

Planung von Robotersystemen - Vorlesungszusammenfassung

Stand: WS 2023/24. Sourcedateien auf [GitHub](#). Letzter Export: 03.03.2024 um 11:24 Uhr. Stand: Alle Kapitel zusammengefasst. © Alexander Kraus, 2024

0.1 Lernziele

- Einführung in Planung einer Industrieroboterzelle als komplexes Automatisierungssystem
- Überblick über die wesentlichen Baugruppen und Aufbau von Industrierobotersystemen
 - Überblick über Roboter sowie deren Einsatzfelder
 - End-Effektoren
 - Steuerungen
- Phasen der Planung von Robotersystemen
 - Konzeption der Anlage
 - Sicherheit von Robotern
 - Programmierung von Robotern
 - Inbetriebnahme und Abnahme

0.2 Aufbau der Prüfung (WS2023/24)

- Die Prüfung ist mündlich und dauert 20 Minuten.
- Es werden etwa 20 Fragen gestellt, es geht also hauptsächlich in die Breite und nicht in die Tiefe.
- Konkrete Zahlenwerte wurden bei unseren Prüfungen nicht abgefragt, allerdings kann eine Frage wie "Welche Kinematik empfiehlt sich für eine hohe Traglast?" schon vorkommen.
- Die Fragen werden zu unterschiedlichen Themen gruppiert.
- Viele Aufgaben müssen durch eine Auflistung beantwortet werden, z.B. "Wofür werden Industrieroboter eingesetzt?" oder "Was ist alles Bestandteil einer Roboterzelle?"
- Es lohnt sich, die Definition eines Industrieroboters (nach Norm) auswendig zu lernen.
- Zu jedem Zeitpunkt kann man "weiter" sagen, wenn man zu einer Frage nichts mehr weiß. Dann wird die nächste Frage gestellt.

1.0 Einführung

Verwendung von Robotern durch die Jahrzehnte

Jahr	Verwendung
1973	Handling
1980	Assembly
1990	Service Robotics (Care-O-Bot)
2000	Image Processing Bin Picking
2010	Industry 4.0 ROS
2015	Artificial Intelligence Deep Grasping
2020	Automation of Automation
2030	Cognitive Robotics

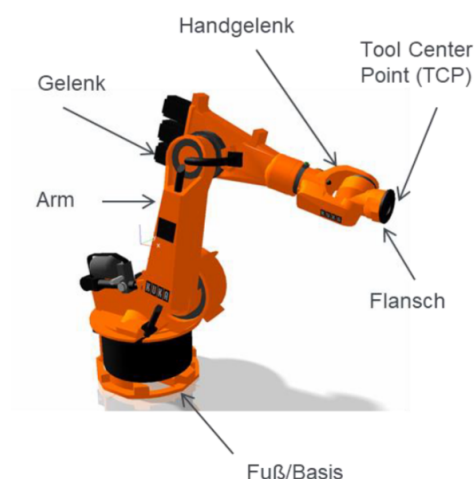
Entwicklungen

- **Treibende Kraft:** Fachkräftemangel (auch in DE und EU)
 - Alterung der Bevölkerung
 - Fehlende Pflegekräfte
 - Komplexität der Aufgaben (Unkraut jäten, Schweißen, ...)
- Zahl der neu installierten Roboter steigt (2022: 553k), besonders in China (über die Hälfte)
- Zuwachs hauptsächlich in den Bereichen
 - **Unterhaltung** (v.a. Gastronomie) (+125%)
 - **Transport und Logistik** (+44%)
 - **Landwirtschaft** (+18%)
- Weite Verbreitung bereits in Automotive, Elektronik, Metall, Chemie, Lebensmittel
- Märkte: China, Korea, Japan, USA, Deutschland
- Wachstum 8-12% p.a. in der letzten Dekade

Definition eines Roboters

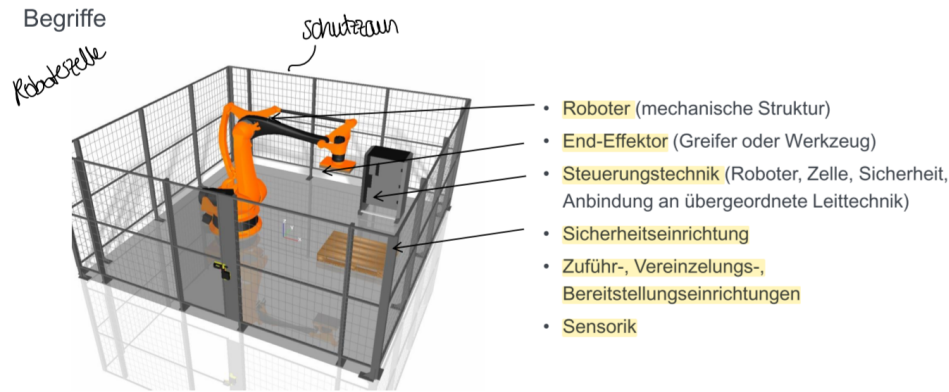
- Nach ISO 8373: Ein Roboter ist ein programmierbarer Manipulator mit **drei oder mehr Achsen** für industrielle Anwendungen.
- Roboter erzeugen automatisch eine durch ein Programm beschriebene Bewegung, so dass sich einmal festgelegte Abläufe ohne Personaleinsatz reproduzieren lassen.
- Der Roboter ist eine **universell einsetzbare Maschine**, die für verschiedene Prozesse verwendet werden kann.

Begriffe



Kriterium	Industrieroboter			Arm-Module	Kleinroboter	
Kinematik	Horizontaler Knickarm	Portalroboter	Vertikaler Knickarm	Gelenkmodule	Leichtbauroboter	Sicherer Roboter
a.k.a	SCARA	"auf Schienen"	KUKA	modular	COBOT	kollaborativ
max Traglast [kg]	10	50-500	10-200	~10	7	4
DOF	4-5	3-6	5-6/6	2-7	7	6
Wiederholgenauigkeit	hoch	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch
Sensorführung	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Kosten [k€]	25	50-100	30-60	5/DOF	60	50

Roboterzelle



- Typische Roboter-Stückkosten: **50.000 €** (einzeln)
- Systemkosten: **4-5-facher Roboterpreis**

Automatisierung der Automatisierung

- Roboterinvest: **25-30% des Robotersystems**
- Personalkosten: **~40% des Robotersystems**
- Skaleneffekte werden durch Individualisierung (I4.0 → Unikate) aufgewogen
- Komplexe Automation ist zu **80% KVP / brown field**
- Viele manuelle (Experten-)Prozesse beim Umrüsten

