



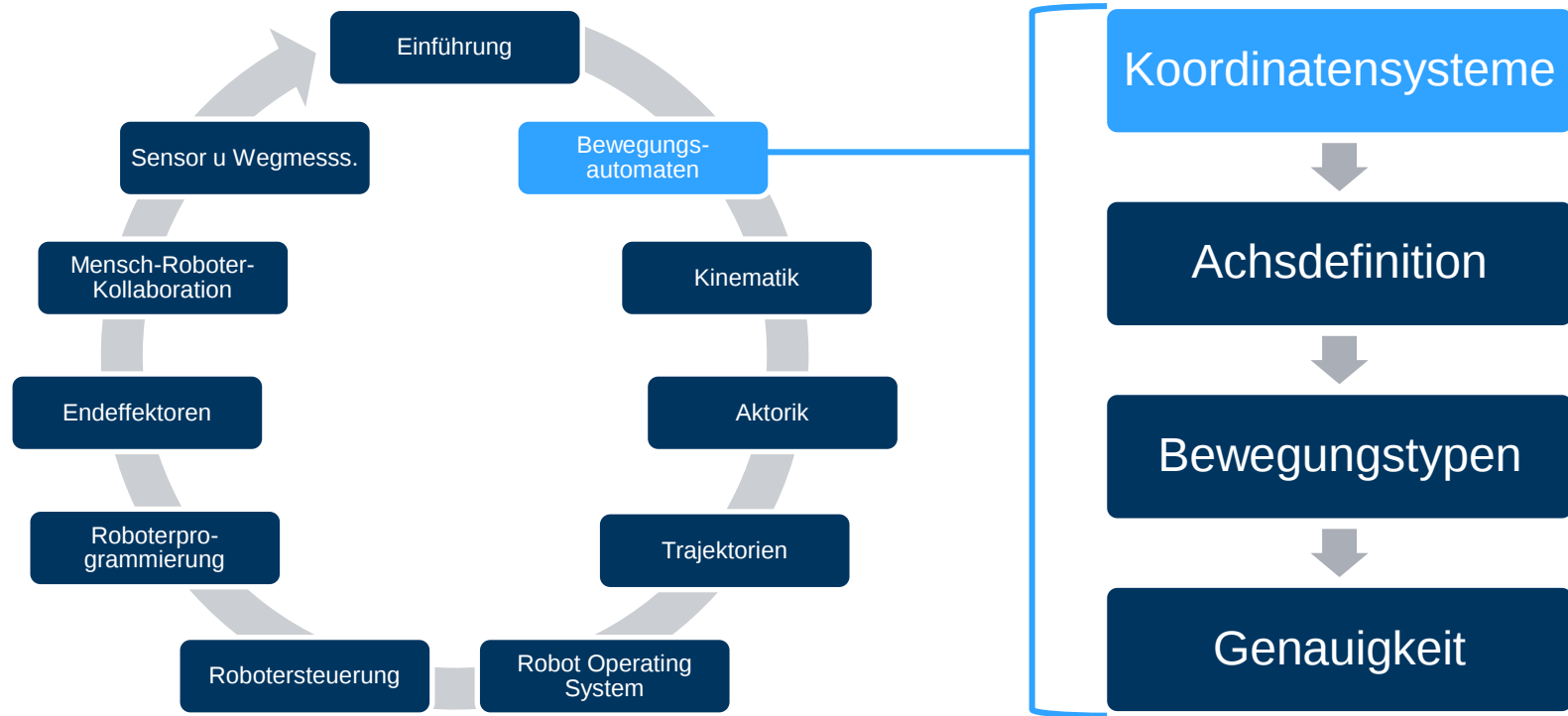
Technische Hochschule Georg Agricola

VORLESUNG - ROBOTIK

BEWEGUNGSAUTOMATEN

01.10.2025 Bochum

Dr.-Ing. Lars N. Josler





■ 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

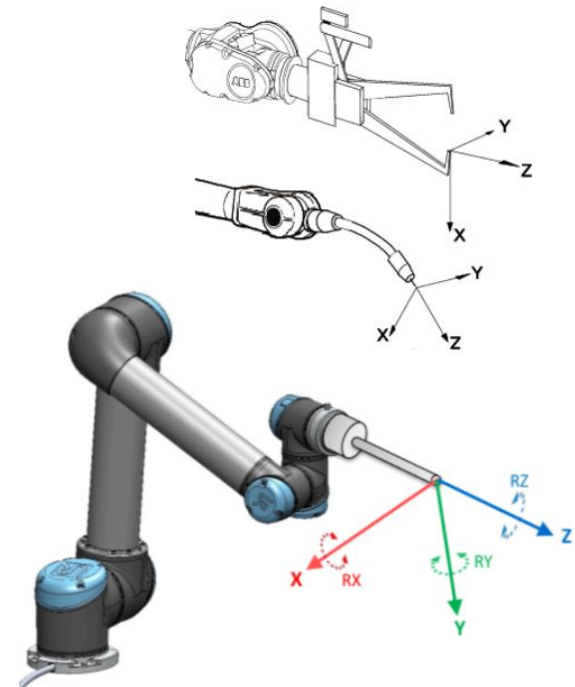
- Gibt den Bezug des Koordinatensystems im Roboterflansch zum Basiskoordinatensystem im Fuß des Roboters an
- Beinhaltet Position und Orientierung
- Nicht immer eindeutig bezüglich Gelenkkonfiguration

■ Kinematik

- Beschreibt die Pose, Geschwindigkeit und Beschleunigung

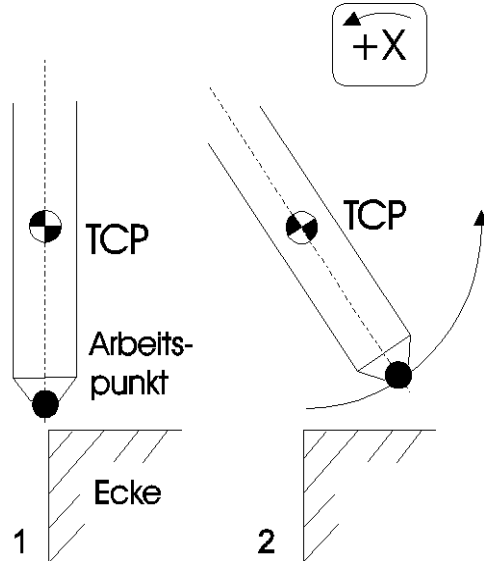
■ Dynamik

- Beschreibt Kräfte und Drehmomente



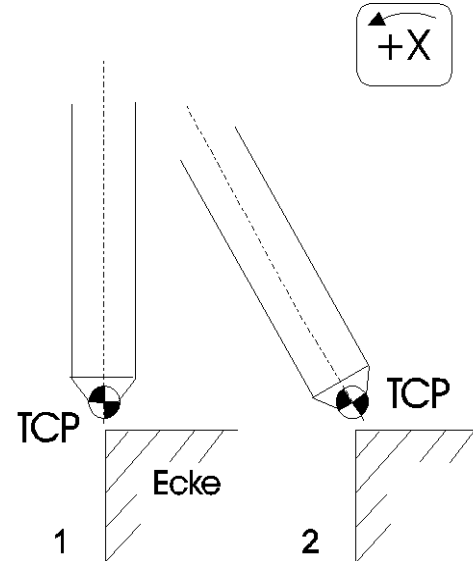
Quelle: universal-robots

FEHLERHAFTER 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



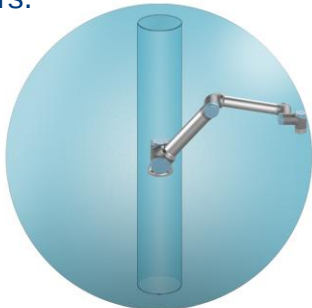
Freiheitsgrad, (DoF, degree of *freedom*)

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 Freiheitsgraden (3 translatorisch und 3 Rotatorisch) Besteht aus 6 Drehgelenken

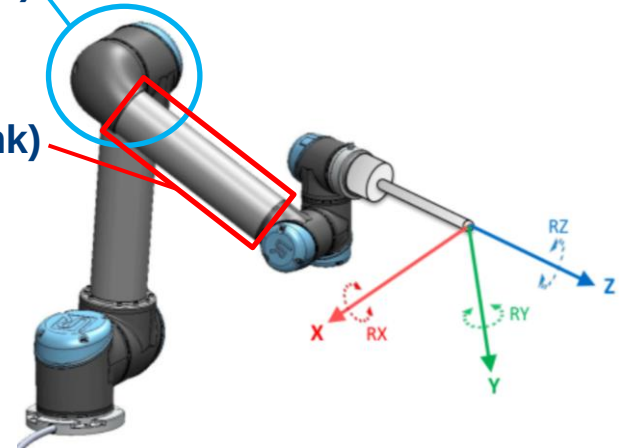
Arbeitsraum, (work space)

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.



Gelenk (joint)

Glied (link)

