzer Trennstrich, echte Schnittstelle
Trennung zwischen Haupt- und Nebenachsen		

Quelle: VDI 2861

FLUCHTENDEN / NICHT FLUCHTENDEN EINZELGELENK

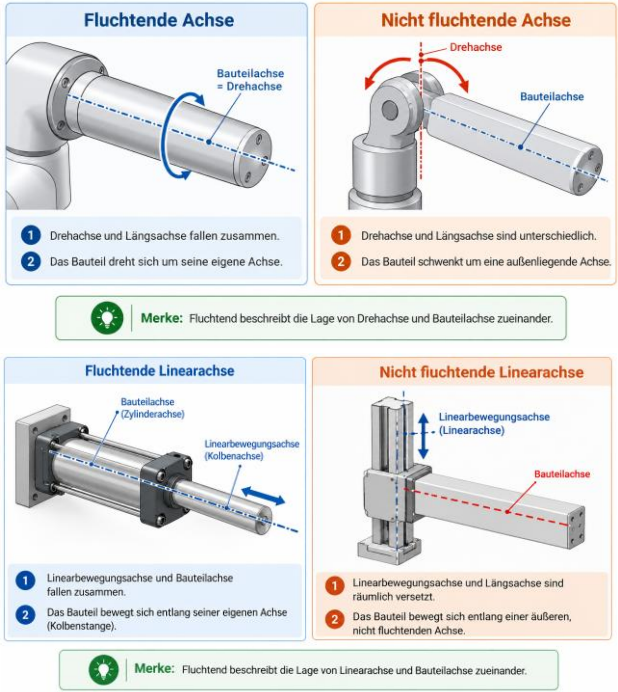
Beschreibt die Lage der Drehachse zur Längsachse des Bauteils.

Fluchtend

- Drehachse und Längsachse des Bauteils fallen zusammen.
- Das Bauteil dreht sich um seine eigene Längsachse.
- Beispiel: Rotation des Werkzeugflansches um Achse 6.

Nicht Fluchtend

- Drehachse und Längsachse des Bauteils fallen nicht zusammen.
- Das Bauteil schwenkt um die Gelenkachse.
- Beispiel: Schwenkbewegung des Roboterarms um Achse 2.



ACHSEN

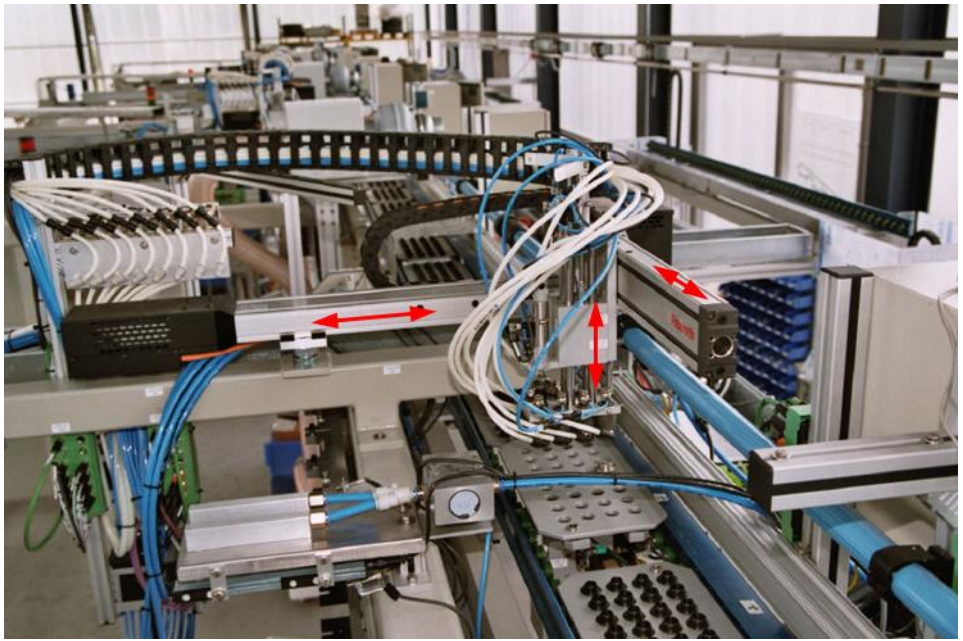
Animation
Zahnriemenachse

Linearachse

Quelle: Festo AG

PORTALROBOTER

Baukastensystem zur Konfiguration von Bewegungsautomaten durch Kombination von Linearachsen