→ Automatisierung der Automatisierung

- Auslastungsoptimierte Matrixproduktion (höhere Auslastung, weniger Umrüsten)
- Automatisierte Layoutvorschläge (Fabrikhalle, Roboterzelle)
- Automatisierte Risikobeurteilung (Sicherheit)
- Autonome Verkettung mit Flurtransportsysteme (FTS)
- Selbstkonfigurierendes Bin Picking (Greifer, Kamera, Roboter)
- Selbstoptimierung Prozessparameter (z.B. Schweißparameter, Schwingungsdämpfung)

Wirtschaftlichkeit

Generell lohnt sich ein Industrieroboter, wenn die **Stückkosten gering** sind und die **Stückzahlen hoch** sind. Während die **Pro-Stück-Kosten einer Transferlinie** (vgl. Förderband) linear abnehmen bei steigender Stückzahl, verhält sich das beim Roboter komplexer: Bei **geringeren Stückkosten als am manuellen Arbeitsplatz** und bei **geringeren Stückzahlen als bei der Transferlinie** lohnt sich der Roboter. Durch die **Reduktion der Anschaffungskosten** und die **Erhöhung der Flexibilität** wird dieser Punkt immer früher erreicht.

Argumente für eine neue Roboteranwendung

- Nutzung durch **Nicht-Experten** möglich
- **Flexibilität** und einfache Konfiguration
- Verbesserte Produktion
- Hohe Investitionsrendite
- Schnelle Amortisation
- Verbindung zum Zulieferer

Gründe für Nicht-Investition

- Zu kleine Losgrößen für die Automatisierung
- Keine automatisierungsgerechten Prozesse
- Automatisierung zu teuer
- Kein geeignetes Personal zur Nutzung von IR
- IR zu groß, zu unflexibel
- Programmierung zu aufwendig
- Sonstige Vorbehalte gegen IN-Einsatz
- Schlechte IR-Erfahrungen bekannter Firmen

Wann ist der Einsatz von Robotern sinnvoll?

Anwendungsaspekt	Zustand
Stückzahl	hoch
Marktstabilität	hoch
Notwendiger Entwicklungsaufwand	gering
Personalmarkt	angespannt
Erfahrung mit automatisierten Systemen	hoch
Ergonomie	niedrig
Qualitätsanforderungen	hoch
Schichtmodell	24/7

Herausforderungen und Unsicherheiten

- **Toleranzen** im Werkstück und im Prozess können durch **Sensorik** ausgeglichen werden.
- **Marktvolatilität** kann durch **Wandlungsfähigkeit** ausgeglichen werden.
- **Datenvollständigkeit** kann durch **I4.0: Datenintegration** ausgeglichen werden.

Beispiele moderner Anwendungen

- Vernetzte Flurtransportsysteme statt der Produktion am "Fließband"
- Programmierung durch Vorführung (z.B. Schweißen)
- **Flexibilität** von mobilen Robotern beim Griff in die Kiste
- **Sensorgeführtes Schweißen**

2.1 Überblick und Industrieroboter

Roboterkinematiken

Kinematik	Serielle Roboter			Parallele und andere Roboter
Bauform	Knickarm	SCARA	Portal	Delta, Seilroboter
Marktanteil	66%	19%	10 %	1%
Vorteile	Zugänglichkeit, Beweglichkeit, Traglast		Sehr große Reichweite und Nutzlast	Hohe Steifigkeit, Genauigkeit, Dynamik
Nachteile	Mäßige abs. Genauigkeit	eingeschränkte Beweglichkeit, kleiner Arbeitsraum, kleine Traglast		
Typische Prozesse	Schweißen, Kleben, handling	Montage, Pick&Place	Pick&Place, Regalbedienung, Kommissionierung	Pick&Place, Sonderaufgaben
DOF	5-6	3-4	3	3-6
Form des Arbeitsraums	Kugel	Zylinder	Quader	Komplex
Radius des Arbeitsraums	0.5-3m	0.5-1m	0.1-100m	0.1-10m
Traglast [kg]	5-1000	0.5-5	0.5-X000	0.5-X000
Dynamik	mittlere Geschw. und Beschl.	sehr große Geschw. und Beschl.	je kleiner, desto schneller	sehr große Geschw. und Beschl.

Einsatzbereiche

- **Handling (44%)**: Materialtransport, Palettieren, Entpalettieren, Verpacken, Sortieren
- **Welding (19%)**: Punktschweißen, Lichtbogenschweißen, Laserstrahlschweißen
- **Assembly (12%)**: Bauteilmontage, Endmontage, Schrauben, Nieten
- **Clean Room (6%)**: Reinraum, Lebensmittel, Pharma
- **Machining (2%)**: Fräsen, Bohren, Schleifen
- **Dispensing (2%)**: Kleben, Dichten, Lackieren

Steuerungen

Die Steuerung besteht aus:

1. Energieversorgung
 2. Motorcontroller der Achsen
 3. Untergeordnete Steuerungen der Sensoren und Aktoren
- Die Robotersteuerung wird in der Regel vom Roboterhersteller bereitgestellt und erfolgt in einer einfachen, für den jeweiligen Hersteller spezifischen Programmiersprache.
 - Steuerungen bieten in der Regel Schnittstellen zur Integration weiterer Sensoren und Aktoren und SPS an.
 - Technologiepakete für spezielle Anwendungen (z.B. Schweißen, Lackieren) sind verfügbar.

Leistungsdaten und Eigenschaften von Robotern

- Freiheitsgrade: Anzahl der unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten des Roboters. Können linear oder rotatorisch sein.
- Singularitäten: Punkte im Arbeitsraum, an denen der Roboter seine Beweglichkeit verliert, z.B. wenn zwei Gelenke in einer Linie liegen.
- Arbeitsraum und Begrenzungen: Der Bereich, in dem der Roboter seine Aufgaben ausführen kann, und eventuelle Einschränkungen.
- Dynamik: Die Fähigkeit des Roboters, sich schnell und präzise zu bewegen.
- Traglast: Maximales Gewicht, das der Roboter tragen kann, an jedem Punkt im Arbeitsraum, wenn es direkt am Flansch befestigt ist.
- Genauigkeit: Maß für die Präzision, mit der der Roboter seine Aufgaben ausführt.
- Kollisionen: Situationen, in denen der Roboter mit anderen Objekten oder Hindernissen kollidieren kann.
- Steifigkeit: Reversible Verformung des Roboters unter Last.
- Kinematische Transformation: Umrechnung zwischen verschiedenen Koordinatensystemen des Roboters, speziell zwischen Gelenk- und Arbeitsraumkoordinaten.
- Kosten: Gesamtkosten für den Kauf, die Installation und den Betrieb des Roboters.