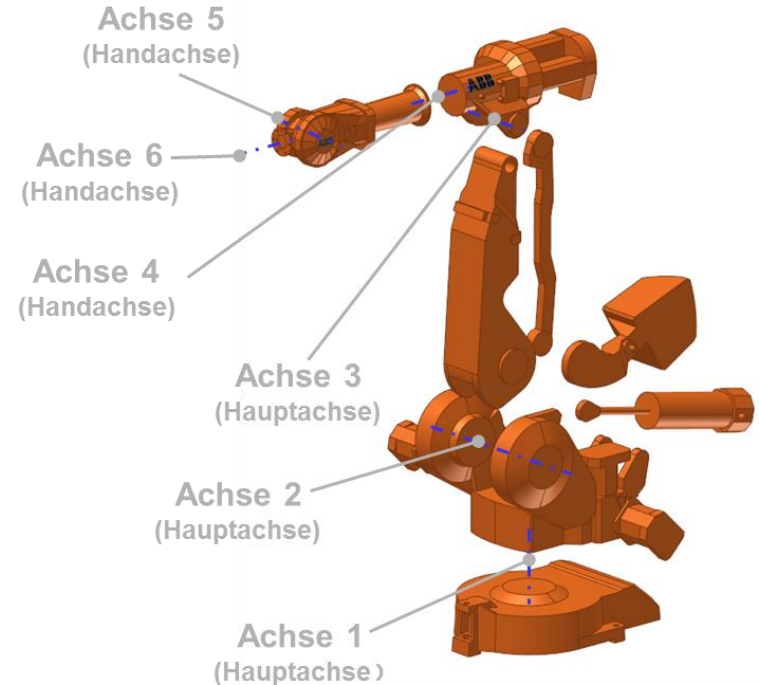


Quelle: universal-robots

DEFINITION DER ACHSEN EINES INDUSTRIEROBOTERS



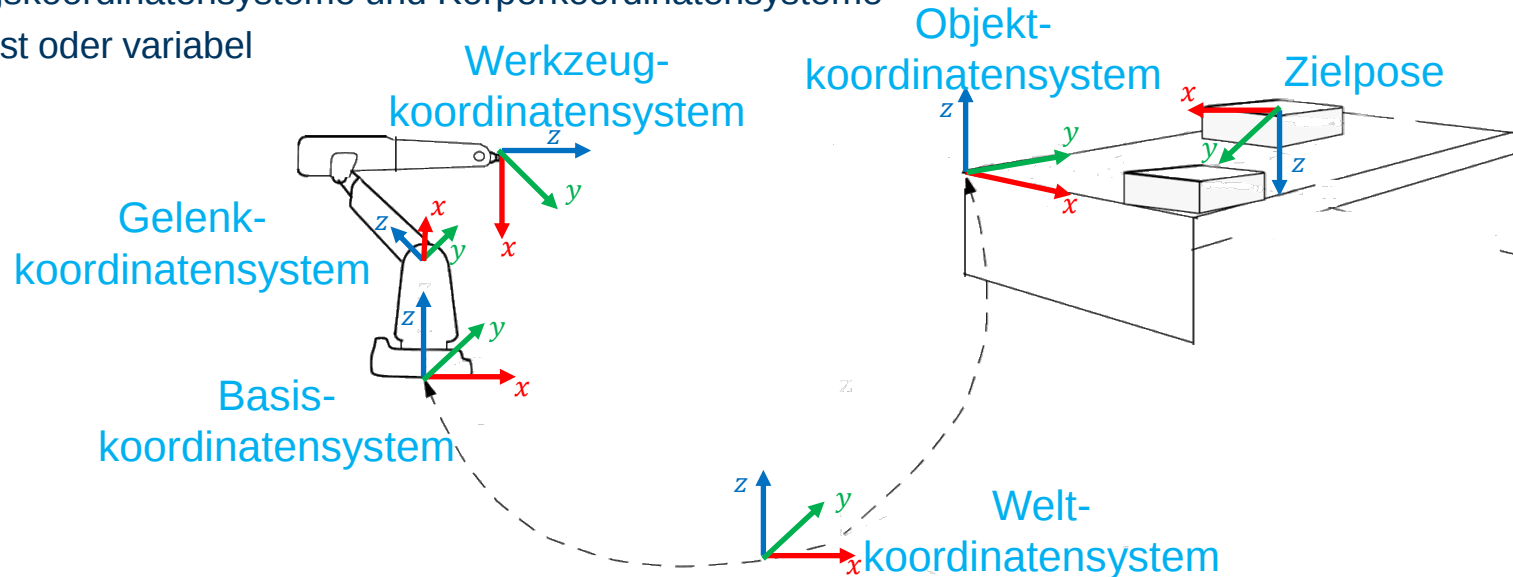
- **Achsen** sind geführte, unabhängig voneinander angetriebene Glieder. Entsprechend der Führung unterscheidet man rotatorische Achsen (Drehachsen) und translatorische (linear) Achsen.
- Bei **Industrierobotern** dienen diese zur Erzeugung definierter Bewegungen zum Positionieren und Orientieren von 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.

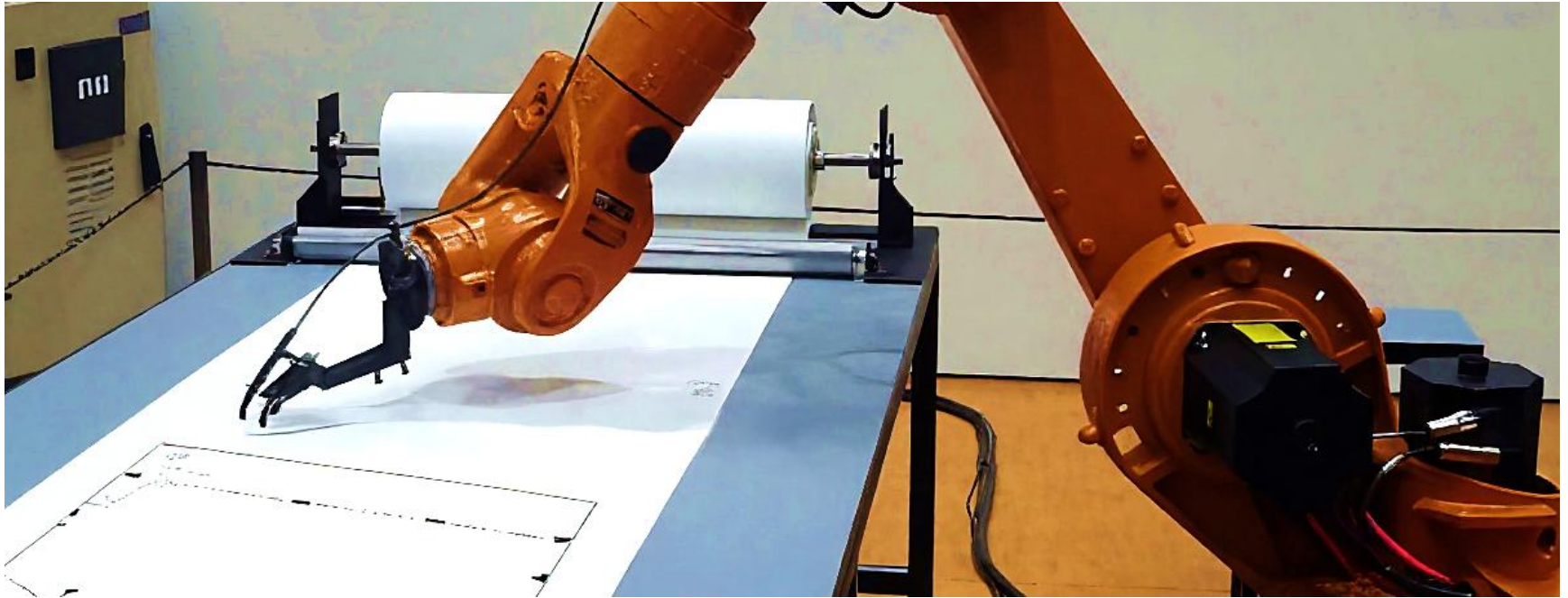


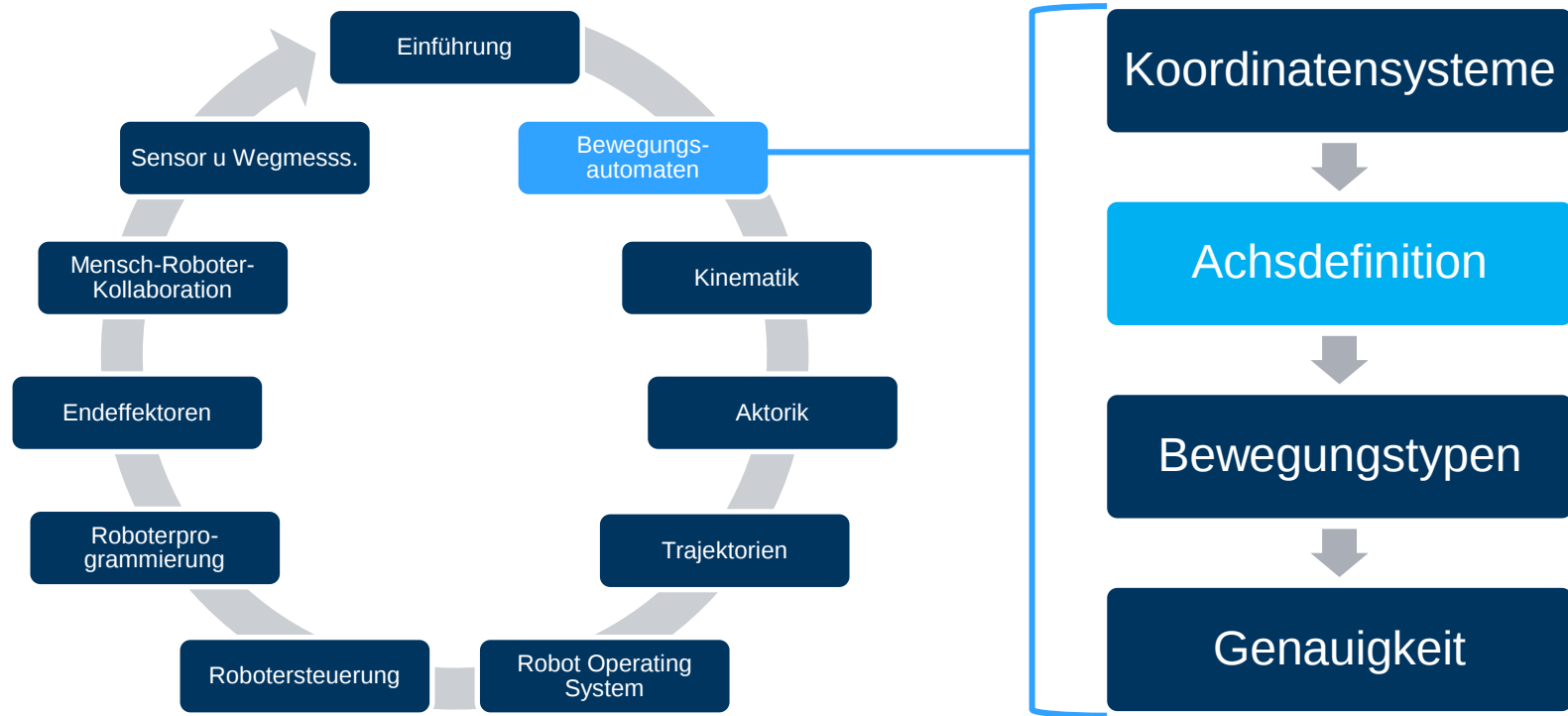
Quellen: VDI 2861 und ABB



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







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

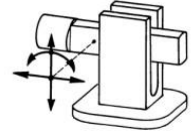
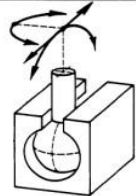
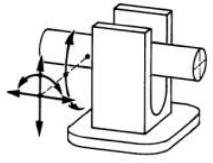
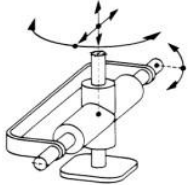
S = Schiebung

W = Windung

Index = Anzahl der Bewegungsformen

AUSWAHL VERSCHIEDENER GELENKE NACH VDI 2156 (II)



f = 3			
	D ₃ Kugelgelenk	DS ₂ Plattengelenk	D ₂ S Kugelrillengelenk
f = 4			
	D ₂ S ₂ Zylinderflächengelenk	D ₃ S Kugelrohrgelenk	D ₂ S ₂ Doppeldreh Schubgelenk
f = 5			
	D ₃ S ₂ Kugelflächengelenk		

D = Drehung

S = Schiebung

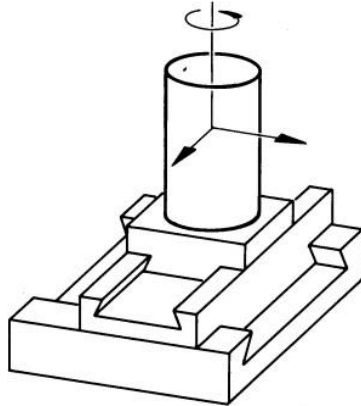
W = Windung

Index = Anzahl der Bewegungsformen

EBENE, SPHÄRISCHE UND RÄUMLICHE BEWEGUNG

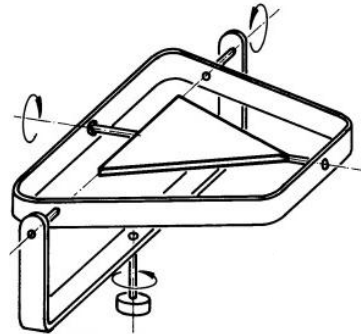


**Ebene
Bewegung**



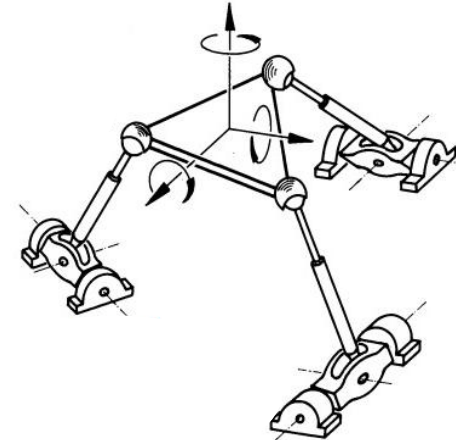
$$\begin{array}{rcl} F_{trans} & = & 2 \\ F_{rot} & = & 1 \\ \hline F_{eben} & = & 3 \end{array}$$