Quelle: Bosch Rexroth

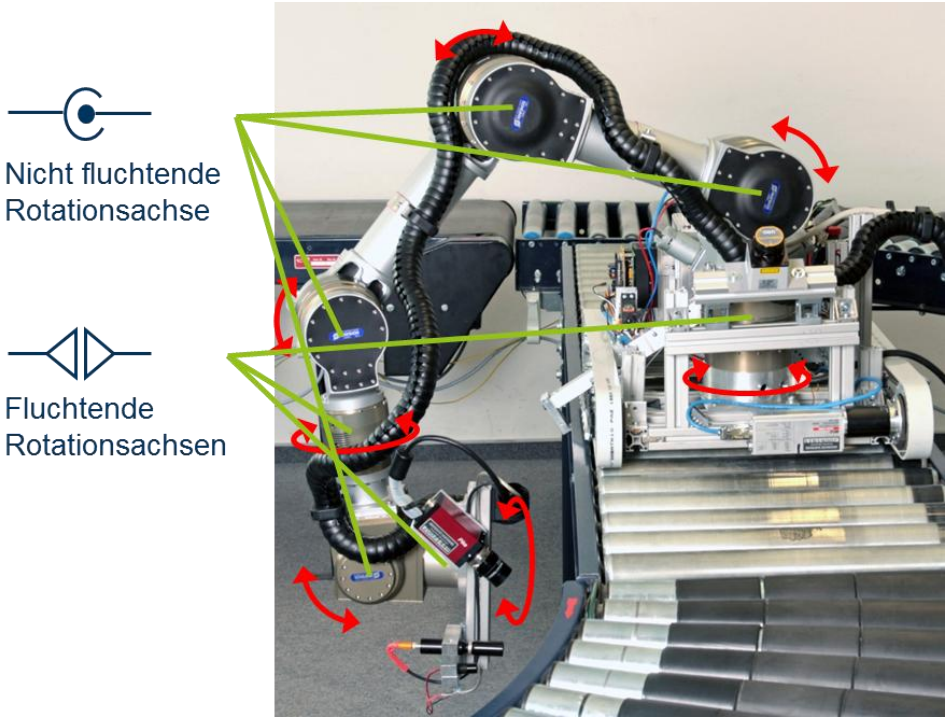
ACHSEN

Animation
Spindelachse

Linearachse

Quelle: Festo AG

ACHSEN

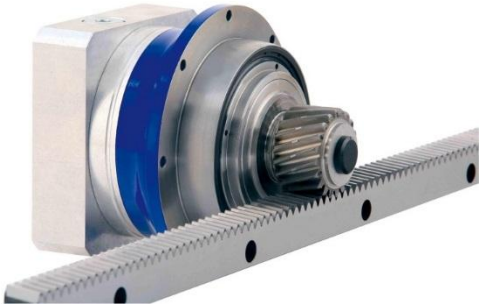

Nicht fluchtende
Rotationsachse
Fluchtende
Rotationsachsen

ACHSEN

Teleskopachsen

Quelle: Festo AG

Verfahrachse

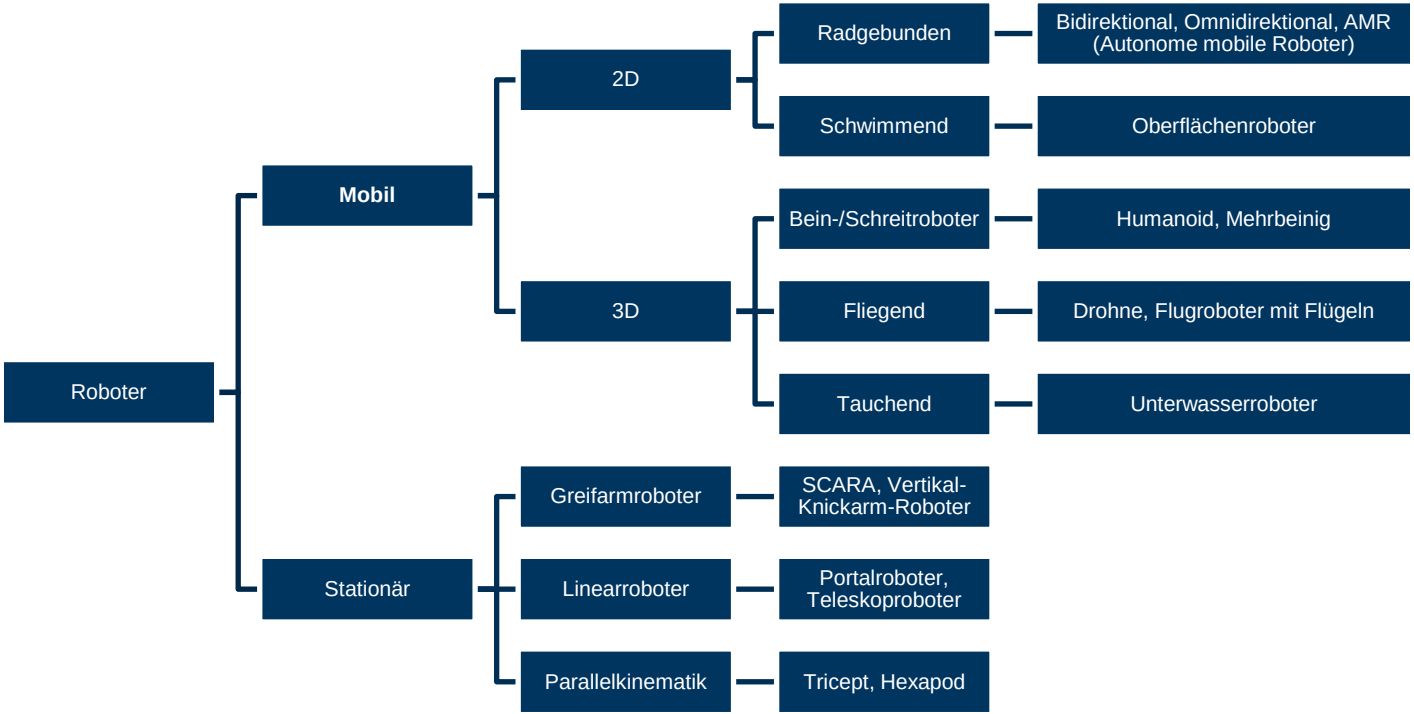


Quelle: www.wittenstein.de

INHALT DER VORLESUNG

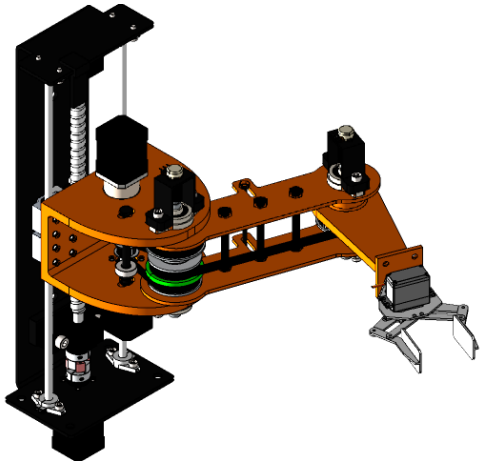
- Koordinatensysteme
- Achsdefinition
- Bewegungstypen
- Genauigkeit

BEWEGUNGSTYPEN

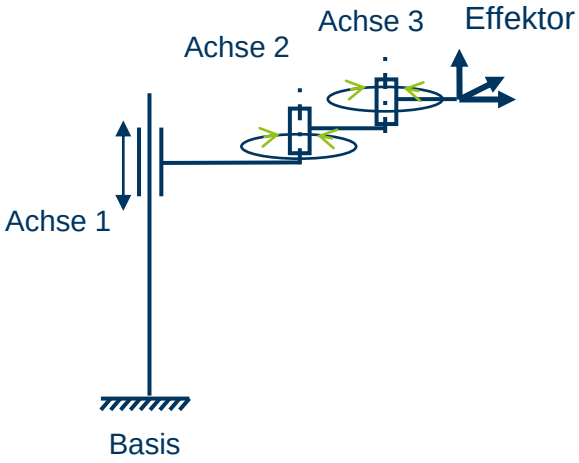


KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - TRR

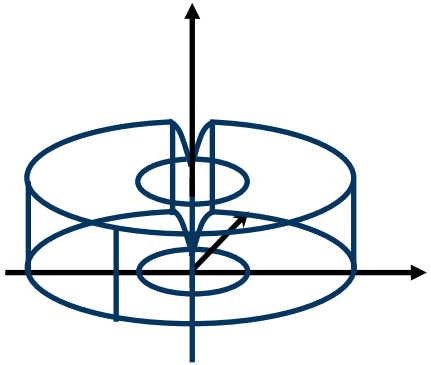
Beschreibung: Horizontal articulated arm Appliance



Konfiguration



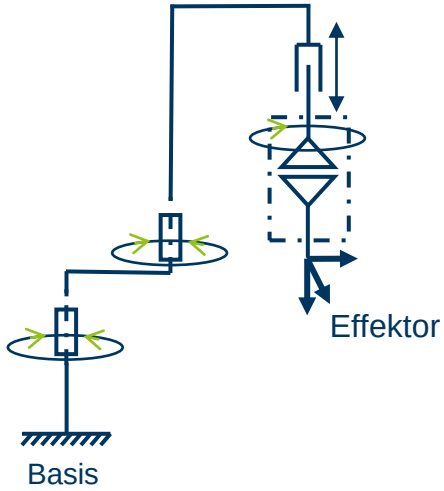
Kinematik



Arbeitsraum

SCARA-ROBOTER

Bauart

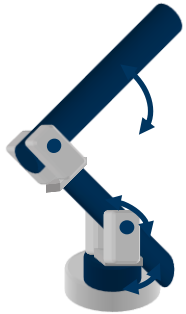


Kinematik

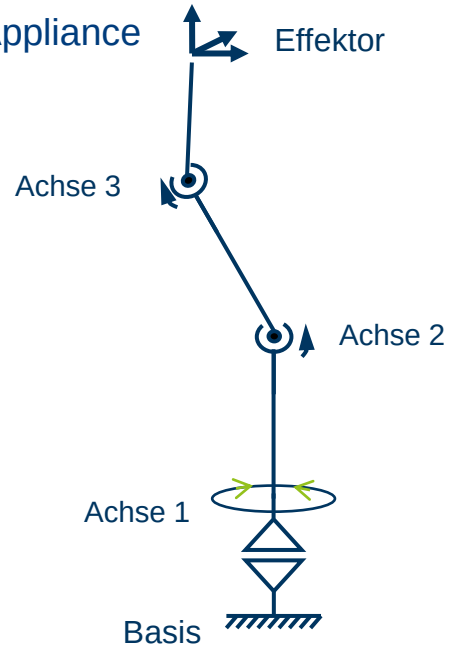
Arbeitsraum

KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - RRR

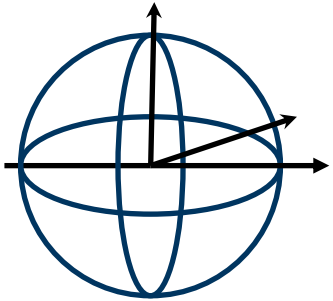
Beschreibung: Vertical articulated arm Appliance