Formen der Genauigkeit

- **Wiederholgenauigkeit** gibt an, wie genau eine Pose innerhalb von vielen Zyklen erreicht werden kann. Bei vielen Industrierobotern bis zu 0.05 mm.
- **Absolutgenauigkeit** gibt an, wie genau die Raumkoordinaten bezogen auf das Basissystem des Roboters erreicht werden; hier sind Industrieroboter vergleichsweise ungenau.
- **Bahngenauigkeit** gibt die Abweichung von der programmierten Bahn an.
- Die Genauigkeit ändert sich unter wechselnder Last aufgrund der relativ geringen Steifigkeit.
- Robotergerauigkeit kann nicht pauschal durch eine einzige Kenngröße beschrieben werden.

2.2 Neuartige Robotersysteme

- Roboter lohnen sich nicht für zu geringe Stückzahlen
- je nach Schichtmodell amortisiert sich ein Roboter schneller oder langsamer
- Man unterscheidet zwischen Robotern in Großserienfertigung (low mix, high volume) und in Kleinserienfertigung (high mix, low volume). Bei Kleinserienfertigung ist die Automatisierung schwieriger, da die Anlagen häufig umgerüstet werden müssen.

Einflüsse auf die Kosten im Leben einer Anlage

1. **Investitionskosten:** Kosten für die Anschaffung der Anlage
2. **Anlaufkosten:** Kosten für die Inbetriebnahme der Anlage
3. **Variable Kosten:** Änderungen, welche die Produktion beeinflussen
4. **Rekonfigurationskosten:** Kosten für die Anpassung der Anlage aufgrund von Produktänderungen
5. **Obsoleszenzrisiko:** Risiko, dass die Anlage veraltet und nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden kann

Drei Probleme bei der Rekonfiguration von Robotersystemen

1. **Sicherheitskonzept muss angepasst werden** → kollaborative Roboter, günstigere Roboter
2. **Endeffektor muss angepasst werden** → universelle Endeffektoren
3. **Programmierung muss angepasst werden** → offline Programmierung oder "no code"/"low code" robotics (sensor-basierte Programmierung, Trace-Pen)

Kollaborative Roboter

- Diversifikation der Produktionsbedingungen erfordert flexiblere Automatisierungslösungen, insbesondere bei kleinen Losgrößen
- **Cobots sind einfach zu programmieren (z.B. durch App Store für Roboterapplikationen)** und erfordern oft weniger Sicherheitstechnik
- Cobots mit hoher Traglast oder hoher Geschwindigkeit sind wenig sinnvoll, da die Energie des bewegten Objekts dann gefährlicher ist als der Roboter ($1/2 mv^2$).
- z.B. **Schweiß-Cobots haben sich erfolgreich am Markt etabliert**
- Teure und schwer programmierbare Systeme setzen sich nicht durch
- Trend: **Externe Peripherie (Achsen, Schweißquelle, etc.) kann direkt vom teach pendant des Roboters durch zusätzlich installierbare „Apps- angesteuert werden**
- Trend: **"no-code robotics"** — mäßig erfolgreich bis dato

2.3 Parallele Roboter und Seilroboter

Eigenschaften

- Leichtbau durch optimale Belastung: Statt Biegung/Torsion nur Zug/Druck.
- **Geringe Masse, hohe Dynamik**
- **Kleinerer Arbeitsraum aber große Traglast**
- **Parallele Roboter sind steifer und genauer als serielle Roboter**
- Die Kinematik ist komplexer, da die Position von mehreren Gelenken gleichzeitig abhängt.

Bauarten und Antriebe

Antriebsart	Drehgelenk	Schubgelenk	Linearschlitten	Seilwinde
Bauart	Delta-Roboter	Stewart-Plattform	Hexaglide	Seilroboter
Beschreibung	3-4 Beine mit "Kniegelenken"	Plattform auf 6 Beinen	wie Delta-3D-Drucker	Ein Seil in jede Ecke des Raums
Steuerungstechnik	elektrischer Antrieb mit großer Übersetzung	elektrischer oder hydraulischer Antrieb	Antrieb über Lineardirektantrieb der Kugelgewindetrieb, Stab rein passiv	Elektrischer Antrieb, einfache Umsetzung mit Standardkomponenten
Eigenschaften	räumlich/flächig paralleler Roboter mit 3-4 Beinen + opt. Zusatzachse	vollbewegliche Plattform	3/6 Linearantriebe auf 3 Schienen	TCP hängt an 4/8 Seilen, die die Position klar bestimmen
Vorteile	hohe Dynamik, Struktur ist passiv	hohe Steifigkeit, Nutzlast und Genauigkeit, aber beschränkte Rotation	geringe Emissionen im Bauraum	Simpler Maschinenbau, Krantechnik aufrüstbar
Branchen	Lebensmittel, Pharma, Elektronik	hochbelastete oder hochgenaue Aufgaben, Bewegungssimulatoren	Handling	Handling, SpiderCam, Hochregallager

Entwicklung paralleler Roboter

Anforderungen aus Applikation

- Translatorischer Arbeitsraum
- Rotatorischer Arbeitsraum
- Bauraum und Störkonturen
- Freiheitsgrade
- Traglast
- Dynamik

Relevante Kriterien für die RoboterAuslegung

- Eigenkollisionen
- Singularitäten
- Hub der Aktoren
- Antriebsdimensionierung
- Seile unter Spannung

Steuerungstechnik

- Benutzerspezifische kinematische Transformationen
- Echtzeitfähigkeit

Ausblick

- Leistungssteigerung zu erwarten
 - Dynamik
 - Arbeitsraumgröße
 - Genauigkeit
- Leistungsfähige Steuerungstechnik ermöglicht den Betrieb komplexer Kinematiken
- Energie- und Ressourceneffizienz

3.1 Greifer, Werkzeuge, Messmittel

Endeffektor = Funktionseinheit eines Robotersystems

- Der Prozess bestimmt die Auswahl des Endeffektors
- ein Prozess ist entweder werkzeuggeführt (z.B. Schweißen) oder werkstückgeführt (z.B. Montage, Handhabung)
- Bei Werkstückführung ist der Endeffektor ein Greifer (oder Spannmittel)
- Das **Wirkelement erfüllt die Hauptfunktion des Endeffektors, es bewirkt den Prozess. Das sind Greifer, Werkzeuge, Mess- und Prüfmittel**
- Das **Zubehör erfüllt eine Hilfsfunktion, es unterstützt den Prozess. Hierzu gehören Wechselsysteme, Ausgleichssysteme, Messsysteme.**
- Die **Peripherie ist die Umgebung des Roboters, sie ermöglicht den Prozess. Hierzu gehören Kabelschutz, Wechselstationen, Reinigungssysteme. Sie sind keine Bestandteile des Endeffektors.**
- Größe, Kosten, Gewicht und Komplexität variieren bis zum Faktor 1000.