**Sphärische
Bewegung**



$$\begin{array}{rcl} F_{trans} & = & 0 \\ F_{rot} & = & 3 \\ \hline F_{sphär} & = & 3 \end{array}$$

**Räumliche
Bewegung**



$$\begin{array}{rcl} F_{trans} & = & 3 \\ F_{rot} & = & 3 \\ \hline F_{raum} & = & 6 \end{array}$$

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



Animation
Zahnriemenachse

Linearachse



Quelle: Festo AG

PORTALROBOTER



Baukastensystem zur
Konfiguration von
Bewegungsautomaten
durch Kombination von
Linearachsen



Quelle: Bosch Rexroth



Animation
Spindelachse

Linearachse



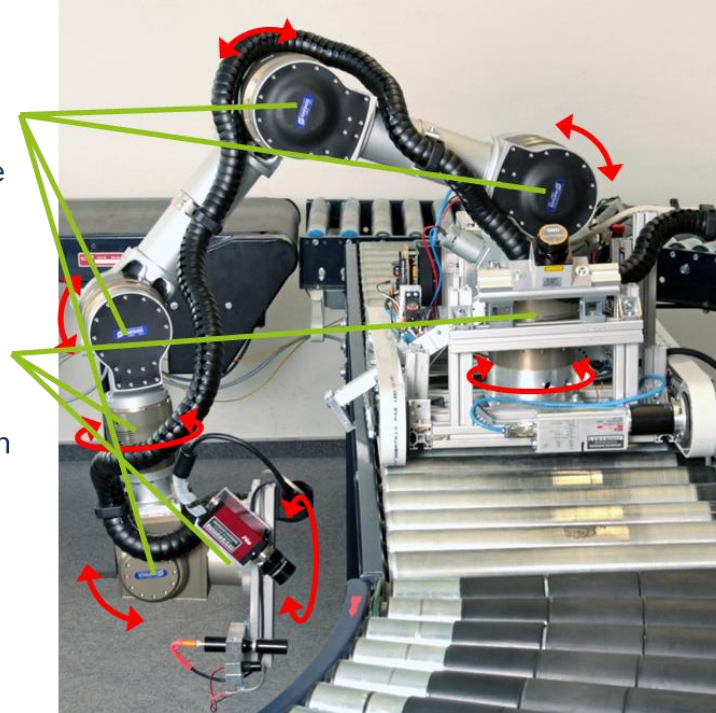
Quelle: Festo AG



Nicht fluchtende
Rotationsachse



Fluchtende
Rotationsachsen





Teleskopachsen



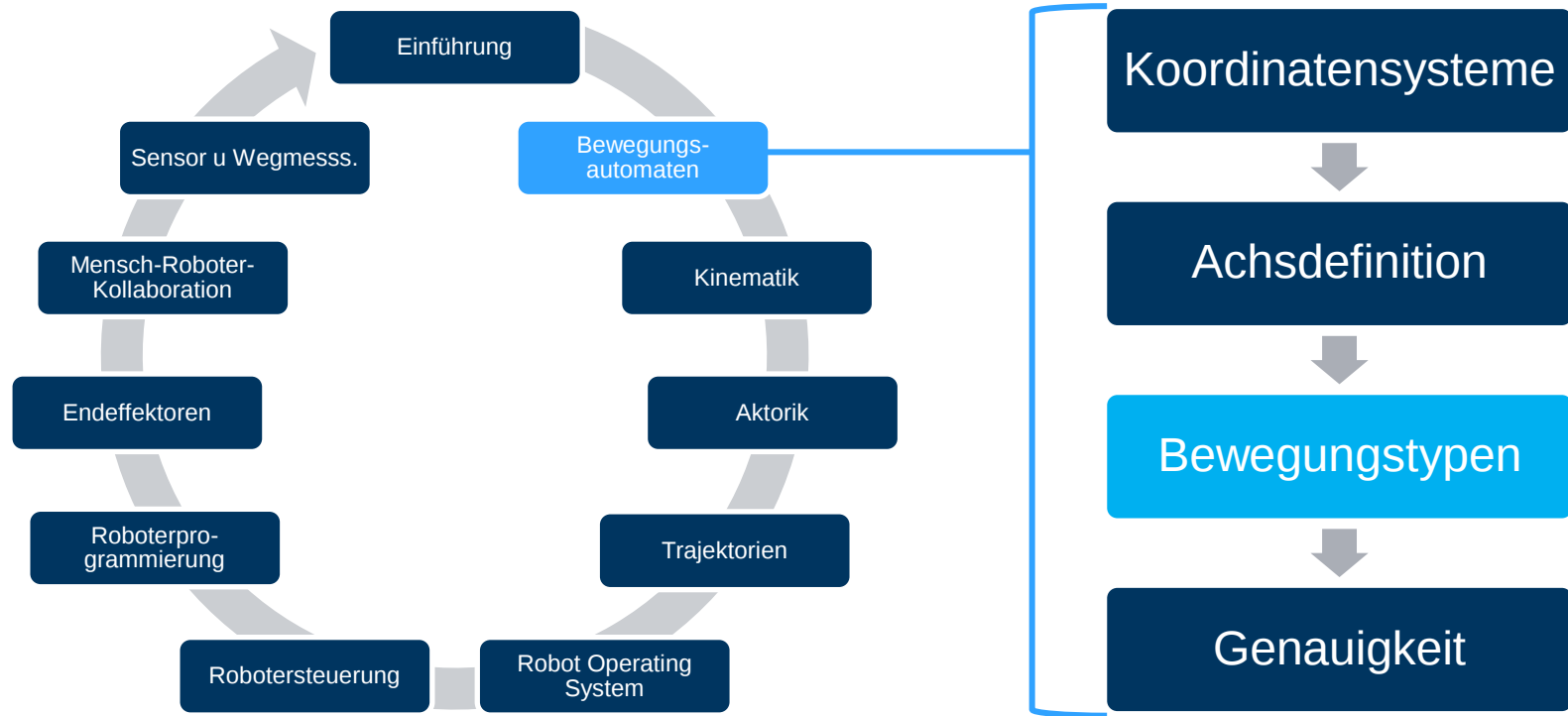
Verfahrachse



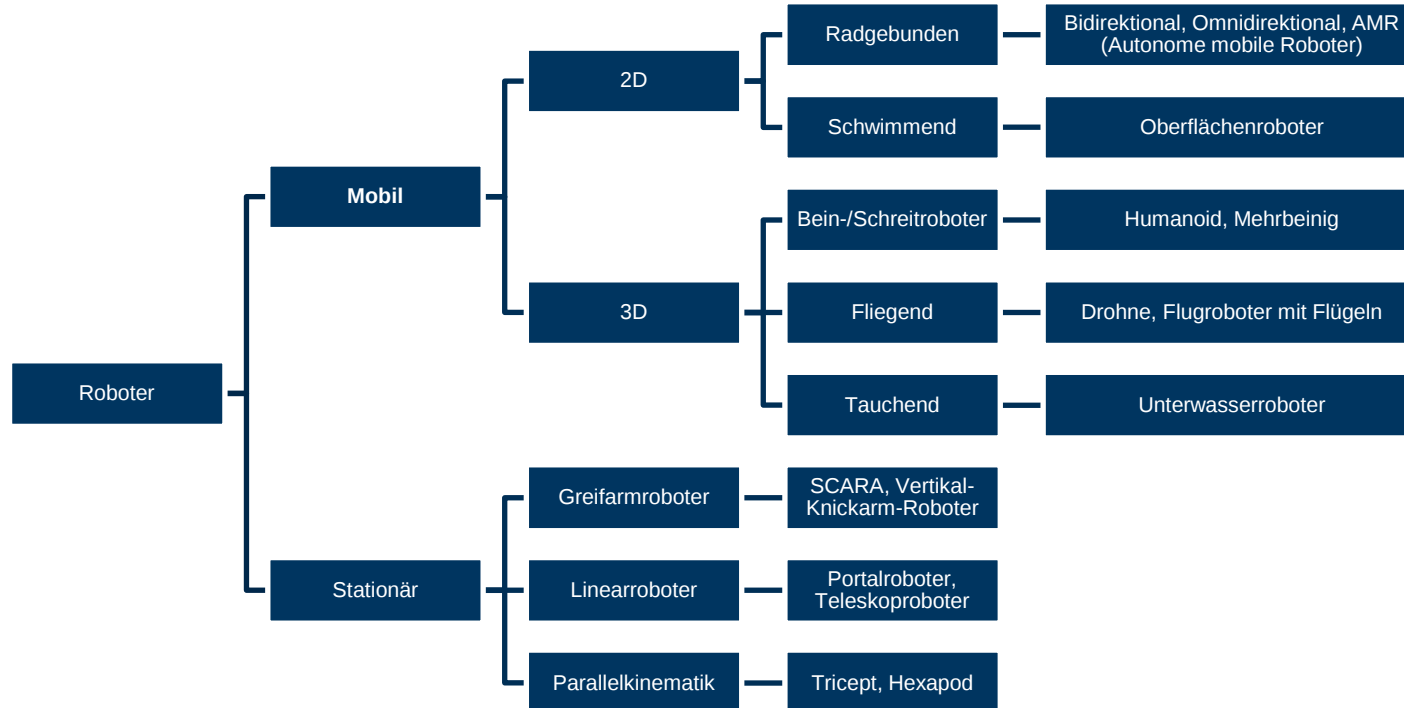
Quelle: Festo AG

Quelle: www.wittenstein.de

VORLESUNGSIHALTE



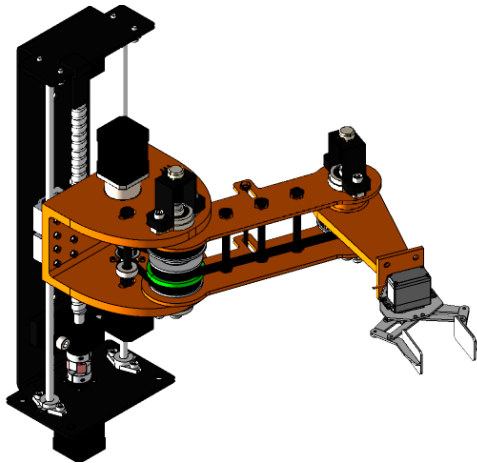
BEWEGUNGSTYPEN



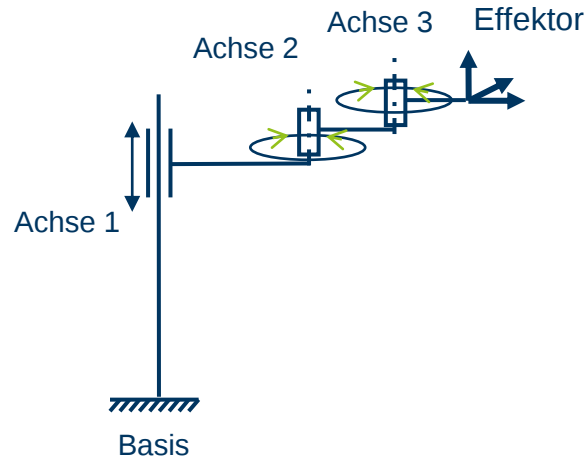
KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - TRR