Konfiguration



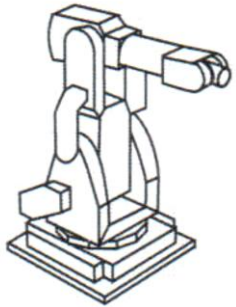
Kinematik



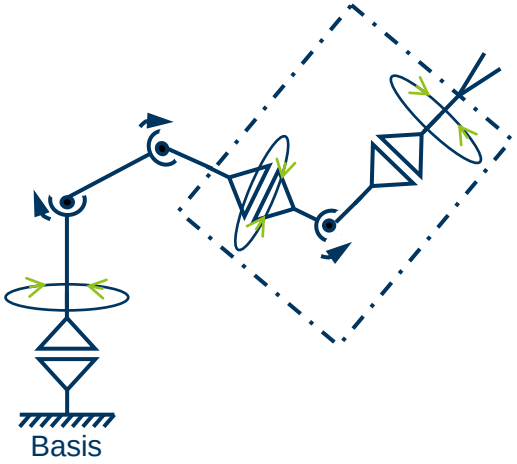
Arbeitsraum

VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER

Beschreibung: Vertical articulated arm Appliance



Bauart

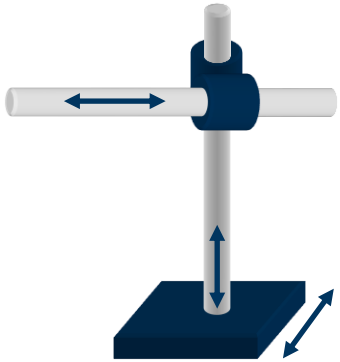


Kinematik

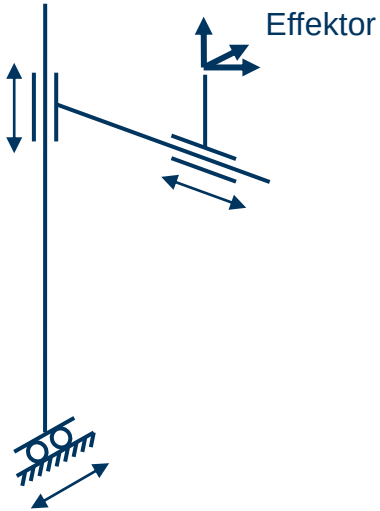
Arbeitsraum

KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - TTT

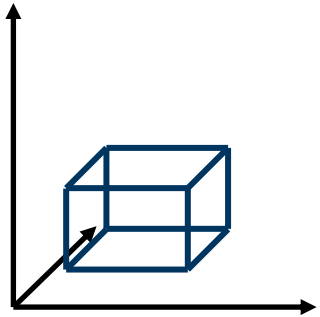
Beschreibung: Kartesische Koordinaten



Konfiguration

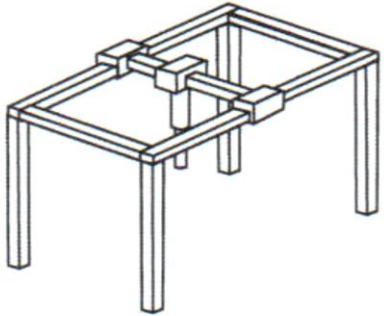


Kinematik

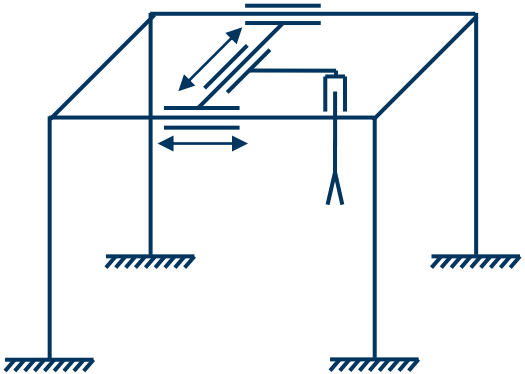


Arbeitsraum

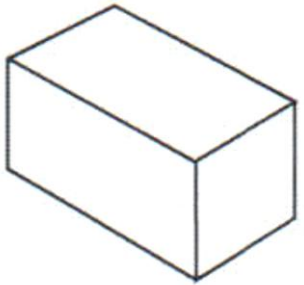
PORTALROBOTER



Konfiguration



Kinematik

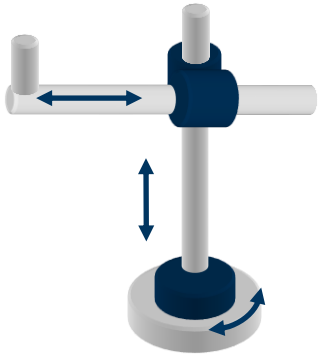


Arbeitsraum

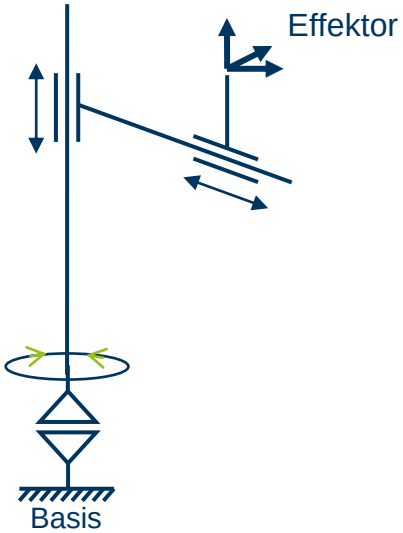
Quelle: Fa. Ro-ber, Wolf

KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - RTT

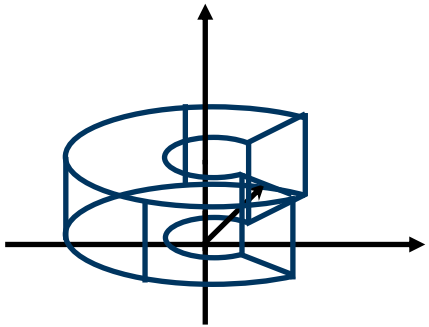
Beschreibung: Zylinder-koordinaten



Konfiguration



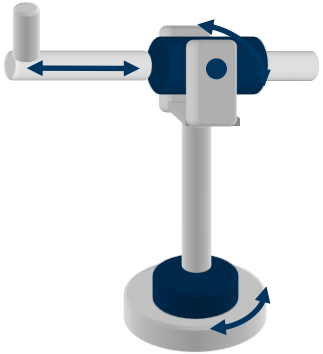
Kinematik



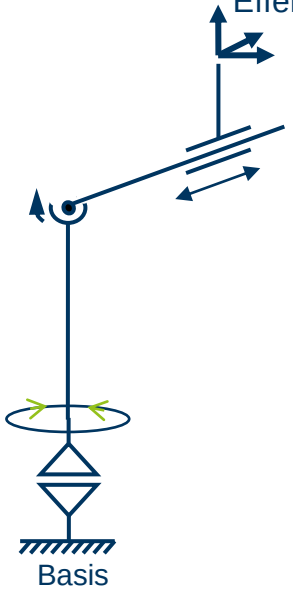
Arbeitsraum

KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - RRT

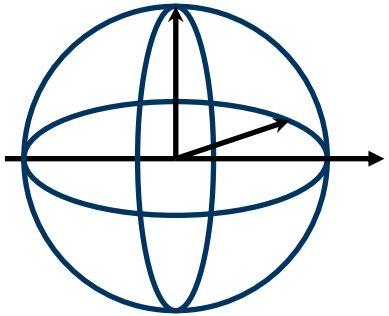
Beschreibung: Sphärische Koordinaten



Konfiguration



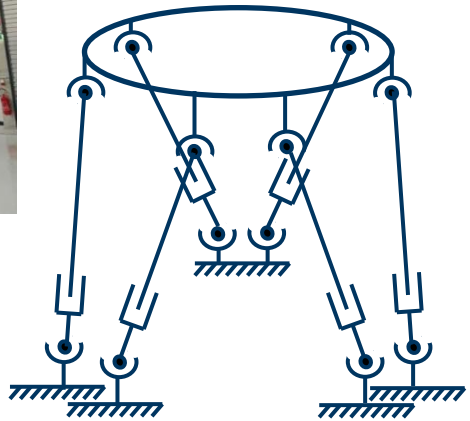
Kinematik



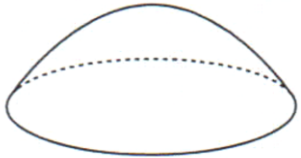
Arbeitsraum

SONSTIGE KINEMATIKEN: PARALLELKINEMATIK

Bauart



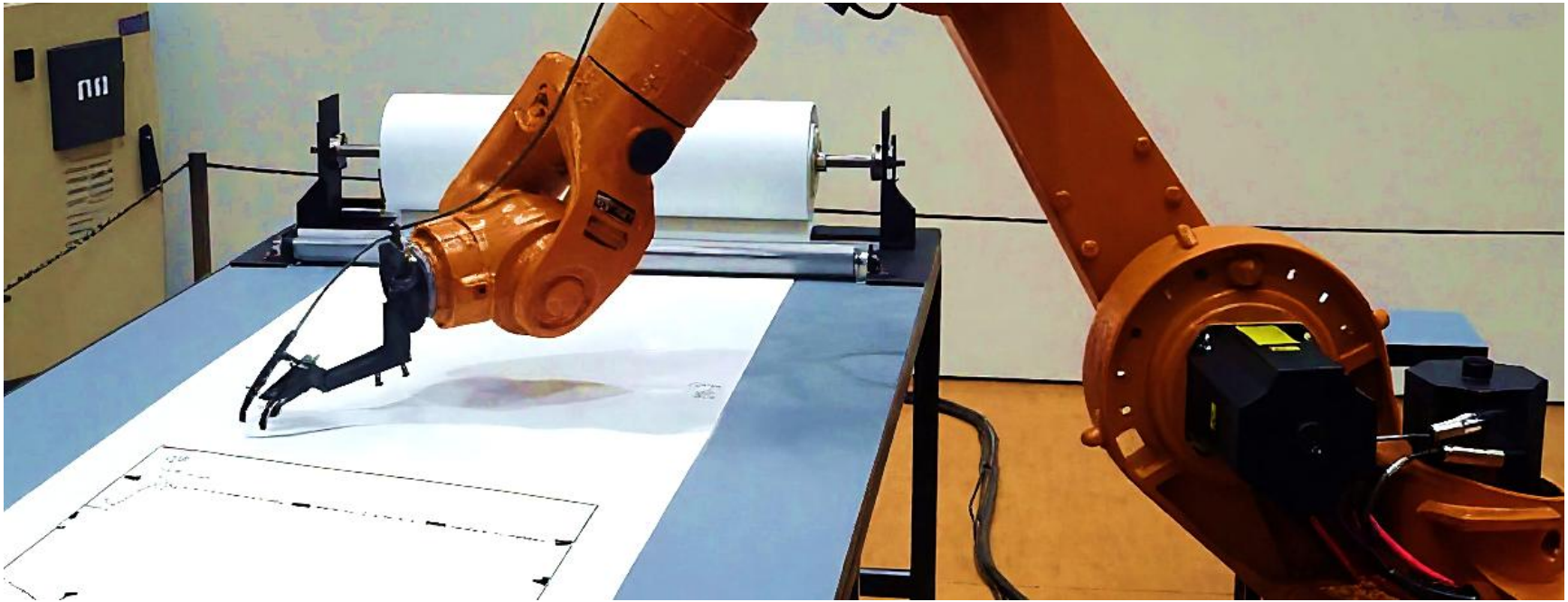
Kinematik



Arbeitsraum

Quellen: Lufthansa Flight Training, Wolf, way2fly

ÜBUNG



HORIZONTAL-KNICKARM-ROBOTER

- **Positionierung in der x-y-Ebene mit zwei rotatorischen Achsen**
- **Lineare Achse für Bewegungen in vertikaler (z-) Richtung, vor dem ersten oder nach dem zweiten Drehgelenk**
- **Besondere Bauform: SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Bewusste Nachgiebigkeit in x und y Richtung, um mit Hilfe von Montagefasen Ungenauigkeiten auszugleichen.**

Quellen: ABB, Stäubli, KUKA

BEISPIEL SCARA ROBOTER

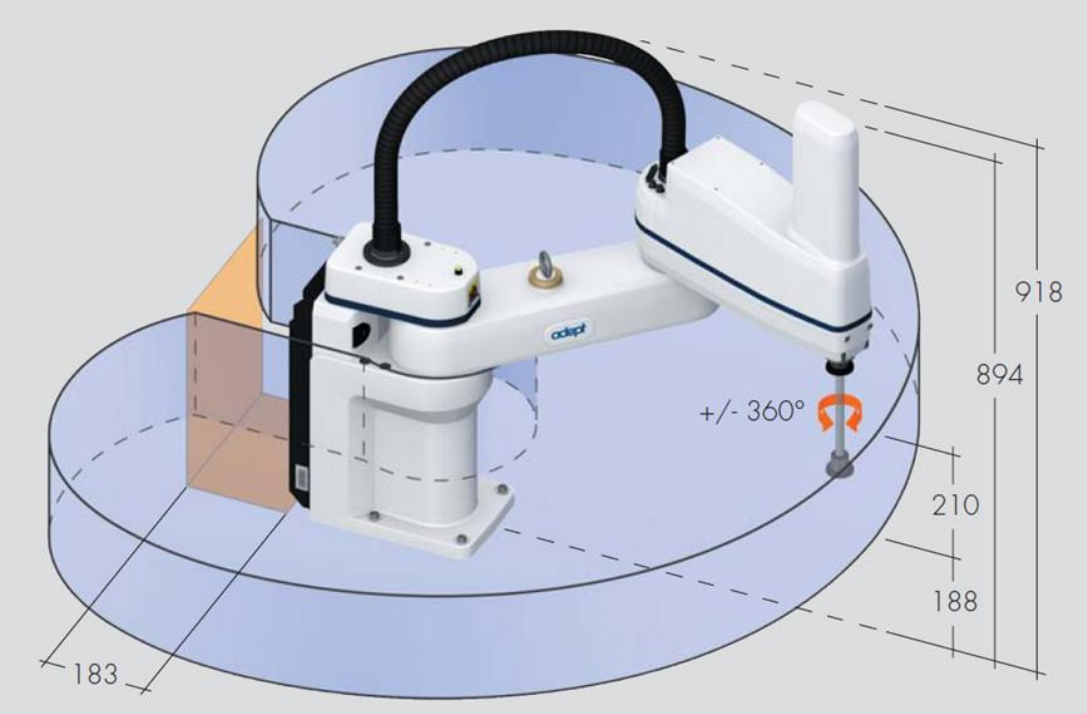
Quelle: Fanuc, Framka Emika

ARBEITSRAUM

Reichweite und Arbeitsraum des Adept Cobra i800:

Arbeitsraum:
Radius 800 mm
Innere Begrenzung
Radius 164 mm

Höhe 210 mm
Empfohlener
Wandabstand



Quelle: Adept

SCARA-ROBOTER

Einsatzbereiche:

- Montage, Handling, Verpackungs- und Schraubanwendungen
- Anlagenbestückung und Sortieraufgaben
- Mess- und Prüfaufgaben durch Führung von Sensorik
- Aufbringen von Kleber oder Dichtmitteln

Vorteile:

- geringe Taktzeiten realisierbar
- kompakte Bauweise
- aufgrund der hohen Stückzahlen kostengünstig
- Ausgleich von Ungenauigkeiten durch gezielte Nachgiebigkeit

Nachteile:

- kleiner Arbeitsraum
- begrenzte Flexibilität (4 Freiheitsgrade)
- Keine Kraftregelung
- i. d. R. Handhabungskapazität von wenigen Kilogramm

VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER

Hersteller / Typ	Adept Viper s650	ABB IRB 4400	Kuka 1000 Titan
Gewicht	28 kg	1040 kg	4700 kg
Traglast	5 kg	60 kg	1000 kg
Wiederholgenauigkeit	+/- 0,02 mm	0,07 - 0,1 mm	+/- 0,2 mm

Quelle: Adept, ABB, KUKA

VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER

Video
Automobil-
fertigung bei BMW

Quelle: https://www.youtube.com/watch?v=P7fi4hP_y80

VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER

Einsatzbereiche:

- **Handling und Montage**
- **Bearbeitungsprozesse**
- **Oberflächenbeschichtung / -behandlung**
- **Fügeverfahren**
- **Mess- und Prüfapplikationen**

Vorteile:

- **vielseitige Einsatzmöglichkeiten**
- **großer Arbeitsraum**
- **sehr hohe Traglasten möglich**
- **gute Orientierungsmöglichkeiten durch 6 Freiheitsgrade**

Nachteile:

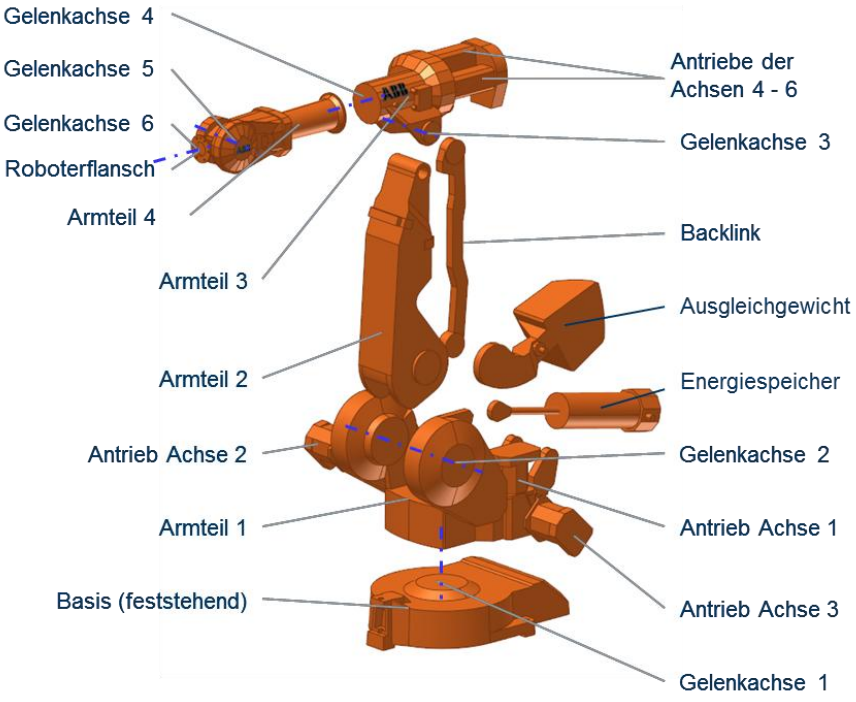
- **im Vergleich zu SCARA-Robotern geringere Geschwindigkeit**

KOMPONENTEN EINES ROBOTERS

Animation
Komponenten eines Vertikal-Knickarm-Roboters

Source: ABB

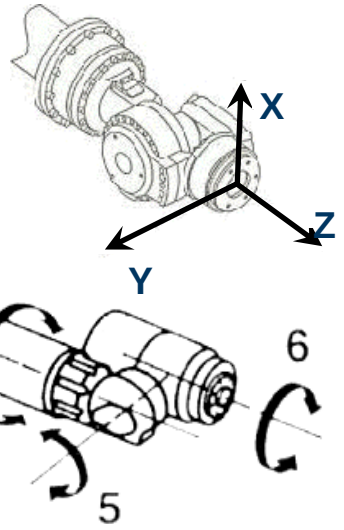
KOMPONENTEN EINES ROBOTERS



Source: ABB

HANDGELENKE

	Art	Vorteile	Nachteile
Zentralhand	Alle Handachsen schneiden sich in einem Punkt, genannt Handgelenkspunkt.	▪ Kompakter Bauraum ▪ Günstige Störkontur ▪ Kostengünstig	▪ Entstehung einer Singularität bei Parallelstellung von Achse 4 und 6
Winkelhand	Zwei Handachsen schneiden sich in einem Punkt. Die dritte ist mit einem lateralen Abstand an die zweite gekoppelt	▪ Einfacher Aufbau	▪ Bauraum der 6. Achse ▪ Schlechte Störkontur ▪ Aufwändige Kabelführung der 6. Achse
Doppelwinkel-hand	Besonders flexible Sonderbauform, bei der sich ebenfalls alle Handachsen im Handgelenkspunkt schneiden	▪ Flexibel beweglich ▪ Kompakte Bauform	▪ Komplexer Aufbau ▪ Störanfällig ▪ Teuer

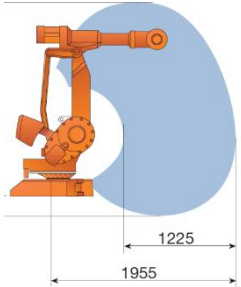
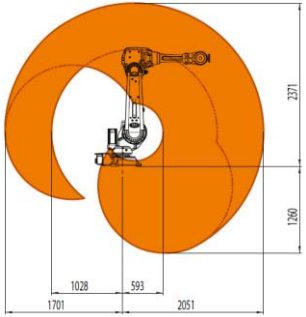


Quelle: SME Robot, KUKA

SINGULARITÄTEN

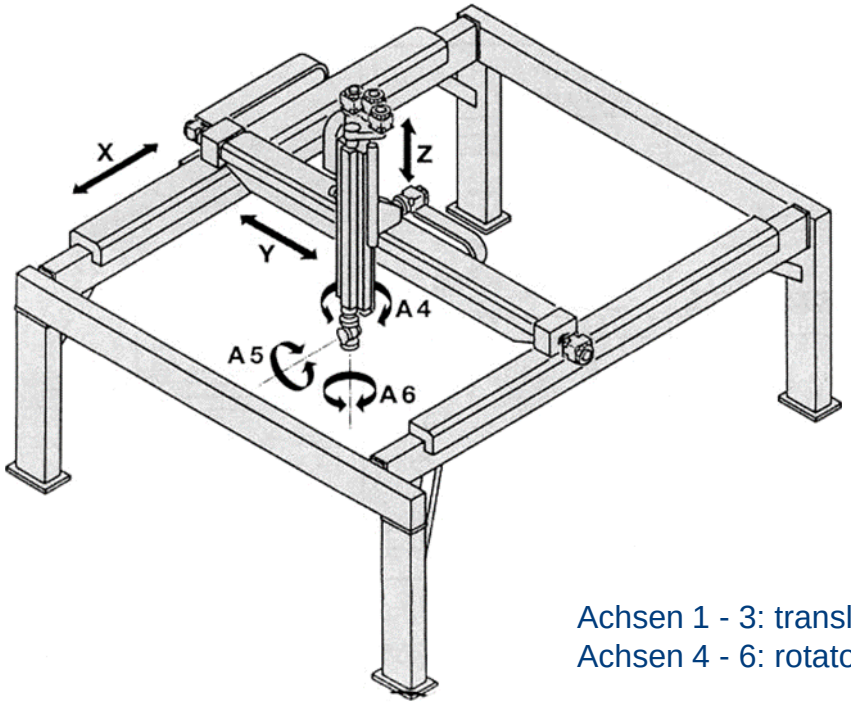
Quelle: What are robot singularities?

VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER

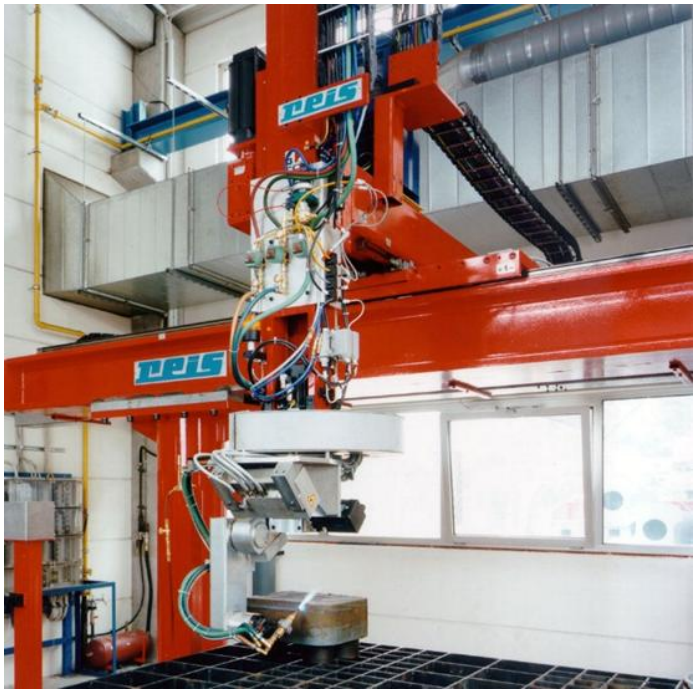
	Vorteile	Arbeitsraum im Profil
ABB IRB 4400 mit Backlink 	▪ höhere mechanische Steifigkeit ▪ höhere Bahngenauigkeit ▪ Gewicht: 1060kg	
ABB IRB 4600 ohne Backlink 	▪ geringeres Gewicht (425kg) ▪ geringere Teilezahl ▪ geringere Material- und Herstellungskosten ▪ größerer Arbeitsraum im Profil	

Quelle: ABB

PORTALROBOTER



Achsen 1 - 3: translatorisch
Achsen 4 - 6: rotatorisch



Quelle: Reis

PORTALROBOTER

Einsatzbereiche:

- einfache Pick & Place Anwendungen
- Getränke- und Lebensmittellogistik
- Palettier- und Kommissionieraufgaben
- 3-Achs-Portale zur Vergrößerung des Arbeitsraums von Knickarmrobotern

Vorteile:

- sehr große Arbeitsräume realisierbar (bis zu mehreren Metern)
- hohe Traglasten
- anschauliche Programmierung, geringere Komplexität der Robotersteuerung

Nachteile:

- geringere Geschwindigkeiten
- hoher Flächenbedarf
- aufwendige und teure Mechanik

PORTALROBOTER: VIDEO

Quelle: ERNE Portalroboter - Gantry Robot

DEFINITION VON PARALLELKINEMATIK-ROBOTERN

Parallelkinematik-Roboter:

- Bestehen aus Grundplattform als fester Basis und Greiferplattform
- Verbindung der Plattformen durch drei bis sechs angeordnete Linearachsen oder Gelenkarmen
- Durch die parallele (nicht sequenzielle) Anordnung bilden die Achsen eine geschlossene kinematische Kette
- Orientierung der Greiferplattform möglich
- Tricept-Roboter sind dreiachsige und Hexapod-Roboter sechsachsige Kinematiken mit parallelen Linearachsen (auch hybride Systeme möglich)
- Kinematiken für hohe Belastungen sind aus drei, vier oder sechs Linearachsen aufgebaut und ermöglichen eine hohe Stabilität bei jedoch nur geringer Geschwindigkeit und Dynamik.

TRICEPT UND HEXAPOD

Tricept

Hexapod

Quellen: ABB, T-ARM Parallel Kinematic Machining Center / Teknodrom Robotics, Fanuc

PARALLELKINEMATIKEN

Einsatzbereiche:

- **Bearbeitungsprozesse**
- **Mess- und Prüfaufgaben**

Vorteile:

- **hohe Beschleunigungen möglich**
- **hohe Geschwindigkeiten möglich**
- **hohe Genauigkeiten, hohe Steifigkeiten**

Nachteile:

- **hohe Investitionskosten**
- **kleiner Arbeitsraum**
- **komplizierte, aufwändige Mechanik**

PARALLELKINEMATIKEN FÜR HOCHGESCHWINDIGKEITSHANDHABUNG

ABB FlexPicker (Delta-Kinematik)

Adept Quattro

Quelle: ABB, Adept

DEFINITION VON DELTA-ROBOTERN

Delta-Roboter:

- **Spezielle Bauform der Parallelkinematiken**
- **typischerweise mit drei bis vier Gelenken als Bewegungsachsen mit stationären Antrieben**
- **Körperachsen der Arme sind als Parallelogramm ausgeführt, oft in Leichtbauweise (Faserverbundwerkstoffe)**
- **Greiferplattform immer parallel zur Grundplattform orientiert**
- **Durch die Möglichkeit, die Antriebe außerhalb der Armkinematik anzuordnen, haben diese Parallelkinematiken nur geringe bewegte Massen und können dadurch eine sehr hohe Geschwindigkeit und Dynamik erreichen**
- **Einsatz für schnelle Pick-and-Place-Aufgaben**

DELTA-ROBOTER

Einsatzbereiche:

- **Handling (z. B. Photovoltaikindustrie, Lebensmittelindustrie)**

Vorteile:

- **extrem hohe Beschleunigungen**
- **extrem hohe Geschwindigkeiten**

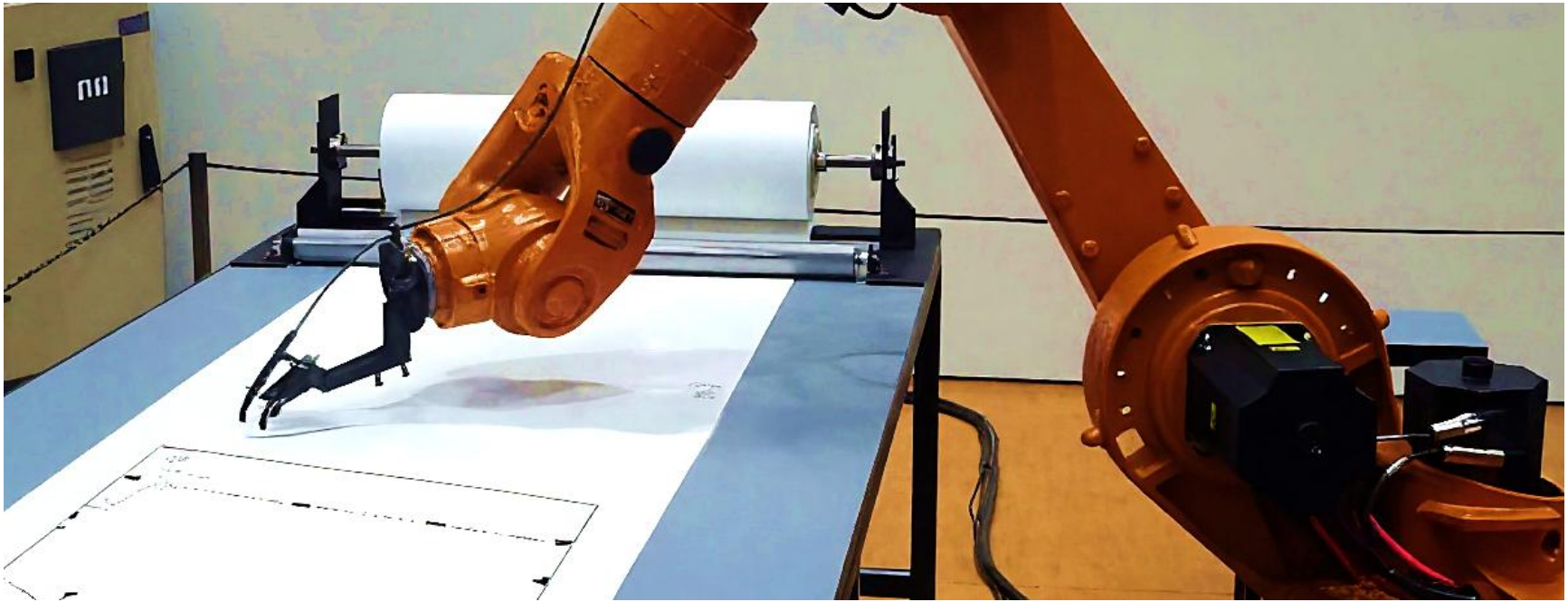
Nachteile:

- **geringe Traglast**
- **vergleichsweise hohe Investitionskosten**
- **kleiner Arbeitsraum, nur Überkopfmontage möglich**
- **nur 4 Freiheitsgrade**
- **hoher steuerungstechnischer Aufwand**

BEISPIEL: DELTA-ROBOTER

Quelle: Pick and Place Delta robot for sachet sorting

ÜBUNG



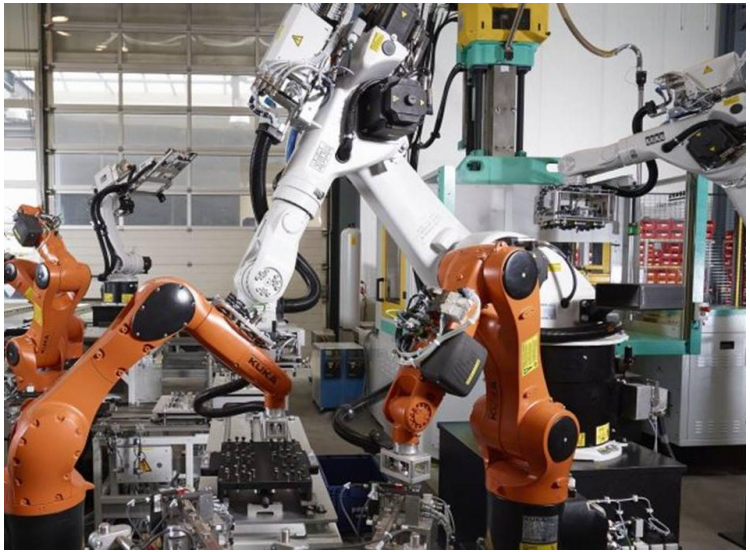
INHALT DER VORLESUNG

- Koordinatensysteme
- Achsdefinition
- Bewegungstypen
- Genauigkeit

TECHNISCHE AUSWAHLKRITERIEN FÜR ROBOTER (NACH DIN EN 29946)

Technische Auswahlkriterien für Roboter

- Achskonfiguration
- Reichweite
- Handhabungskapazität und zusätzliche Armlasten
- Maße, Masse und Montagemöglichkeit
- Steifigkeit
- Absolut- / Wiederhol- und Bahngenauigkeit
- Stabilisierungszeit
- Beschleunigung / Verfahrgeschwindigkeit
- Schutzklasse gegen Umwelteinflüsse
- Steuerungsmöglichkeiten und -optionen
- Kabelführung