Greifer

- Es wirken statische, dynamische und prozessbedingte Kräfte auf den Greifer
- Es gibt viele unterschiedliche Greiferarten, die sich in der Art des Greifens, der Anzahl der Greifpunkte und der Art der Aktuierung unterscheiden
- **Greifprinzipien: Klemmgreifer, Sauggreifer, Magnetgreifer, Nadelgreifer, Aufwälggreifer, Ultraschall/Bernoulli-Greifer**
- **Flexible Greifer haben unterschiedliche Greifbacken an einem Finger oder wechselbare Finger oder können sich (aktiv oder passiv) verformen**
- Die Bereitstellung der zu greifenden Teile ist ein wichtiger Bestandteil der Greiferwahl/-konstruktion
- Die Greifplanung kann einerseits vordefiniert sein, andererseits kann sie auch adaptiv gelöst werden (Automatisierung der Automatisierung)
- **Griffpositionen können manuell oder automatisch am Bauteil bestimmt werden oder ohne Modell der Bauteil(lage) bestimmt werden. Greifstrategien hängen von den jeweiligen Greifprinzipien ab.**

Werkzeuge, Mess- und Prüfmittel

- Roboterwerkzeuge basieren meist auf Handwerkzeugen (Schweißpistole) oder Maschinenwerkzeugen (Frässpindel), sie können aber auch speziell für den Roboter entwickelt werden (z.B. Wickeln von Sattelspulen)
- Zusätzliche Achsen und Sensoren ermöglichen eine Prozessregelung

Arbeitsschritt	Werkzeug
Schweißen	Schweißpistole, Schweißzange, Schweißlaser
Bearbeiten	Frässpindel, Entgratspindel, Schleifwerkzeug, Strahlpistole
Beschichten, Kleben	Lackierpistole, Klebepistole, Spritzpistole
Messen, Prüfen	Laserkamera, Ultraschall, Röntgen

Zubehör

Funktion	Zweck
Wechseln	Austauschen von Effektoren für unterschiedliche Prozesse
Schützen	Durch Auslenken bei Kollisionen/Notabschaltung
Ausgleichen	Kompensieren von Toleranzen und Verformungen
Messen	Erfassen von Prozessgrößen (Kräfte, Momente)
Durchführen	Elektrik, Pneumatik, Hydraulik, Datenübertragung

Peripherie

- Die Peripherie ermöglicht den Betrieb des Endeffektors
- Kabel und Schläuche
 - müssen schleppkettentauglich bzw. robotertauglich sein
 - sollen in Kabelschutzschläuchen oder Schleppketten geführt werden
- **Sensor- und Aktorverteiler reduzieren die Kabelanzahl und erleichtern Inbetriebnahme, Wartung, Reparatur**

Fazit

- Die Entwicklung oder Auswahl von Greifern und Werkzeugen unterliegt vielen Einflussfaktoren und ist daher anwendungsspezifisch
- Einfache Aufgaben:
 - es existieren Komponenten und Baukästen
 - immer ist mindestens die Auswahl und Integration notwendig
- Komplexere Aufgaben:
 - Oft Sonderanfertigung oder komplette Neuentwicklung → Greifer und Werkzeuge sind Anpass- oder Sonderkonstruktionen

3.2 Steuerungstechnik

Grundlagen der Steuerungstechnik

Ein technischer Prozess ist die Umformung und/oder der Transport von Materialien, Energie und/oder Information. Beispiele sind Fertigung von Teilen oder die Montage von Produkten.

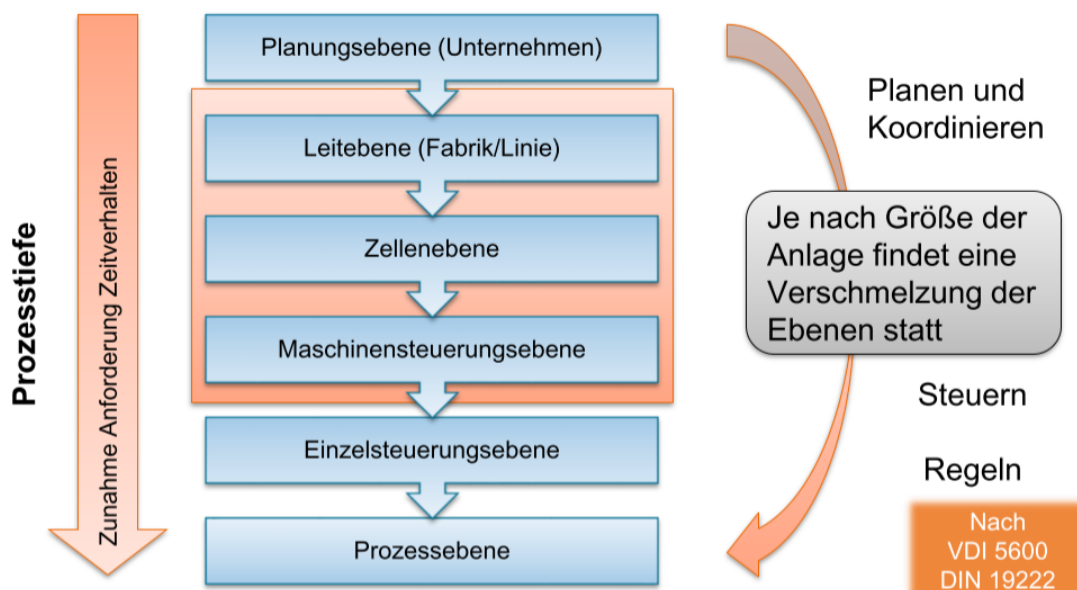
Eine Automatisierungseinrichtung hat das Ziel, die Arbeit des Menschen im operativen Bereich zu erleichtern. Die Herausforderung ist prozesssicheres Einwirken des Nutzers durch Steuerungstechnik. Automatisierungsobjekte sind z.B. Roboter, Automaten, Fertigungssysteme und Werkzeugmaschinen.

Der Mensch/Nutzer hat die Aufgabe, die Automatisierungseinrichtung zu lenken und zu beobachten. Er hat Zugriff auf Führungsgrößen zur Beeinflussung der Anlage.