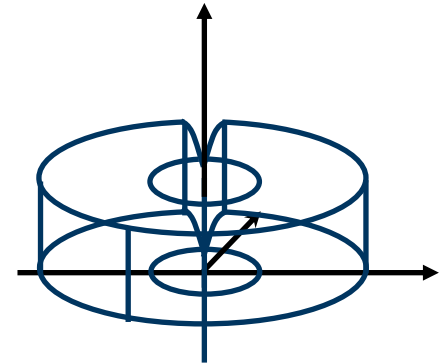
Beschreibung: Horizontal articulated arm Appliance



Konfiguration



Kinematik

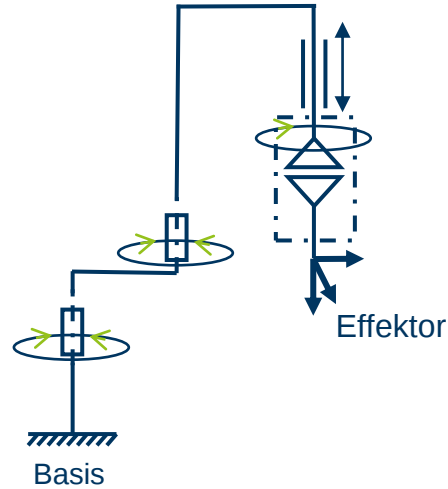


Arbeitsraum

SCARA-ROBOTER



Bauart



Kinematik

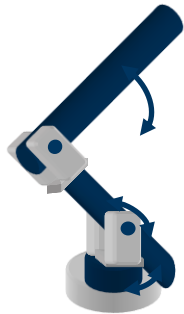


Arbeitsraum

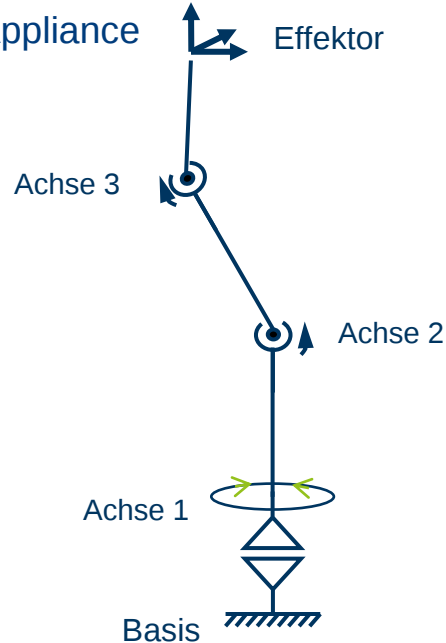
KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - RRR



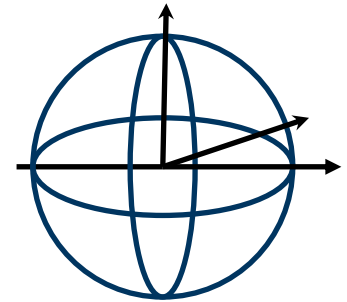
Beschreibung: Vertical articulated arm Appliance



Konfiguration



Kinematik



Arbeitsraum

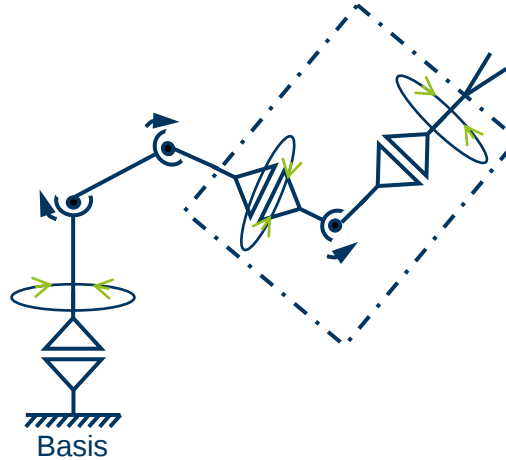
VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER



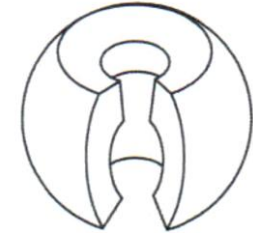
Beschreibung: Horizontal articulated arm Appliance



Bauart



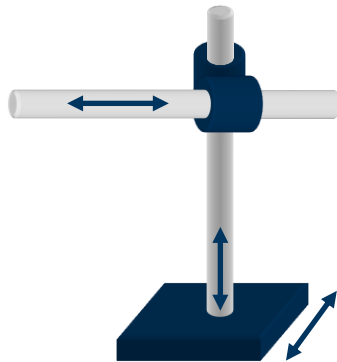
Kinematik



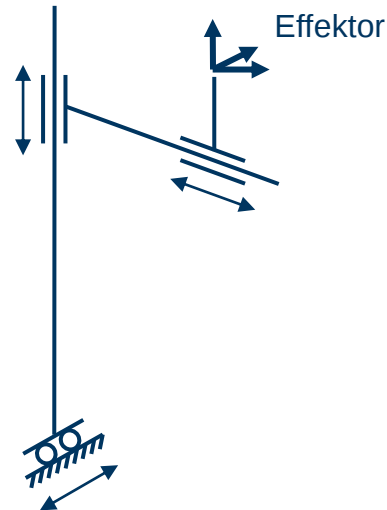
Arbeitsraum



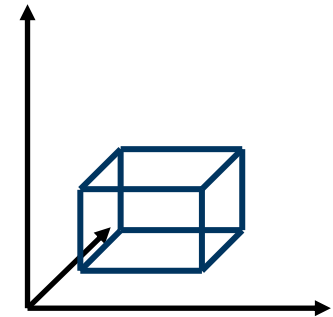
Beschreibung: Kartesische Koordinaten



Konfiguration

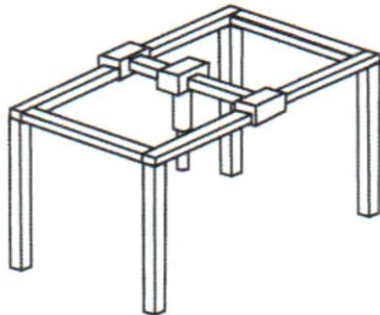


Kinematik

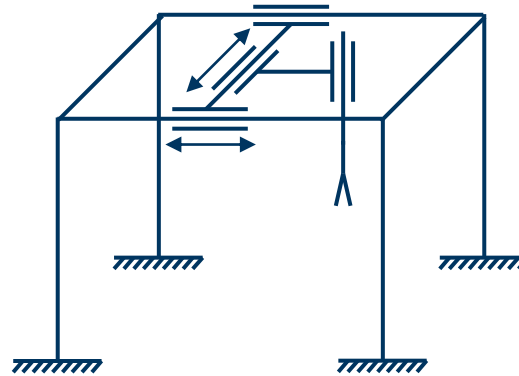


Arbeitsraum

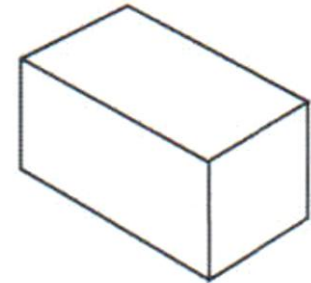
PORTALROBOTER



Konfiguration



Kinematik

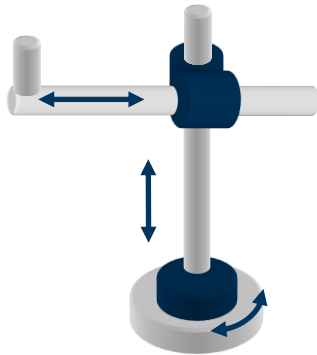


Arbeitsraum

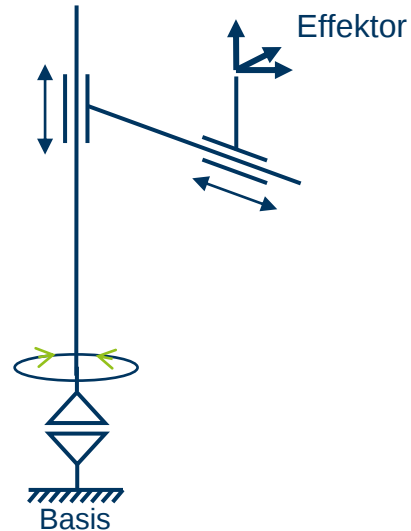
Quelle: Fa. Ro-bor, Wolf



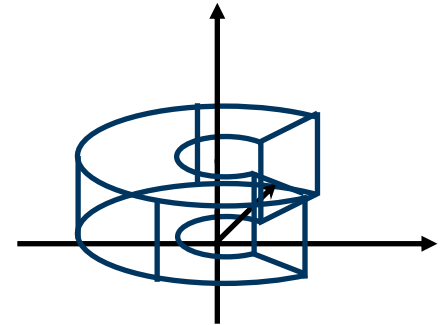
Beschreibung: Zylinder-koordinaten



Konfiguration



Kinematik



Arbeitsraum

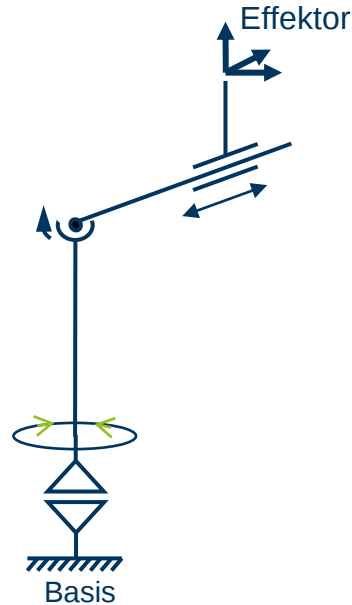
KOMBINATION VON ACHSEN/ARBEITSRAUM - RRT