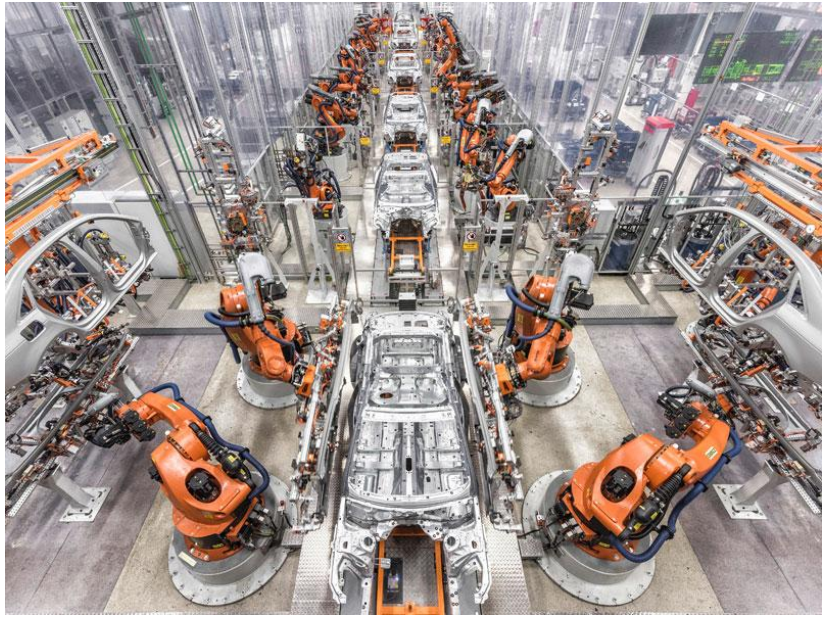


Quelle: Das Ensemble der Zukunft - KUKA AG

AUSWAHLKRITERIEN FÜR ROBOTERHERSTELLER

Auswahlkriterien für Roboterhersteller

- Erweiterbarkeit
- Anschaffungs- und Betriebskosten
- Schulungs- und Serviceangebot des Herstellers
- innerbetriebliche Vorgaben / Kundenwunsch



Quelle: In diesen Ländern arbeiten die meisten Roboter

ROBOTERGENAUIGKEIT

Quelle: Introducing GoFa™ Ultra Accuracy: When Precision Meets Perfection

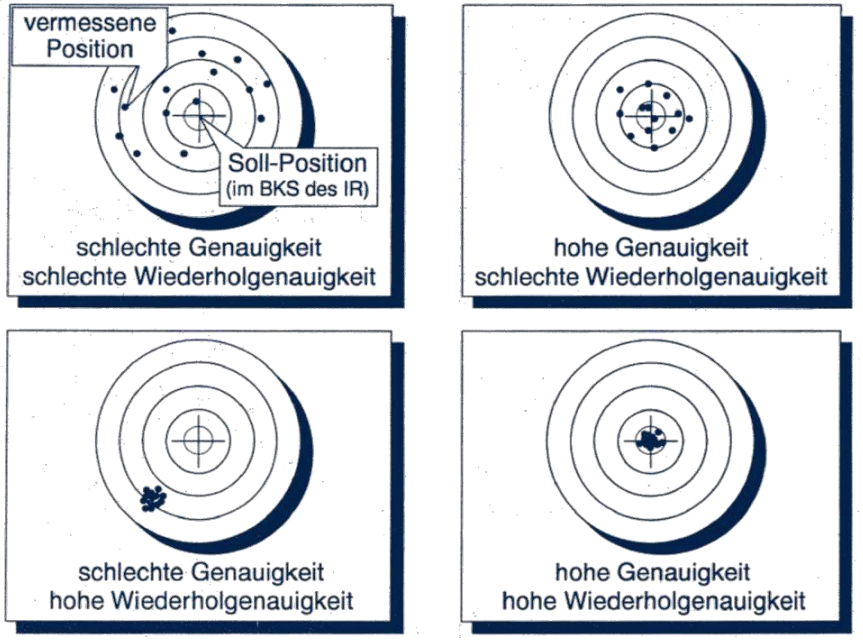
ROBOTERGENAUIGKEIT

Wiederholgenauigkeit:

- Durchschnittliche Abweichung zwischen den Istposen bei wiederholtem Anfahren einer Sollpose

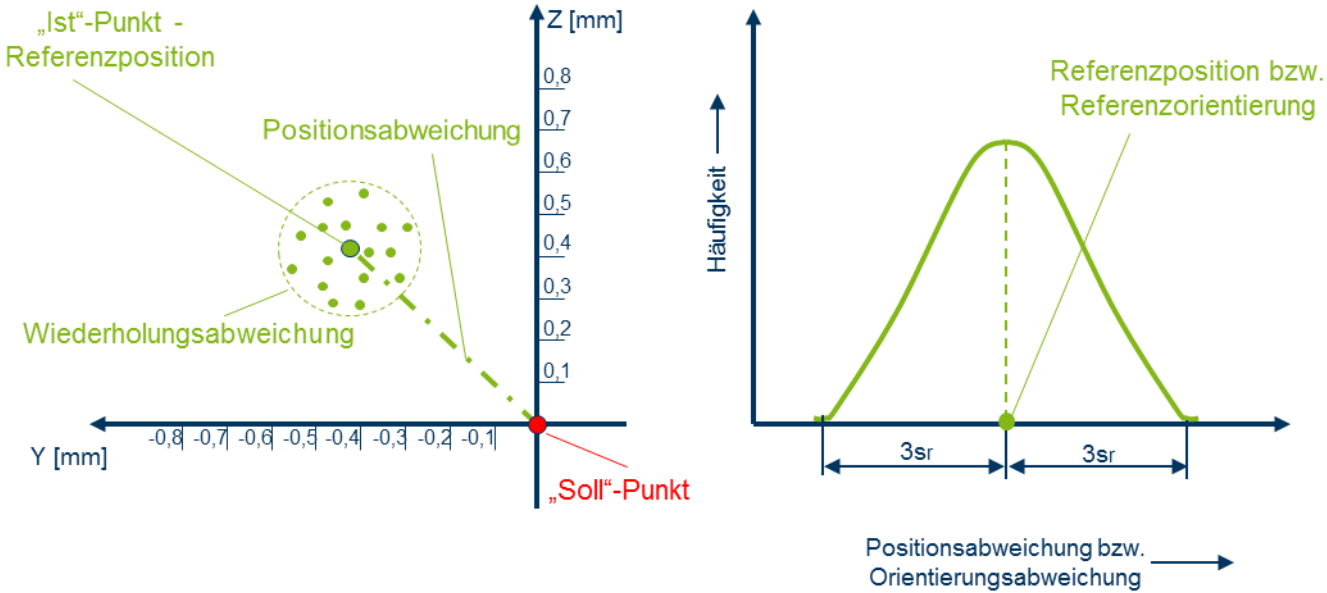
Absolutgenauigkeit:

- Abweichung zwischen der Sollpose und dem Mittelwert der Istposen bezogen auf das Basiskoordinatensystem (absolut)



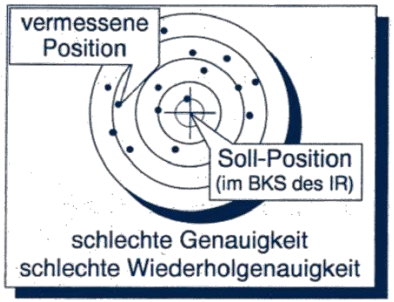
Quelle: Gossel, Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern

WIEDERHOL- UND POSITIONIERABWEICHUNG



Quelle: VDI 2861

WIEDERHOL- UND POSITIONSGENAUIGKEIT
HÄUFIGKEITSVERTEILUNG



Häufigkeitsverteilung

ERMITTLUNG WIEDERHOLGENAUIGKEIT/POSITIONIERGENAUIGKEIT

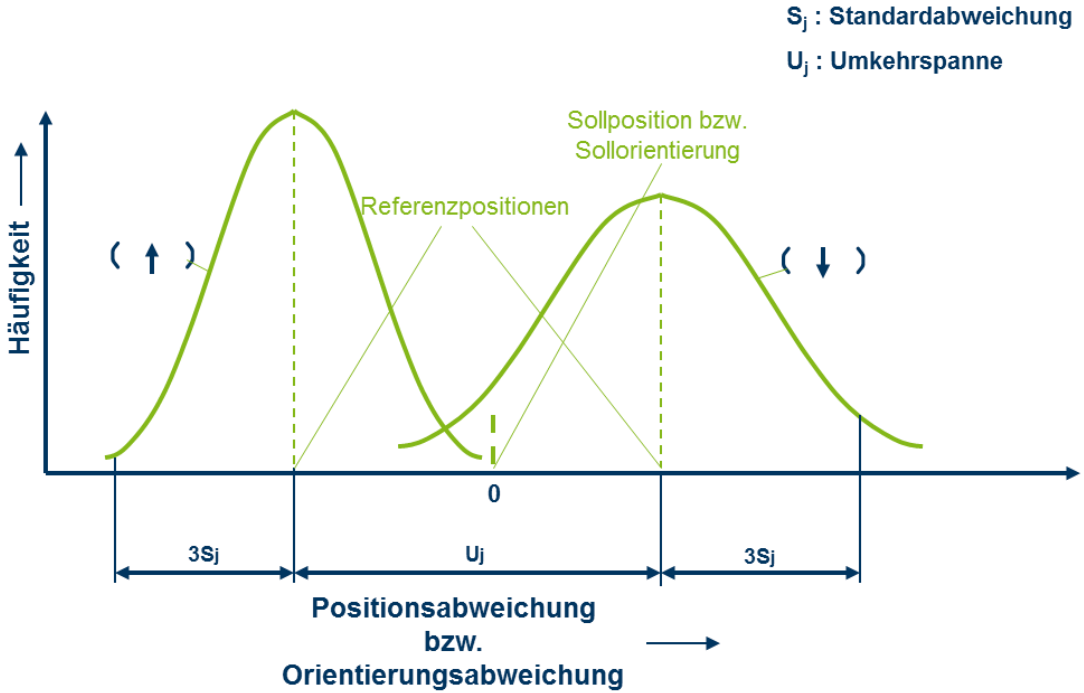
Wiederholgenauigkeit

- wiederholtes Anfahren eines Punktes
- Radius einer gedachten Kugel, in der 99,7% aller wiederholt angefahrenen Ist-Punkte liegen → Messung: aus unterschiedlichen Richtungen