Abgrenzung von Steuerung und Regelung

- **Steuern** — beschreibt den Vorgang zur Beeinflussung von Ausgangsgrößen eines Systems durch Einstellen von Eingangsgrößen
- **Regeln** — beschreibt den Vorgang bei dem fortlaufend eine Regelgröße erfasst und mit einer Führungsgröße verglichen wird (Regelabweichung), so dass die Regelgröße der Führungsgröße nachfolgt
- Vergleich:
 - Geschlossener Wirkungskreis durch Rückkopplung der Regelgröße
 - Ständiger Vergleich von Soll- und Istwert des geschlossenen Wirkungskreises ermöglicht die Reduzierung von Störgrößen

Organisation und Hierarchie einer Steuerung



Automatisierungspyramide:

- **ERP:** Enterprise Resource Planning (Planungsebene)
- **MES:** Manufacturing Execution System (Betriebsleitebene)
- **SCADA:** Supervisory Control and Data Acquisition (Prozessleitebene)
- **PLC:** Programmable Logic Controller (Steuerungsebene/SPS)
- **Bus:** Feldbus (Feldgeräteebene)

Leitebene / Zellenebene / Maschinensteuerungsebene:

- Leitebene: Lenken, Zusammenfassen, Verwalten
 - Programmverwaltung, Systemabbildung, Aufbereiten von Betriebsdaten
 - Einbeziehung des Nutzers zur Lenkung und Organisation des Prozesses
- Zellenebene: Koordinieren und Verteilen
- Programmverteilung, Verwaltung von Werkzeug- und Werkstückdaten, Steuerdatengenerierung für Werkstück- und Werkzeugfluss in der Zelle, Auswerten von Messdaten und ggf. Beeinflussung
- Maschinensteuerungsebene: Programmieren und Verarbeiten
 - Handeingabe, Auswahl der Betriebsarten, Erzeugung der Achsbewegung, Überwachungs- und Diagnosefunktionen

Maschinensteuerung eines Roboters

- Anforderungen der Echtzeitdatenverarbeitung
 - Rechtzeitigkeit — Einhaltung von Zykluszeit und Abtastzeitpunkt
 - Gleichzeitigkeit — Abarbeitung zeitlich paralleler Aufgabe
 - Verfügbarkeit — Unterbrechungsfreie Betriebsbereitschaft
- Umsetzung:
 - Feldbusse für die Kommunikation
 - Echtzeiterweiterung im Rechner (z.B. Kuka: vxWorks)
 - Aufteilung der Steuerungssoftware in zyklische Tasks

Hauptfunktionen

- Die Ablaufsteuerung bildet den für den Anwender wichtigsten Teil der Steuerung
- Die Programmiersprache ist herstellerspezifisch; die wesentlichen Funktionen sind allerdings vergleichbar
- In einem Programm werden Bewegungen des Roboters als Sequenzen von Einzelbewegungen hinterlegt:
 - Punkt-zu-Punkt (PTP)
 - Lineare Bewegung
 - Kurven (Kreise, Splines)
- Weiterhin sind einfache Strukturierungen möglich
 - Einfache Flusskontrolle (if-then-else) sowie Schleifen
 - Unterprogramme
 - Einfache Variablen
 - ...
- Maschinensteuerung beinhaltet Teilsysteme mit offener oder geschlossener Wirkungskette
- Steuerungstypen
 - Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) verarbeitet zyklisch Eingangssignale und bestimmt anhand interner Zustände und einer Logik die Ausgangssignale
 - Die Robotersteuerung (RC) dient als Programmsteuerung, zur Ausführung von Bewegungen und zur Steuerung externer Geräte
 - Die numerische Steuerung (NC) ist eine Programmsteuerung, in der Fertigungsschritte werkstückorientiert interpretiert und Bewegungen ausgeführt werden

Adaptive und Sensor-Steuerung

- Sinn und Zweck:
 - Kompensation von Störungen, die auf der Gelenkebene nicht erfasst werden (z.B. Durchbiegen und Drift)
 - Anpassung eines Prozessparameters (z.B. Abstand zum Werkstück)
- Lösungsmöglichkeiten:
 - Referenzierung: Anpassung des Programms
 - Externe Regelung: Bewegungsüberlagerung durch Erfassung der Ist-Pose
- Welche Anhaltspunkte sind zu beachten?
 - Prozesssichere Auswertung und Vernetzung der Sensoren
 - Schnittstelle zur Steuerung

3.3 Roboterprogrammierung und Zellsimulation

Roboterprogrammierung Grundlagen

- Ziel ist , die Aufgabe des Roboter zu definieren und **Planungsdaten** zu erhalten (z.B: Taktzeiten)
- Programmierung kann **online** (vor Ort, Handgerät/Vormachen) oder **offline** (von einem anderen Ort, ohne Roboter. Simulativ oder automatisch) erfolgen
- Zeitaufwand: Faustregel 1min/Punkt bei **Online-Programmierung** mit Handgerät

Online-Programmierung

Programmierhandgerät

- Definieren der Bewegung durch anzufahrende Punkte, Bewegungsart (PTP, Bogen, ...) und Bewegungsparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung, ...)
- Definieren des Prozessablaufs (meist durch warten auf Signale, setzen von Ausgängen, ...)
- Unterschiedliche Handgeräte: Touchscreen, Tastatur, Joystick, 3D-Maus, ...
- Bei üblichen Werkstücken kann mit einem Tag **Programmieraufwand** pro Werkstück gerechnet werden (450 Punkte entsprechen 7,5h **Programmieraufwand**)

Programmieren durch Vormachen

- Statt die Punkte einzugeben, kann der Roboterführer die Bewegungen vormachen, indem er den Roboterarm führt und mit dem Handgerät die Punkte speichert
- Ziel: Reduzierung des **Programmieraufwands**, geringerer Schulungsaufwand

Offline-Programmierung

1. Abbilden der Roboterzelle in einem CAD-Programm (Herstellerdatenbank für Roboter, CAD-Modelle des Werkstücks und der Zelle)
2. Definieren der Bewegungen und des Prozessablaufs
3. Definieren der I/Os und der Parameter
4. **Simulation** auf Kollisionen, Erreichbarkeit, Taktzeiten, ...
5. Exportieren des Programms in die Robotersteuerung
6. Laden des Programms in die Robotersteuerung
7. Testen des Programms und ggf. Anpassen

Simulation

- **Erreichbarkeiten** und Kollisionen frühzeitig erkennen
- Singularitäten und Achsbeschränkungen erkennen
- Taktzeiten und Prozessabläufe optimieren

Wofür wird simuliert?