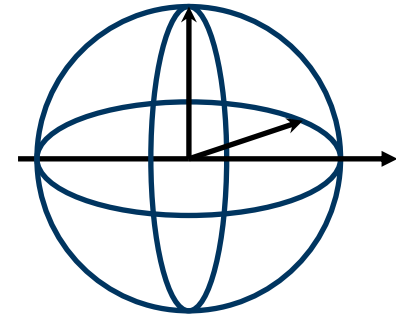
Beschreibung: Sphärische Koordinaten



Konfiguration

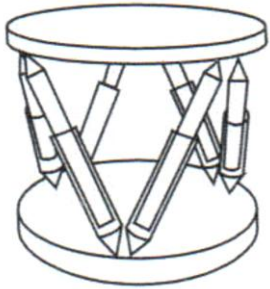


Kinematik

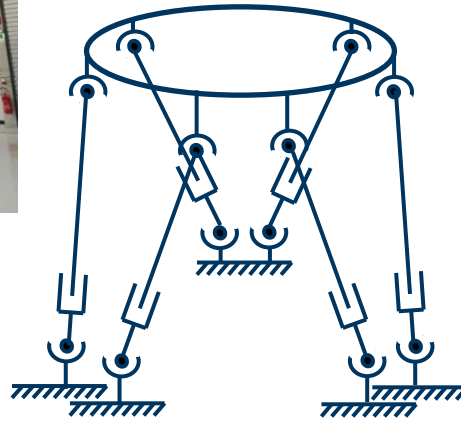


Arbeitsraum

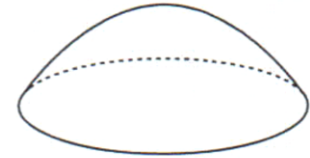
SONSTIGE KINEMATIKEN: PARALLELKINEMATIK



Bauart

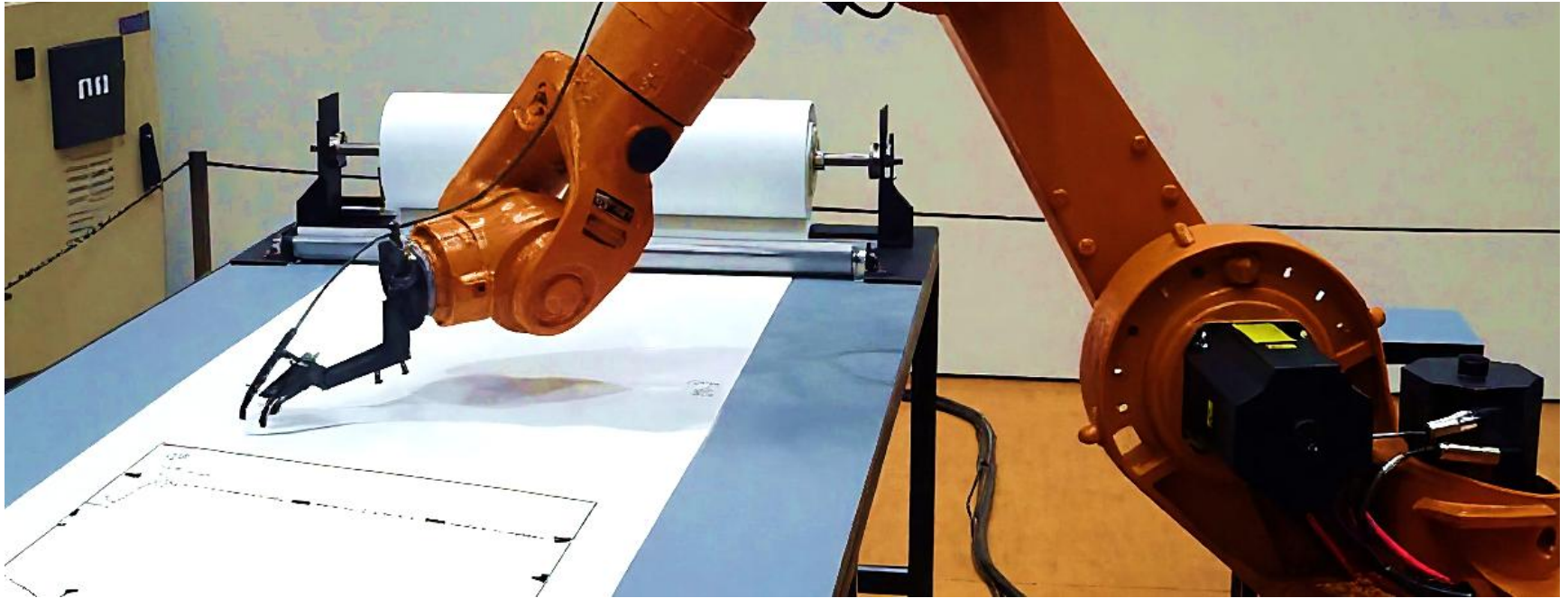


Kinematik



Arbeitsraum

Quellen: Lufthansa Flight Training, Wolf, way2fly



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



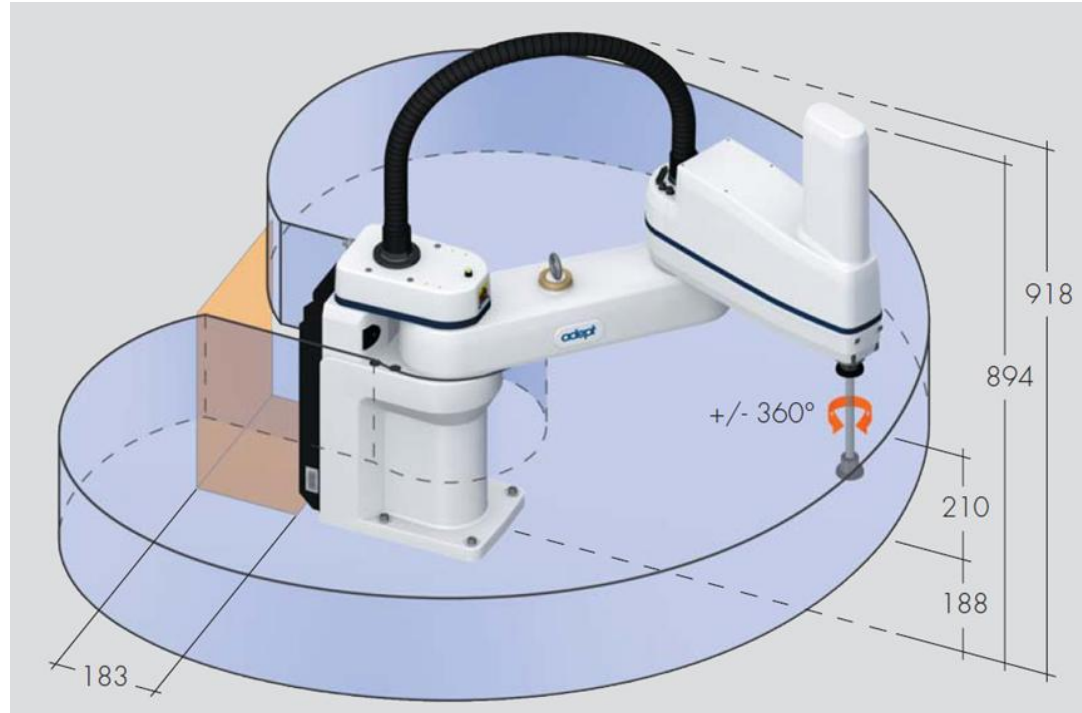
Quelle: Fanuc, Framka Emika



Reichweite und
Arbeitsraum
des Adept
Cobra i800:

Arbeitsraum:
Radius 800 mm
Innere Begrenzung
Radius 164 mm

Höhe 210 mm
Empfohlener
Wandabstand



Quelle: Adept



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



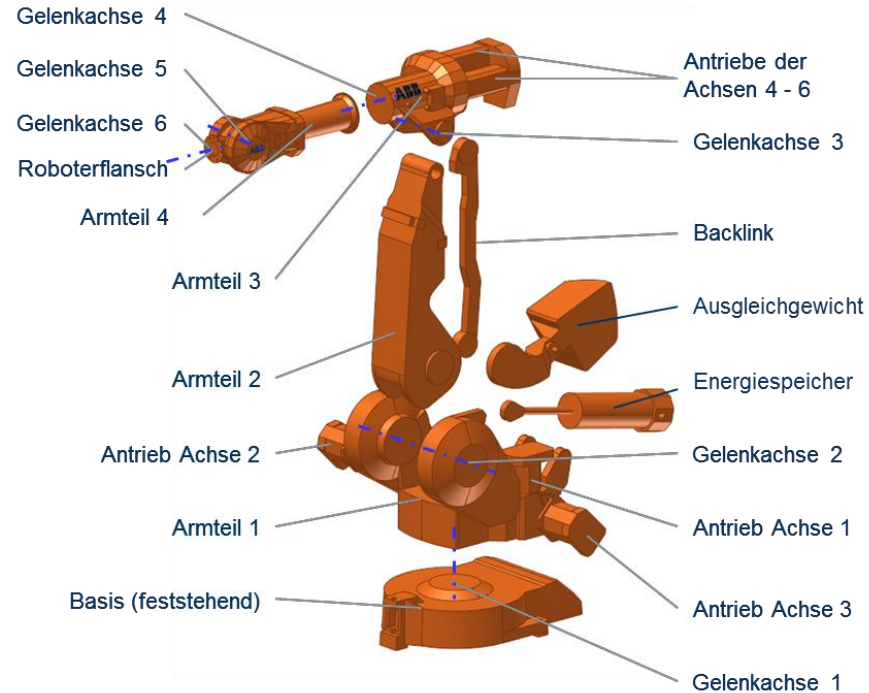
Animation

Komponenten eines
Vertikal-Knickarm-
Roboters



Source: ABB

KOMPONENTEN EINES ROBOTERS

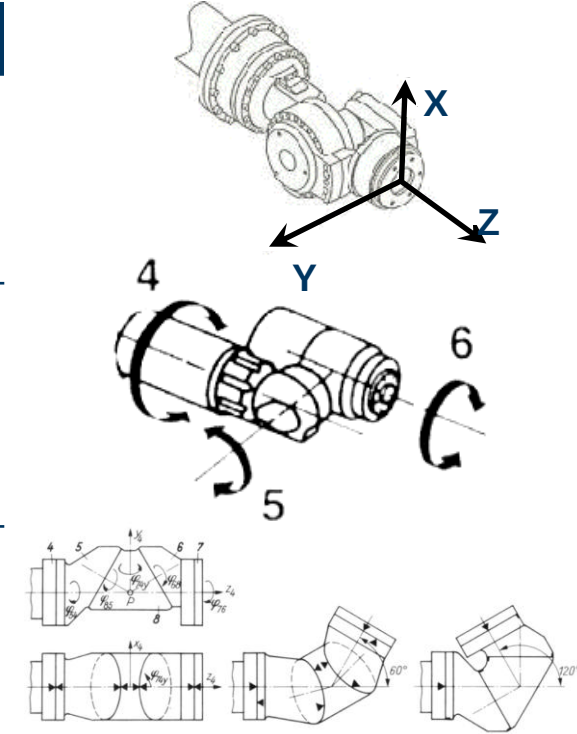


Source: ABB

HANDGELENKE



	Art	Vorteile	Nachteile
	Zentralhand	▪ Kompakter Bauraum ▪ Günstige Störkontur ▪ Kostengünstig	▪ Entstehung einer Singularität bei Parallelstellung von Achse 4 und 6
	Winkelhand	▪ Einfacher Aufbau	▪ Bauraum der 6. Achse ▪ Schlechte Störkontur ▪ Aufwändige Kabelführung der 6. Achse
	Doppelwinkelhand	▪ Flexibel beweglich ▪ Kompakte Bauform	▪ Komplexer Aufbau ▪ Störanfällig ▪ Teuer



Quelle: SME Robot, KUKA

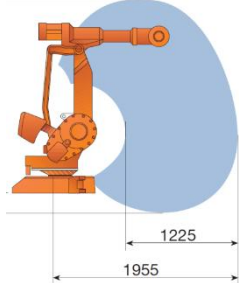
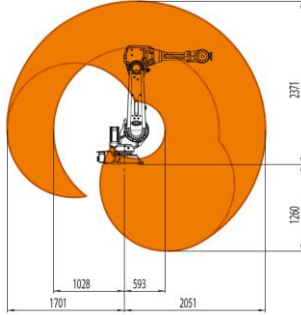
SINGULARITÄTEN



Quelle: [What are robot singularities?](#)