Positioniergenauigkeit

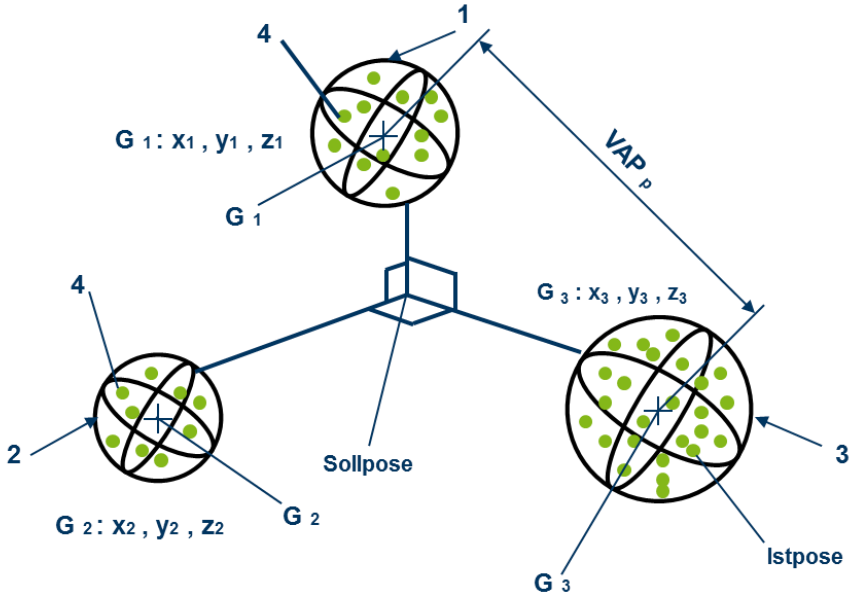
- Abstand zwischen Kugelmittelpunkt und Sollposition
- Ungenauigkeiten durch Konstruktionstoleranzen oder elastische Biegungen enthalten
- überschlägiger Faktor zw. Positionier- und Wiederholgenauigkeit: 10

WIEDERHOL- UND POSITIONIERABWEICHUNG
UMKEHRSPANNE



Quelle: VDI 2861

STREUUNG DER MEHRFACHRICHTUNGS-POSEGENAUIGKEIT



Indexierung: 1=Bahn 1; 2=Bahn 2; 3=Bahn 3
VAP_p : maximaler Abstand der Mehrfachrichtungspositionen G

Quelle: DIN EN ISO 9283

ERLÄUTERUNG

Begriffe aus DIN EN ISO 9283:

- **Streuung der Mehrfachrichtungspose-Genauigkeit vAP – drückt die Abweichung zwischen den verschiedenen mittleren Istposen aus, die sich ergibt, wenn dieselbe Sollpose n-mal aus drei orthogonalen Richtungen angefahren wird.**

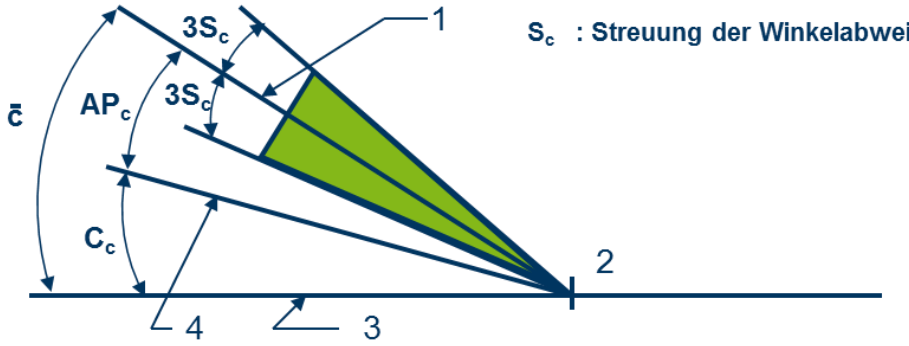
ORIENTIERUNGSGENAUIGKEIT UND WIEDERHOLGENAUIGKEIT

$\bar{c}$: Referenzwinkel bezüglich der C-Achse

C_c : Sollwinkel bezüglich der C-Achse

AP_c: mittlere Winkelabweichung (C-Achse)

S_c : Streuung der Winkelabweichungen



ANMERKUNG: Das gleiche Bild kann für $\bar{b}$ und $\bar{a}$ angewendet werden

1 Mittelwert der ist Orientierung
2 virtueller Projektionspunkt unterschiedlicher Position
3 Koordinatensystem
4 Sollorientierung

Quelle: DIN EN ISO 9283

ERLÄUTERUNG

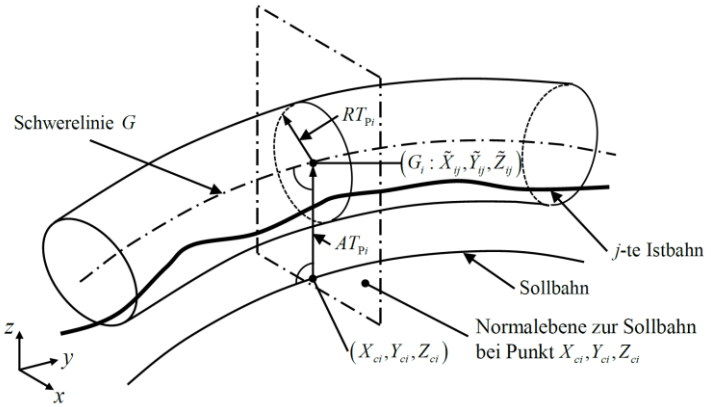
Begriffe aus VDI 2861:

- **Die Positionsstreubreite P_S / Orientierungsstreubreite O_S beschreibt die Auswirkung zufälliger Abweichungen von der Sollposition / Sollorientierung. Sie wird aus der Häufigkeitsverteilung der Positionsmesswerte / Orientierungsmesswerte (Grafik vorherige Folie) mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit bei positiver (Pfeil rauf) und negativer (Pfeil runter) Anfahrrichtung ermittelt.**
- **Die mittlere Positions- bzw. Orientierungsstreubreite ist der arithmetische Mittelwert der Positions- bzw. Orientierungsstreubreiten in alle Koordinatenrichtungen.**
- **Die Umkehrspanne U ist die Differenz, die sich aus den Mittelwerten der Messwerte beider Anfahrrichtungen für jede Position bzw. Orientierung ergibt. Die Unterscheidung erfolgt aus der Dimension (mm oder ° bzw. Radiant)**

BAHNGENAUIGKEIT NACH ISO 9283

- Bahngenauigkeit beschreibt, wie exakt ein Roboter entlang einer gewünschten Trajektorie (z. B. einer Kurve oder Linie) fährt.
- Besonders wichtig bei Anwendungen wie Laserschneiden, Lackieren oder 3D-Druck
- Abfahren einer definierten Bahn und Messung der Ist- zu Soll-Bahn, mit n=10 – 30 Wiederholungen

- AT_{Pi} → Bahngenauigkeit
- RT_{Pi} → Bahnwiederholgenauigkeit



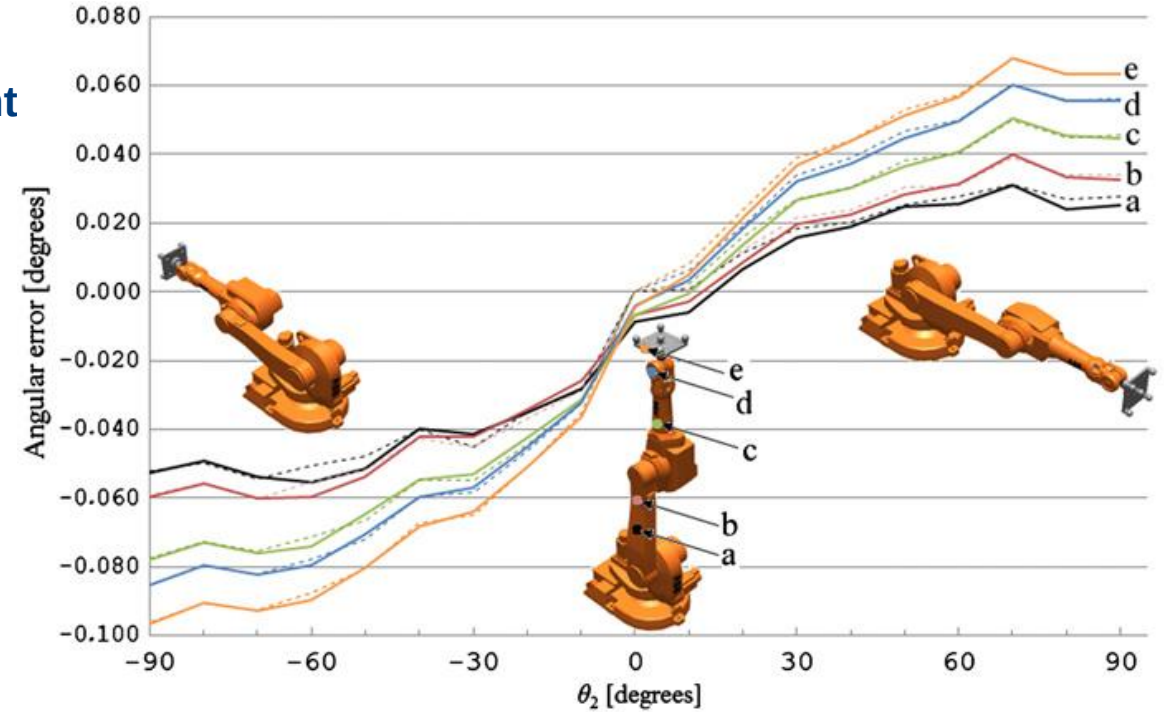
ERLÄUTERUNGEN

Begriffe aus VDI 2861:

- **Wiederholgenauigkeit (Position und Orientierung) gibt an, wie genau eine Position oder Orientierung bei Nennlast erreicht werden kann. Sie wird im wesentlichen durch die Größen „mittlere Positionsstreubreite“, „mittlere Orientierungsstreubreite“ und „mittlere Umkehrspanne“ beschrieben.**
- **Wiederholgenauigkeit (Bahn) gibt an, mit welcher Genauigkeit programmierte Bahnkurven bei Nennlast nachgefahren werden können. Charakteristische Größen sind der „mittlere Bahnabstand“, der „mittlere Bahnstreubereich“ sowie beim Fahren einer graden Bahn die „mittlere Bahn-Orientierungsabweichung“ und der „mittlere Bahn-Orientierungsstreubereich“, beim Fahren einer rechtwinkligen Ecke der „mittlere Eckenfehler“ und der „mittlere Überschwingfehler“**

STEIFIGKEIT EINES AUSGESTRECKTEN ROBOTERARMS

- **Beispiel: IRB 1600, Handhabungsgewicht 1,85 kg**



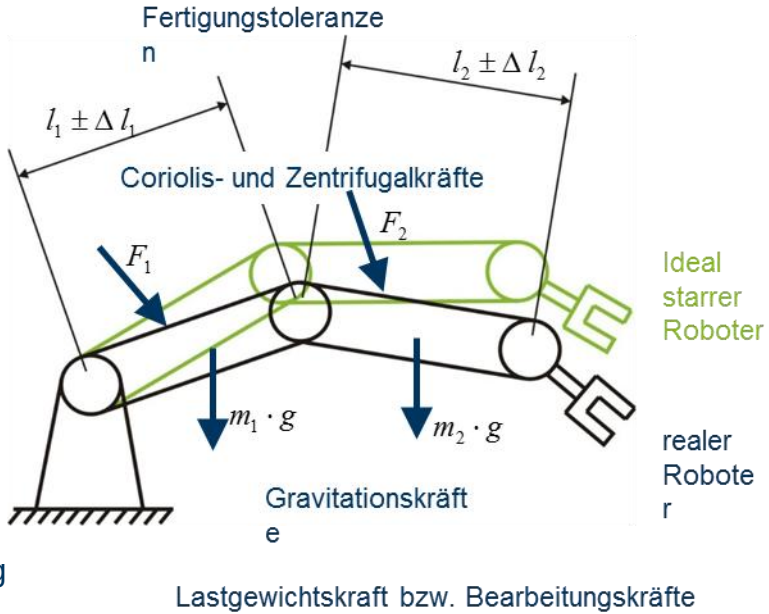
Quelle: Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker - ScienceDirect

GRÜNDE FÜR UNGENAUIGKEITEN

Armglieder:
- Elastische Verformung
- Fertigungstoleranzen

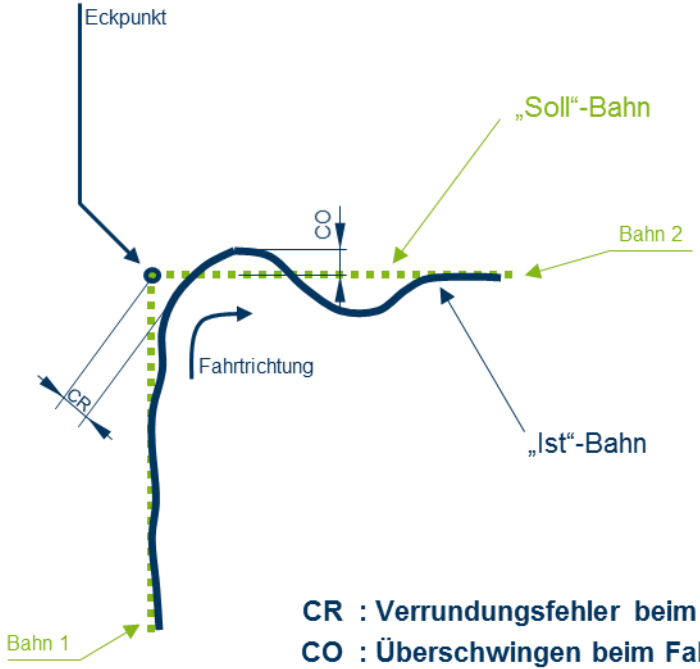
Gelenke:
- Elast. Nachgiebigkeit
- Viskose Reibung
- Stick-Slip-Effekt
- Getriebespiel
- Fertigungstoleranzen

Steuerung / Pfadplanung



Quelle: irpa

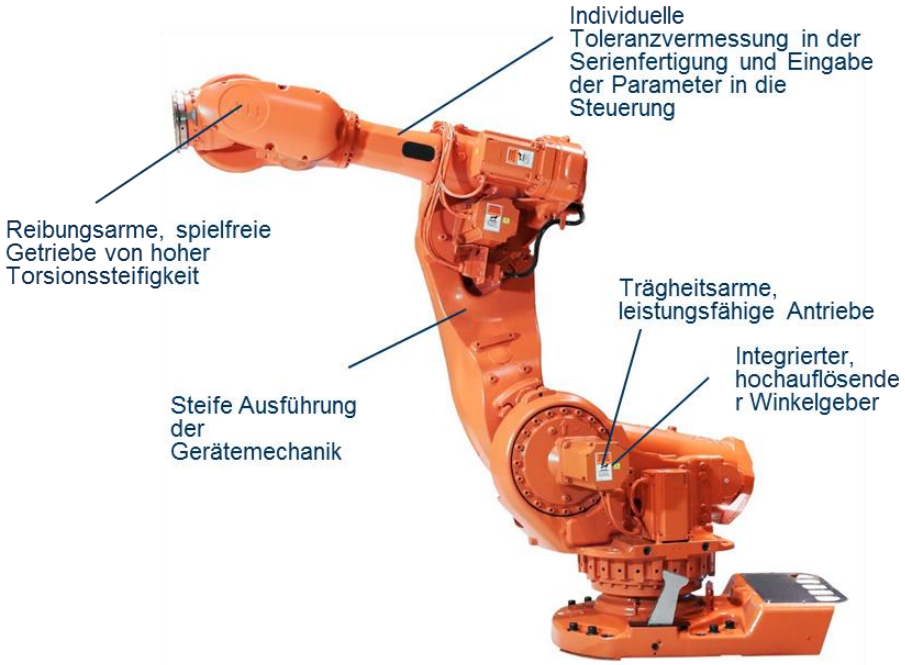
ÜBERSCHWINGEN UND VERRUNDUNGSFEHLER

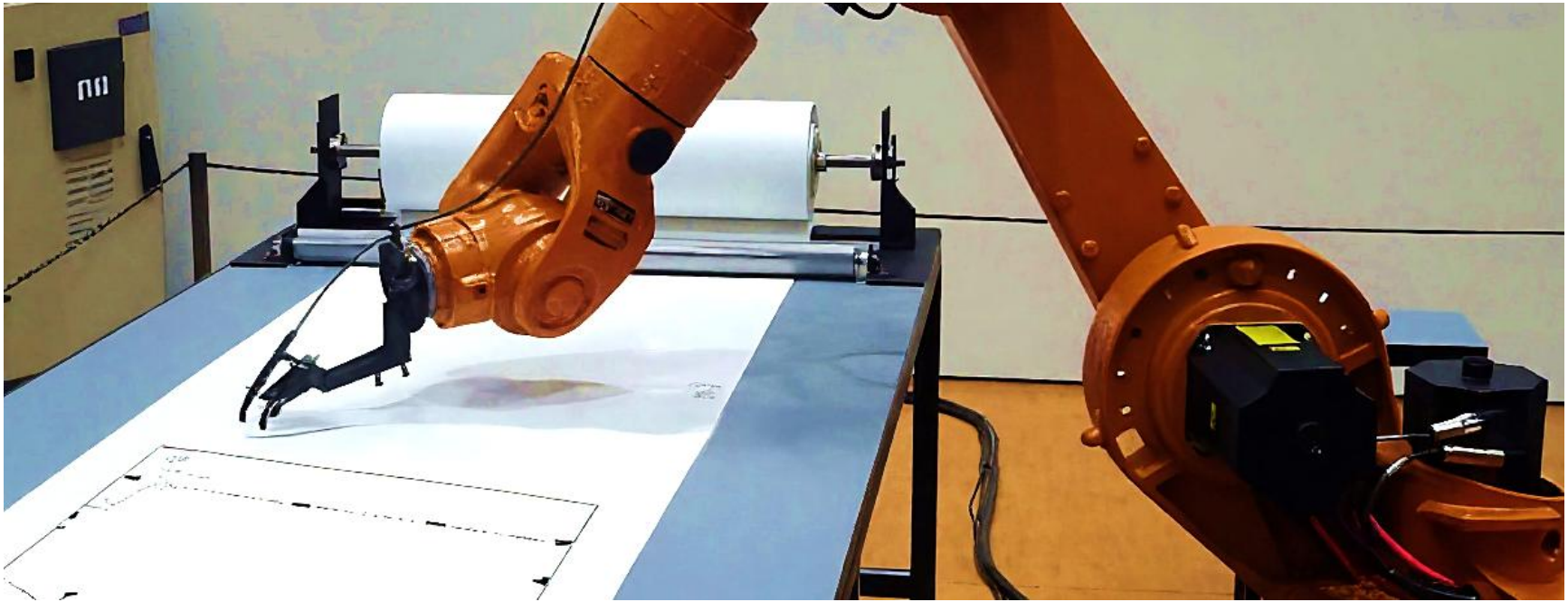


CR : Verrundungsfehler beim Fahren einer Ecke
CO : Überschwingen beim Fahren einer Ecke

Quelle: DIN EN ISO 9283

KONSTRUKTIVE MAßNAHMEN ZUR VERBESSERUNG



Quelle: ABB

ÜBUNG