- Industrierobotik: Überwiegend Nutzung von in der Entwicklung bekannten geometrischen Eigenschaften
- Vorstudien: Machbarkeit, Erreichbarkeit, Taktzeiten, Kosten
- Grundlage für virtuelle Methoden bei der Entwicklung: Layoutplanung, **Offline-Programmierung**, Ableitung von Planungsunterlagen

Offline: Aufwandsbetrachtung Zeit

Ohne konkrete Randbedingungen nur schwer zu beantworten

- Anschaffung von **Softwarelizenzen**
- Eventuell Adaption der Software durch das Systemhaus
- Hardware: vergleichbar mit CAD-Arbeitsplatz
- Schulung eines am besten in 3D-Arbeiten vorgebildeten Mitarbeiters
- Zeitaufwand für die Datenkonvertierung
- Zeitaufwand für die **Offline-Programmierung**
- Zeitaufwand für das Nachteachen

Intuitive Programmierung

- Block-basierte **Programmierung**, Blöcke haben vorprogrammierte Funktionen
- Steuerungsablauf wird aus den Blöcken zusammengesetzt
- Vorteil: Einfache Programmierung, auch für ungeübte Anwender

Sensorintegration ("Roboter lernen sehen")

- Sinn und Zweck: Anpassung des Prozesses an Toleranzen und Varianten
- Beispiele: Lageerkennung, Nahtverfolgung, Kraftsensoren, Qualitätskontrolle (Fehlerbilder)
- Programmierung: Viel komplexer, Problemquellen sind Schnittstellen, Programmablauf und Fehlerbehandlung

Auswahl von Komponenten und Tools

Kriterium	Online-Programmierung	Offline-Programmierung
Soll die Anlage bereits im Vorfeld simuliert werden?	Nicht möglich	Ermöglicht die Optimierung der Anlage
Wechselt mein Produkt/Variante oft?	Häufiger Stillstand durch Programmieren	Höhere Produktivität
Verfügbarkeit von CAD-Daten	Nicht notwendig	Notwendig
Sind die CAD-Daten aus verschiedenen Quellen?		Erschwert die Offline-Programmierung
Wie hoch ist meine Zellenauslastung?	Bei geringer Auslastung stört die Blockierung durch Programmierung nicht	Höhere Zellenauslastung möglich
Hab ich qualifiziertes Personal?	eher praktische Erfahrung notwendig	theoretische und praktische Erfahrung notwendig

4.1 Toolkits, Plattformen und Integrationen zur Steuerung und Sensorintegration

- Komplexe Roboteranlagen benötigen vielfältige Integration von Sensorik, Komponenten und Algorithmen
- Hohe Wiederverwendbarkeit von Entwicklungen senkt mittelfristig Entwicklungskosten
- Entwicklung von wiederverwendbaren Komponenten erzeugt allerdings zusätzlichen Aufwand
- Middlewares werden für die Integration benötigt und helfen auf wettbewerbsrelevante Entwicklungen zu fokussieren
- Umstellung auf und Einstieg in neue Middlewares kostet Zeit und Energie

Motivation zum Einsatz von Middleware in der Robotik

- Vereinfachung der SW Integration
- Wiederverwendbarkeit der SW Module
- Vereinheitlichung der Modul-kommunikation und Prozessausführung
- Herstellerunabhängigkeit ermöglicht die Nutzung und Kombination von am Markt verfügbaren Technologien
- Fokus auf wettbewerbsrelevante Entwicklung
- Verteilte Rechnersysteme Kommunikation über Rechnergrenzen hinweg
 - Heterogene Rechner
 - Bedienung, Ferndiagnose/-wartung

Vielfältige Vernetzung, Informationsaustausch, Eigenständige Anlagen und Informationsspeicherung ermöglichen die Vision: Dezentrale Selbstorganisation in Echtzeit in der Industrie 4.0

In der Robotik verbreitete Toolkits

- **ROS (Robot Operating System):** Flexibles Framework für Robotersoftware-Entwicklung, erleichtert Kommunikation und Koordination.
- **OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture):** Offener Standard für industrielle Automatisierung, ermöglicht nahtlose Integration, sichere Kommunikation.
- **OpenCV (Open Source Computer Vision Library):** Open-Source-Bibliothek für Computer Vision, unterstützt Objekterkennung, Tracking und Bildanalyse.
- **OpenRAVE (Open Robotics Automation Virtual Environment):** Open-Source-Plattform für Robotersystem-Simulation und -Planung, fördert Bewegungsablaufentwicklung.
- **TensorFlow (Open Source Machine Learning Framework):** Framework für maschinelles Lernen, in der Robotik für Bilderkennung, Sprachverarbeitung und Bewegungssteuerung verwendet.

Open Source Software

Motivation: Nutzung standardisierter Schnittstellen und Protokolle, Anbieter-Unabhängigkeit, Wiederverwendbarkeit/Anpassbarkeit, Kosteneinsparung

Aspekt	Vorteil	Nachteil
Verfügbarkeit des Codes	Quellcode verfügbar	Ggf. keine ausreichende Dokumentation
Verfügbarkeit des Frameworks	Fokussierung auf wettbewerbsrelevante Entwicklung	Festlegung auf und Abhängigkeit von Framework
Lock-in	Keine Anbieterabhängigkeit	Keine Haftung oder Gewährleistung
Kosten	Keine Lizenzkosten	Lizenz muss eingehalten werden
Anpassbarkeit	Quellcode kann angepasst werden	Ggf. muss Änderung freigegeben werden
Kommerzielle Services	Ggf. Teil des Finanzierungsmodells	Fehlende Service-Level-Agreements
Community	Ggf. starke, aktive Community	Keinen rechtl. Anspruch auf Support

Übersicht Softwarelizenzen

- **Copyright** besagt, dass abgeleitete Werke unter der gleichen Lizenz veröffentlicht werden müssen. **Permissive Lizenzen** erlauben die Verwendung des Codes in abgeleiteten Werken, ohne dass diese unter der gleichen Lizenz veröffentlicht werden müssen.
- **Copyright** besagt, dass der Urheber des Codes das Recht hat, die Verwendung und Verbreitung des Codes zu kontrollieren. **Open Source Lizenzen** erlauben die Verwendung und Verbreitung des Codes unter bestimmten Bedingungen, die in der Lizenz festgelegt sind.