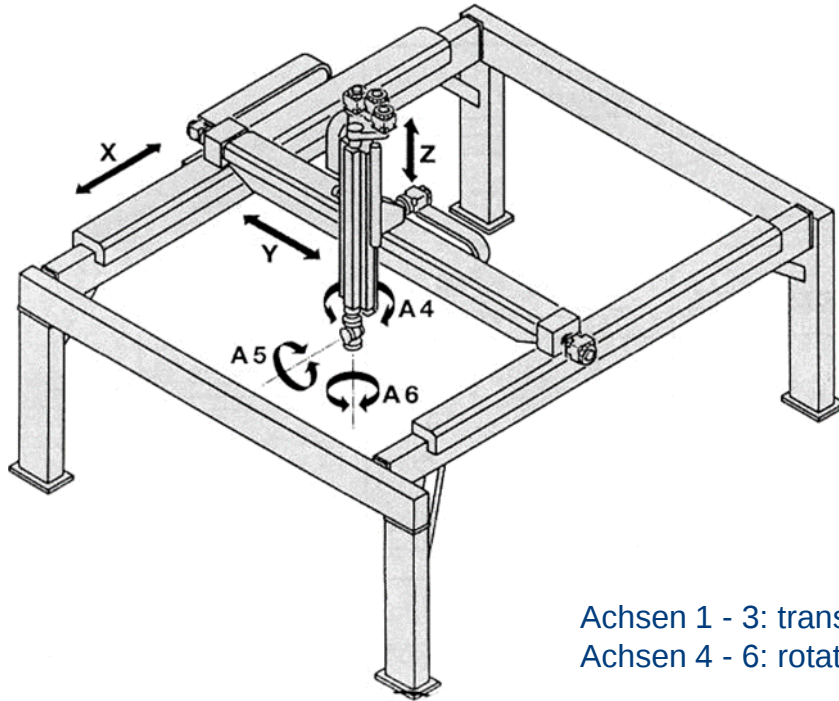
VERTIKAL-KNICKARM-ROBOTER



	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



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



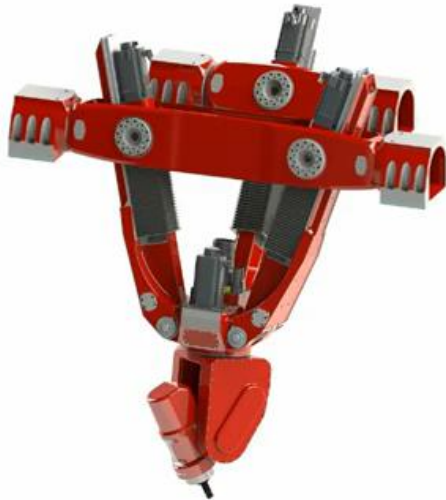
Parallelkinematik-Roboter:

- 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 sechssachsige 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



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



Einsatzbereiche:

- Handling (z. B. Photovoltaikindustrie, Lebensmittelindustrie)

Vorteile:

- extrem hohe Beschleunigungen
- extrem hohe Geschwindigkeiten

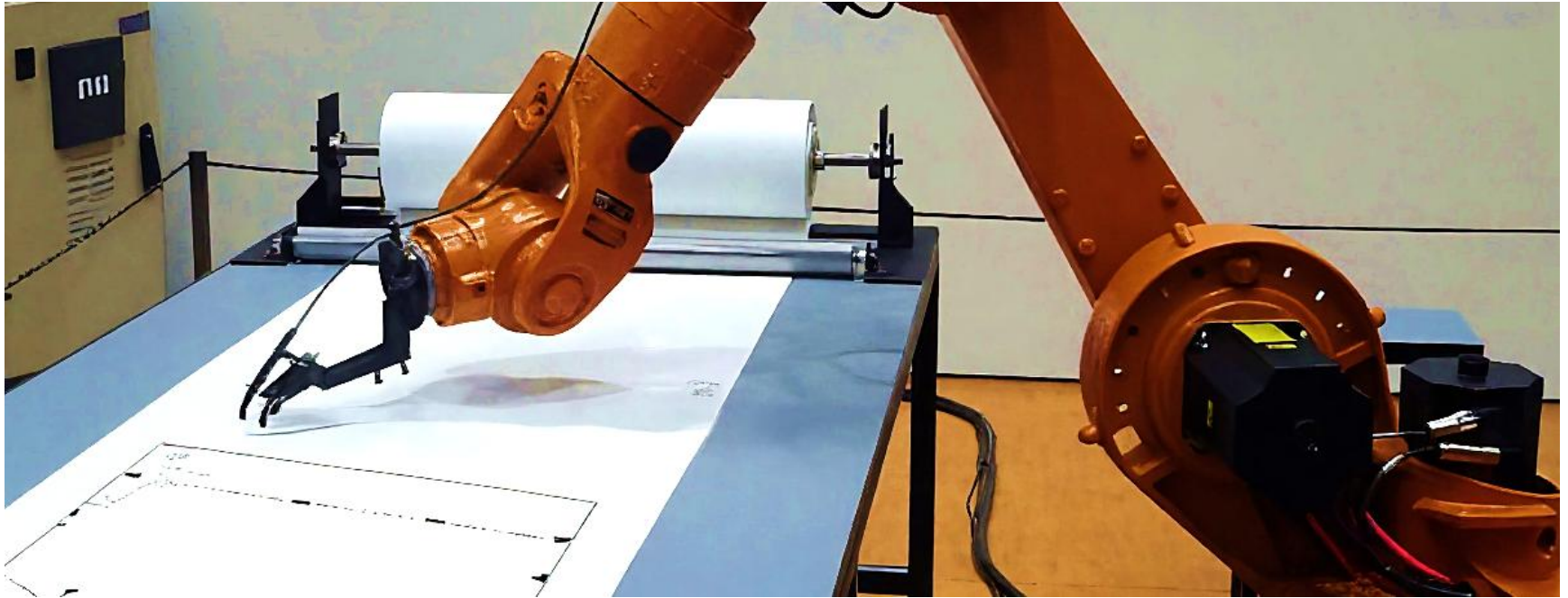
Nachteile:

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

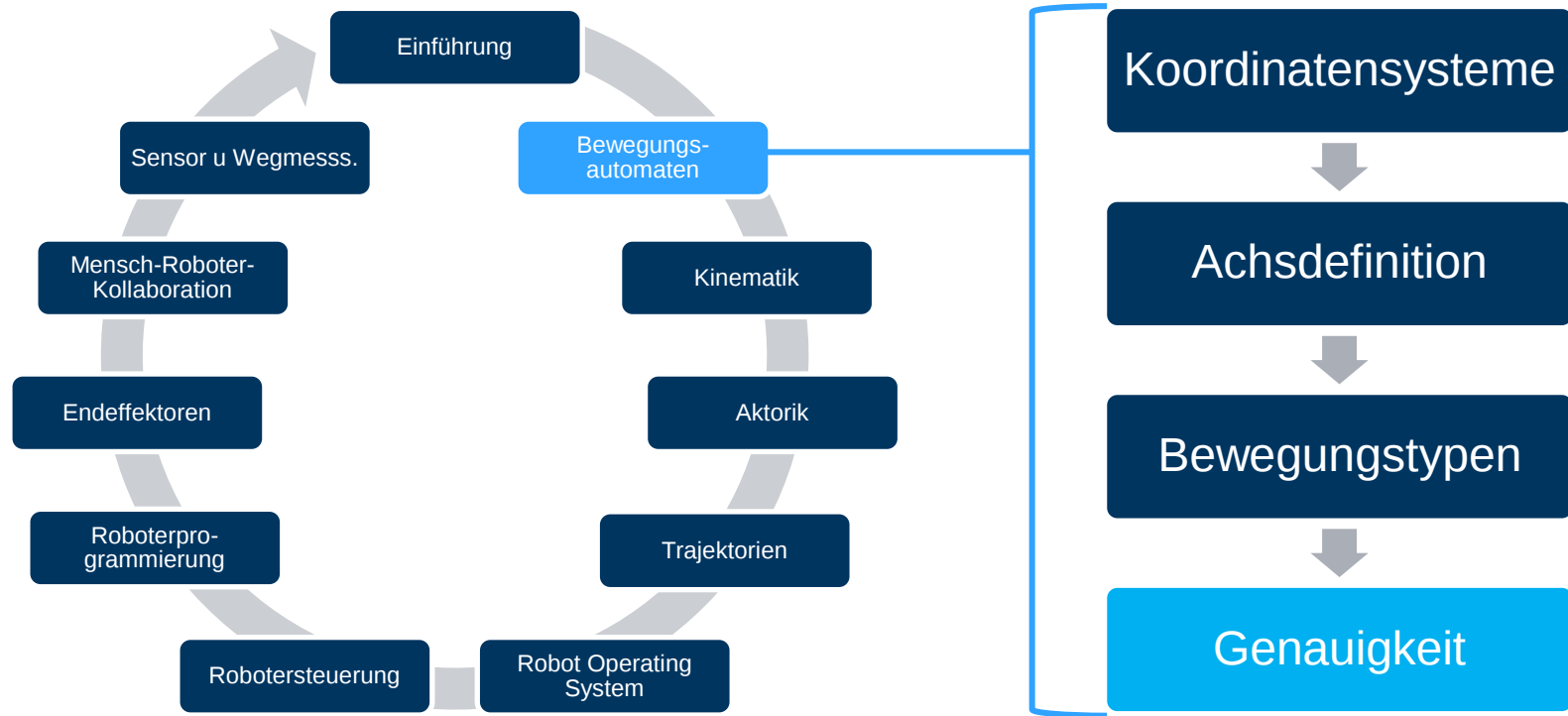
BEISPIEL: DELTA-ROBOTER



Quelle: [Pick and Place Delta robot for sachet sorting](#)



VORLESUNGSIHALTE

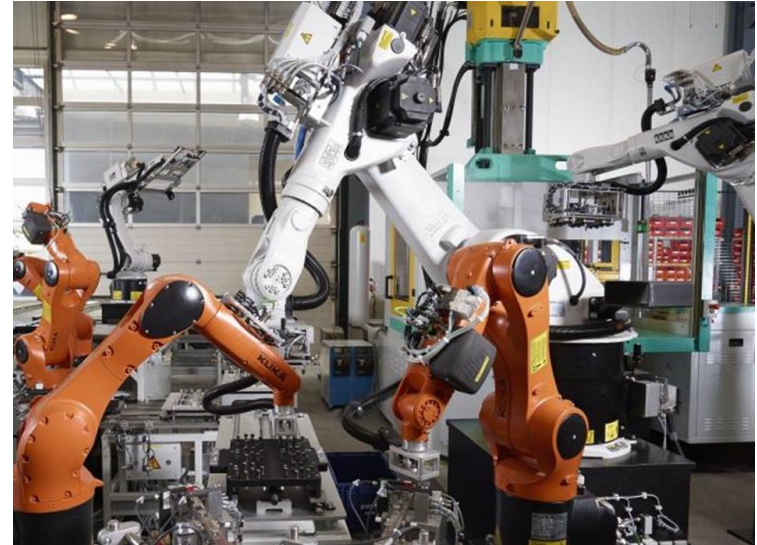


TECHNISCHE AUSWAHLKRITERIEN FÜR ROBOTER (NACH DIN EN 29946)



Technische Auswahlkriterien für Roboter

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

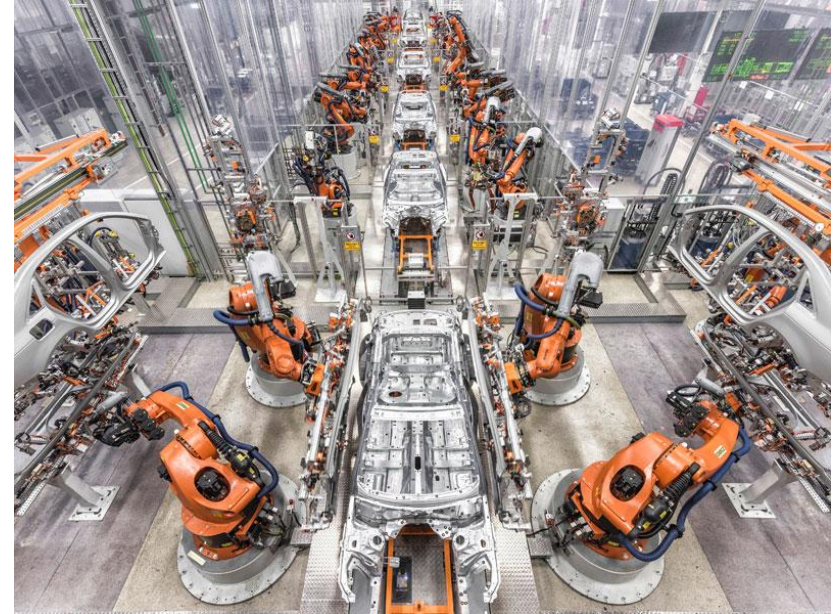


Quelle: [Das Ensemble der Zukunft - KUKA AG](#)



Auswahlkriterien für Roboterhersteller

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



Quelle: [In diesen Ländern arbeiten die meisten Roboter](#)



- Optimizing a solution to achieve an accuracy of less than **0.1mm**

Quelle: [Introducing GoFa™ Ultra Accuracy: When Precision Meets Perfection](#)

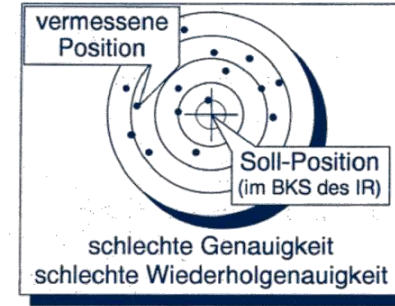


Wiederholgenauigkeit:

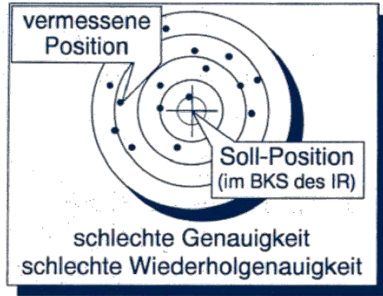
- Durchschnittliche Abweichung zwischen den Istposen bei wiederholtem Anfahren einer Sollpose

Absolutgenauigkeit:

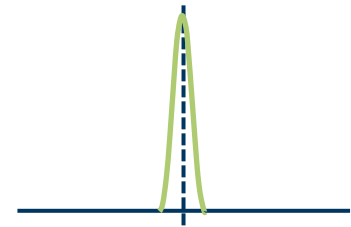
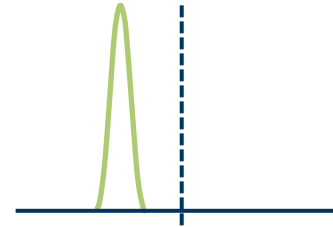
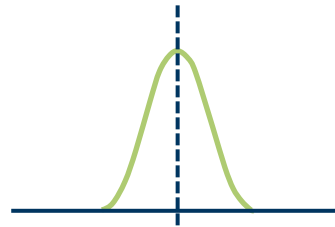
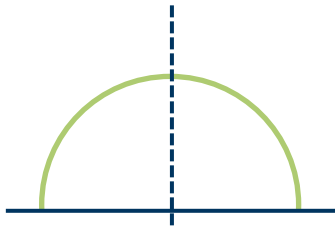
- Abweichung zwischen der Sollpose und dem Mittelwert der Istposen bezogen auf das Basiskoordinatensystem (absolut)



WIEDERHOL- UND POSITIONSGENAUIGKEIT HÄUFIGKEITSVERTEILUNG



Häufigkeitsverteilung



ERMITTLUNG WIEDERHOLGENAUIGKEIT/POSITIONIERGENAUIGKEIT



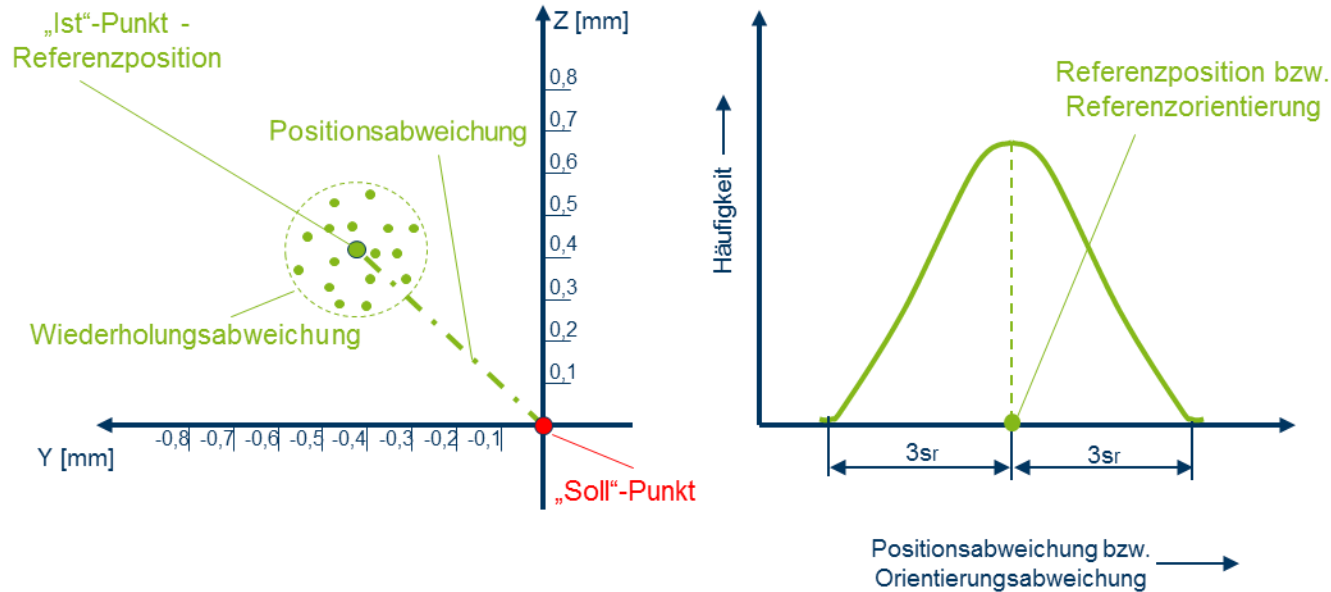
Wiederholgenauigkeit

- 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



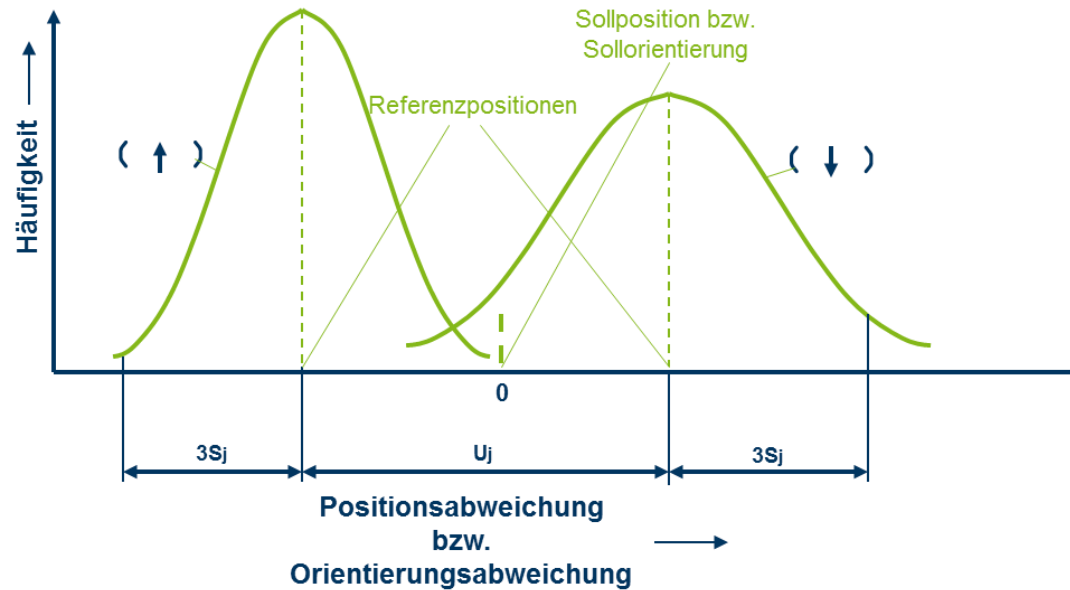
Quelle: VDI 2861

WIEDERHOL- UND POSITIONIERABWEICHUNG UMKEHRSPANNE



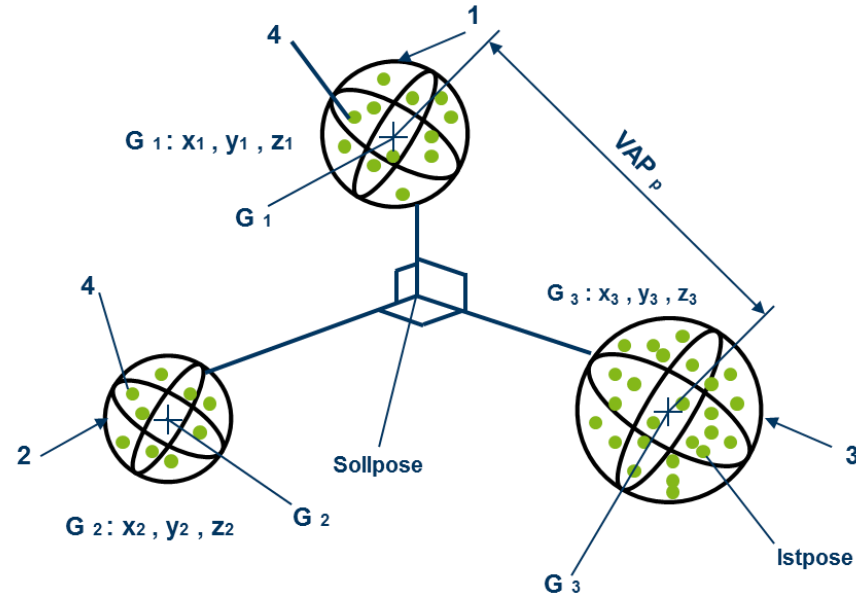
S_j : Standardabweichung

U_j : 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



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.
- **Folgefolie: „vAPp“** bedeutet: größter der drei Abstände zwischen den drei mittleren Istposen.