4.2 Beherrschung von Toleranzen in der Robotik

Potenziale und Einsatzgrenzen

- **Handling (44%)**: Greifgenauigkeit bestimmt Prozessgenauigkeit des darauffolgenden Prozesses
- **Welding (19%)**: Ungenauigkeiten führen zu hohen Nachprogrammierungszeiten
- **Assembly (12%)**: Eher geringe Anforderungen an Genauigkeit
- **Clean Room (6%)**: Hohe Anforderungen an Genauigkeit
- **Machining (2%)**: Prozesskräfte am Endeffektor führen zu Genauigkeitsverlust
- **Dispensing (2%)**: Hohe Anforderungen an Bahngenauigkeit

Ursprung von Toleranzen

- **Umgebung**: Aufspannung, Anregung, Temperatur
- **Mechanik**: Spiel, Nachgiebigkeit, Schwerkraft
- **Signalverarbeitung**: Kinematik, Bahnplanung und -führung
- **Prozess**: Durchbiegung, dynamische Effekte

Fehlerausgleichsstrategien

- **Ausgangspunkt**: Standard-Industrieroboter (Wiederholgenauigkeit) → 0,8 mm
- **Intrinsische Korrektur**:
 - Modellbasierte DH-Parameter-Kompensation (DH = Denavit-Hartenberg) → 0,5 mm
 - Zusätzliche Achsencoder → 0,3 mm
- **Extrinsische Korrektur**:
 - Motion Tracking → 0,1 mm

Genauigkeitsdefinitionen

- **Wiederholgenauigkeit**: Abweichung des Endeffektors bei mehrmaliger Anfahrt desselben Punktes (Relevant für Teach-in, Online-Programmierung)
- **Absolutgenauigkeit**: Abweichung des Endeffektors bei Anfahrt eines Punktes (= Koordinaten, Relevant bei Offline-Programmierung)
- **Bahngenauigkeit**: Abweichung des Endeffektors bei Bahnfahrt (Relevant bei Schweißen, Kleben, Lackieren). Typischerweise 1-5 mm Abweichung.
- **Porengenauigkeit**: Abweichung des Endeffektors bei Anfahrt eines Punktes (Relevant bei Positioniergenauigkeit, z.B. bei Montage)

Verbesserungsmöglichkeiten

- **Hardware**: Ressourceneinsatz, Hardwareanpassungen sind zeit- und kostenintensiv. Wiederverwendbarkeit nicht gegeben.
- **Software**: Ressourcenfrei reproduzierbar, Flexibilität, algorithmische Verbesserungen, Robustheit durch Selbstadaptation. Leistungsgrenze durch Antriebe und Sensoren begrenzt.

→ Da Code sehr günstig ist, kann eine große Verbesserung der Genauigkeit bei geringem Investitionsaufwand erreicht werden.

Vorgehensweise zur Kalibrierung von Robotern

1. Mathematisches **Robotermodell**
2. Auswahl der wichtigsten Modellparameter
3. Auswahl der **Messposen** (Ziel: gute numerische Kondition/Rauschunterdrückung, einfacher Messaufbau)
4. Anfahren der verschiedenen Roboterposen
5. **Messgrößenerfassung**
6. Berechnung der zugehörigen Modellwerte
7. **Parameteridentifikation** durch Minimierung der Fehlerfunktion
8. **Anpassung** der Parameter in der Steuerung

Modellierungsansätze von Toleranzen

- **Parametrisches physikalisches Modell/White-Box-Modell:** Modellierung der kinematischen und dynamischen Eigenschaften des Roboters. Hoher Modellierungsaufwand, Beschränkung auf die wesentlichen Parameter.
- **Generisches mathematisches Modell/Black-Box-Modell:** Modellierung der kinematischen und dynamischen Eigenschaften des Roboters. Hoher Rechenaufwand, komplexes Ein-/Ausgangsverhalten.
- **Hybride Modellierung/Grey-Box-Modell:** Kombination aus parametrischem und generischem Modell. Kann zum Beispiel durch Kombination von kinematischer Berechnung und neuronalem Netzwerk realisiert werden.

→ Modellierung kann entweder durch Vorwissen oder durch Messungen erfolgen. Je weniger man vom einen hat, desto mehr muss man vom anderen haben.

Bewertungskriterien für die Auswahl von System-Komponenten

- **Sensorik:** Auflösung, Rauschen, Messfrequenz, Verfügbarkeit, Kosten
- **Modell:** Genauigkeit, Rechenzeit, Robustheit, Anpassbarkeit
- **Steuerung:** Echtzeitfähigkeit, Open-Source/Closed-Source, Schnittstellen, Toolchains, Benutzerdefinierte Kinematiken

Messwerterfassung durch Sensorik

- **Lasertracker:** Lasertracker, bis 150 m Entfernung, 0,02 mm Auflösung, 1000 Messpunkte/Sekunde, SDK für Softwareintegration, präzise Vermessung von Robotern und Anlagen, Reflektoren erforderlich, optionale 6D Posenmessung.
- **Indoor GPS:** Lokalisierungssystem, beliebiges Messvolumen. Alle Komponenten in einem Referenzsystem. Online-Kompensation
- **Laser-Scanner:** Unterschiedliche Genauigkeiten, Messpunktwolken. Echtzeitreferenzierung von mobilen Robotern, Objektlagenerkennung
- **Mechanische und optische Messtaster:** Arbeitsbereich bis 15cm, Auflösung bis 1 μm . Für parametrische Modelle wie serielle Kinematiken, Online-Kompensation möglich.
- **Interne Sensorik:** Direkte und indirekte Messung, Online-Kompensation, Automatische Kalibrierung. Günstig, da bereits vorhanden.

Zusammenfassung

- Die meisten Roboter sind ohne Weiteres ungenau
- Differenzierung zwischen Absolut, Wiederhol-, Posen- und Bahnengenauigkeit
- Auswahl geeigneter Hardware, z.B. für Sensoren
- Flexibilität durch Ressourceneffizienz: Hardware durch den Einsatz leistungsfähiger Software an die Grenzen der Leistungsfähigkeit zu bringen
- Kalibrierung und Referenzieren sind wesentliche Bausteine für die Erreichung der geforderten Leistungsdaten

4.3 Werkstücklokalisierung durch 3D-Bildverarbeitung

Problemstellung

- Heutzutage mehr Varianten und kürzere Produktionszyklen bei kleineren Losgrößen
- Reduktion der Abhängigkeit von Vorrichtungen für größere Flexibilität: Ein **Roboter-Arm** kann immer gleich bleiben, auch wenn das Werkstück wechselt. Eine Vorrichtung müsste für jedes Werkstück neu angepasst werden.
- Optische Werkstücklokalisierung: Anpassung an unterschiedliche Werkstücke durch **Softwarekonfiguration**, kürzere Rüstzeiten
- Werkstücklokalisierung ist die Bestimmung der Lage einzelner Werkstücke in einem Raum. Sowohl die Position als auch die Orientierung des Werkstücks sind relevant.
- Sie ist eine Voraussetzung für die Vereinzelnung, lagerichtige Zuführung, Palettierung und Montage von Werkstücken.
- Bei der Handhabung ist die **Geschwindigkeit** wichtiger, bei Montage und Bearbeitung die **Genauigkeit**. In allen Fällen ist die **Zuverlässigkeit** sehr wichtig.