Begriffe aus VDI 2861:

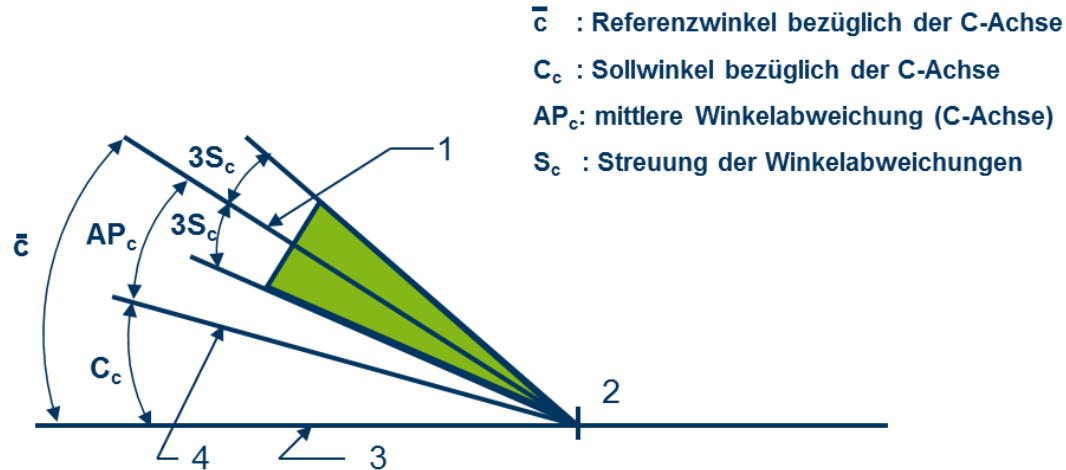
- Die Positionsstreuung P_S / Orientierungsstreuung O_S beschreibt die Auswirkung zufälliger Abweichungen von der Sollposition / Sollorientierung. Sie wird aus der Häufigkeitsverteilung der Positionsmesswerte / Orientierungsmesswerte (Grafik vorherige Folie) mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit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



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 Positionsstreuung“, „mittlere Orientierungsstreuung“ 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 Bahnstreuungsbereich“ sowie beim Fahren einer geraden Bahn die „mittlere Bahn-Orientierungsabweichung“ und der „mittlere Bahn-Orientierungsstreuungsbereich“,
- **beim Fahren einer rechtwinkligen Ecke** der „mittlere Eckenfehler“ und der „mittlere Überschwingfehler“

ORIENTIERUNGSGENAUIGKEIT UND WIEDERHOLGENAUIGKEIT



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

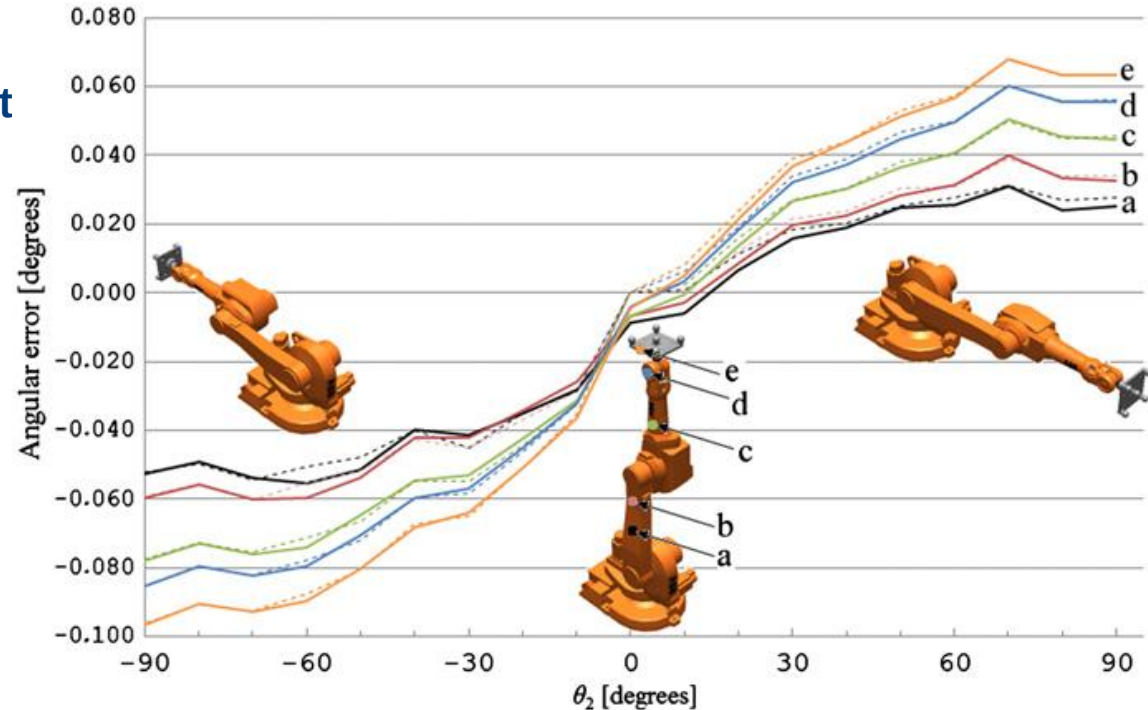
- 1 Mittelwert der ist Orientierung
- 2 virtueller Projektionspunkt unterschiedlicher Position
- 3 Koordinatensystem
- 4 Sollorientierung

Quelle: DIN EN ISO 9283

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



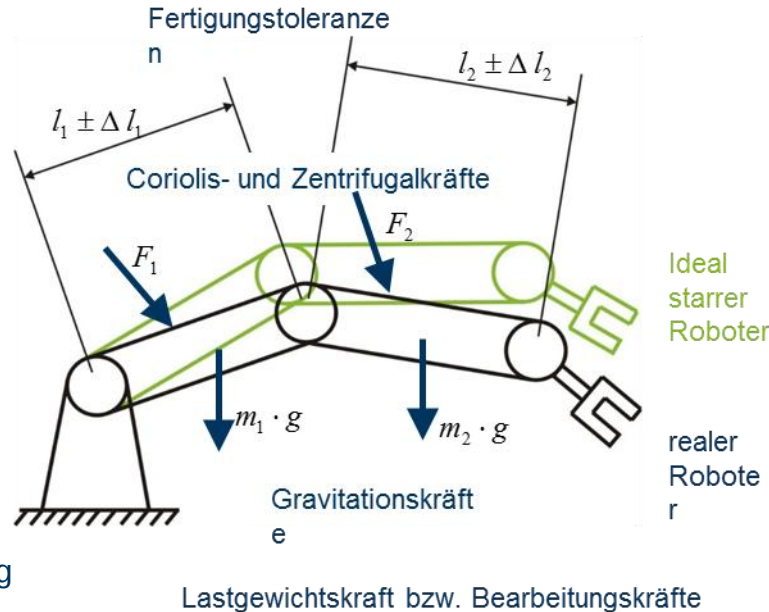
Armglieder:

- Elastische Verformung
- Fertigungstoleranzen

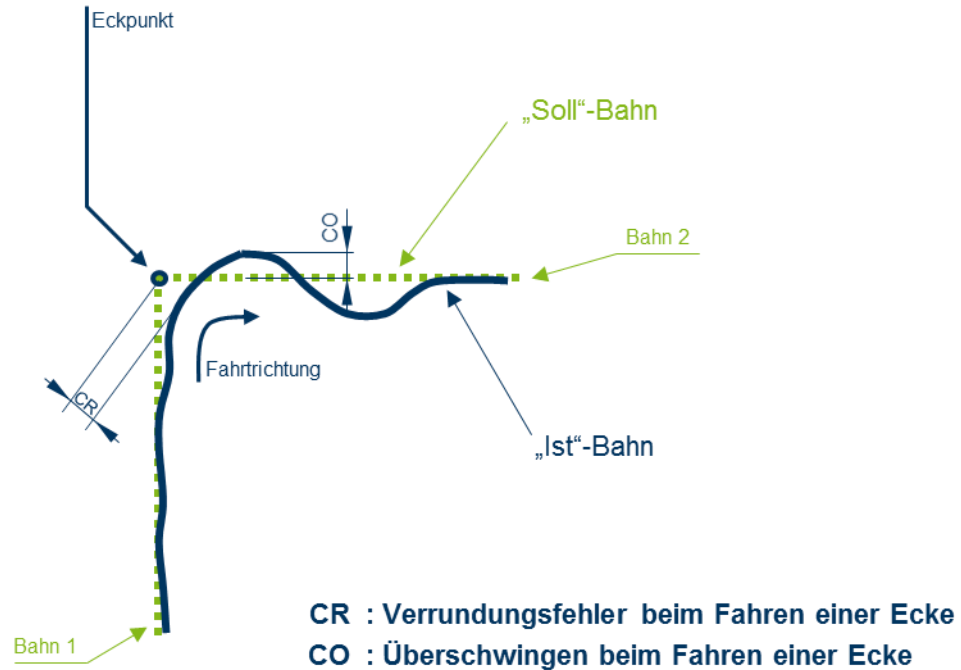
Gelenke:

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

Steuerung / Pfadplanung

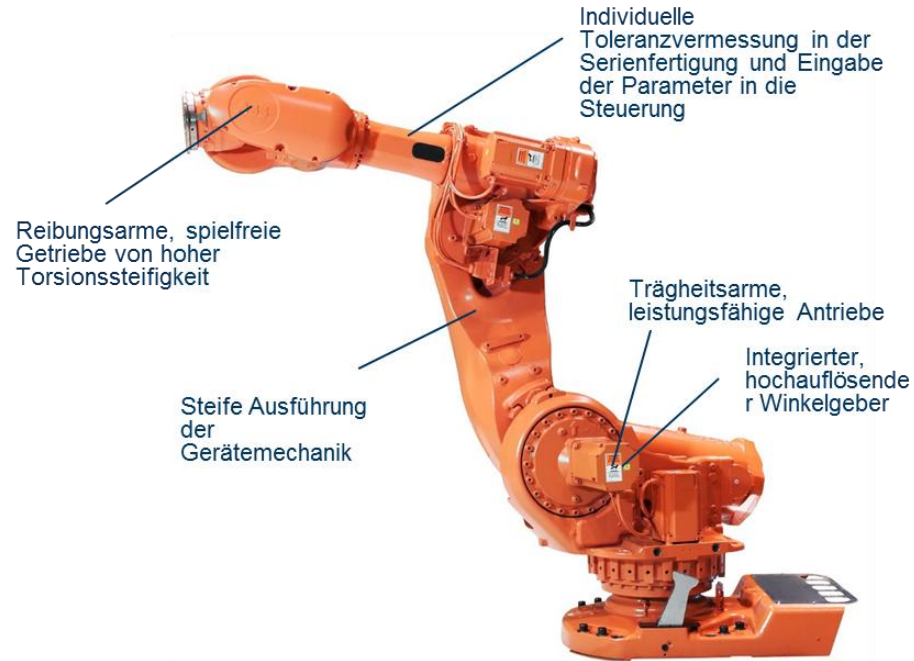


ÜBERSCHWINGEN UND VERRUNDUNGSFEHLER



Quelle: DIN EN ISO 9283

KONSTRUKTIVE MAßNAHMEN ZUR VERBESSERUNG



Quelle: ABB

TRAGLASTEN



Traglast-Kennlinien für einen 6-achsigen Horizontalknickarm-Roboter

Übliche Traglasten von Standard-Industrieroboter 1 – 2300 Kg

Angaben beziehen sich auf die Flanschplatte des Roboterarms am Ende der kinematischen Kette (Tool Attachment Point TAP). Bei der angegebenen Traglast muss der Roboter noch am Rand des Arbeitsbereichs die angegebene Genauigkeit erreichen.