3D-Sensorik

Sensor	Stereovision	Laufzeit 2D	Laufzeit 3D	Lasertriangulation	Punktuell messende Systeme
2D/3D	3D	2D	3D	2D	
Hinweise	Sichtbare Strukturen nötig (oder projizierte Muster)	Linienscanner	Time-of-Flight	meist Laserlinie	Marker oder Messeinheit nötig
Geschwindigkeit	schnell	schnell	ok	ok	langsam
Genauigkeit	hoch	niedrig	ok	hoch	sehr hoch
Robustheit	ok	ok	hoch	hoch	hoch
Sichtbarkeit	gut	gut	gut	gut	gut

Lokalisierungsverfahren

Objektbasiert

- Verwendung einer vollständigen **3D-Geometrie** des Werkstücks
- Beinhaltet Kanten, Kurven, Flächen und Volumen

Ansichtenbasiert

- Generierung einer **Ansichtendatenbank**, in dieser wird dann nach der gegebenen Ansicht gesucht
- Beinhaltet Formen, Merkmale, Strukturen
- Redundante Ansichten können entfernt werden, trotzdem großer Speicherbedarf
- Rechenzeit vs. Rotationsauflösung: Je mehr Ansichten, desto genauer, aber auch **langsamer**

Datengetrieben mit KI

- Funktionsweise: **CNN** (Convolutional Neural Network)
- Automatisches Einlernen über ein **CAD-Modell**
- Lagebestimmung durch heuristische (nicht-deterministische) modellbasierte Suche in Punktwolke und Modell
- Greifpunkt kann manuell oder automatisch bestimmt werden
- Kollisionsvermeidung durch Greifpunktbestimmung
- Lernen kann durch **Simulationen** und echte Daten erfolgen

Integration in Robotersysteme

- Typischerweise wird die Sensorik von einem **externen Rechner** ausgewertet. Das ist flexibel, erfordert aber zusätzliche Schnittstellen
- Eine Integration in die Robotersteuerung ist auch möglich, das wird momentan aber nur für **2D** angewandt

Auge-Hand-Kalibrierung

- Bestimmung der Transformation zwischen Kamera und Roboter
- Ziel: Korrektur von Fehlern der Sensorik und des Roboters
- Verwendet meist ein **Kalibrierungsmuster/-körper**

Hürden bei der Umsetzung

- Sensorik: Transparenzen, Glanz, Reflexionen, Schatten
- Lokalisierung: Biegeschlaffheit, bewegliche Teile (Scharniere)
- Handhabung: Verhaken/Verkleben (Trennungsstrategie?)
- Sensorbasierte Lokalisierung für Roboter führen zu Aneinanderreihung vieler **Einzeltoleranzen**
- Ursachenfindung bei Ungenauigkeiten ist schwierig → **Komponententests**

Umsetzungsbeispiele

- Griff in die Kiste
- Lokalisierung von Waren in der Logistik
- Bearbeitung von Werkstücken

4.4 Qualitätsverbesserung durch sensorgeführte Industrieroboter

Bedeutung von sensorgeführten Bewegungen von Robotern

- Wandlungsfähigkeit und Flexibilität
- Produktivitätssteigerung
- Onlineadaptation: Assistenzroboter in der Produktion
- Typische Einsatzgebiete: Schweißen, Bearbeiten, Montage, kooperative Robotik, Programmierung durch Demonstration

Etablierte Anwendungen von sensorbasierter Bewegungsführung

- **Nahtverfolgung beim Schweißen:** Anpassung an Toleranzen/Materialfehlern
- **Kamerageführtes Bohren:** Hohe Genauigkeitsanforderungen
- **Endeffektortracking:** Anpassung an Lageabweichungen

Herausforderungen bei der Integration von Sensoren in den Regelkreis

- Einschränkung der Orientierung
- Fehlende Simulation
- Keine Standard-Kommunikation
- Zykluszeit
- Genauigkeit der Lagebestimmung
- Achsraum vs. kartesischer Raum
- Robustheit der Echtzeit

Innovative Anwendungen

- **Programmierung durch Handführung/Vormachen:** Intuitive Programmierung
- **Kraftgeregelte Roboter:** Montage, Schleifen, Polieren
- **Kompensation der Verformung:** Vorhersage der Verformung und Vorsteuerung

Zusammenfassung

- Nur die Erweiterung von Robotern um Sensorsysteme ermöglicht den produktiven Betrieb bei Prozessen wie **Bahnschweißen, Bearbeiten und Montage**
- Führung von Robotern durch lokale Messung ermöglicht die Anpassung an das Bauteil, kann dadurch Unsicherheiten in der nominellen Geometrie berücksichtigen und erhöht damit die **Flexibilität der Anlage**
- Globale Genauigkeitssteigerung durch zusätzliche Winkelgeber Oder externe Messung erhöht die **Positionier- und Bahngenauigkeit von Industrierobotern**. Dadurch wird die **Qualität des Prozesses erhöht** und auch anspruchsvolle Prozesse können mit Robotern realisiert werden.

5.1 Planung von Automatisierungslösungen

Gründe für die Automatisierung

- **Kostenreduktion:** Reduzierung von Personalkosten, Energiekosten, Materialkosten, Entsorgungskosten
- **Qualitätssteigerung:** Reduzierung von Fehlern, Verbesserung der Prozessstabilität
- **Erhöhung der Produktivität:** Reduzierung von Durchlaufzeiten, Erhöhung der Ausbringungsmenge
- **Verbesserung der Arbeitssicherheit:** Reduzierung von Unfällen, Reduzierung von gesundheitsschädlichen Tätigkeiten

Herausforderungen der Automatisierung

- Umgebung erfassen
- Gegenstände vereinzeln, greifen, transportieren
- Toleranzen ausgleichen
- Prozesssicherheit gewährleisten
- Taktzeiten einhalten
- Integrieren von Modulen und Anlagen

→ Es werden strukturierte Entwicklungsprozesse zur Beherrschung der Gesamtkomplexität benötigt.

4 Projektphasen

1. **Potenzialanalyse** liefert identifizierte Prozesse mit technischem und wirtschaftlichem Potential
2. **Konzeption** liefert systematisch erarbeitetes Detailkonzept
3. **Machbarkeitsuntersuchung** stellt sicher, kritische Teilfunktionen durch Versuche abgesichert sind
4. **Realisierung** liefert eine umgesetzte Automatisierungslösung

Vorgehensweise Potenzialanalyse

- Begehung der Produktionsstätte durch Experten
- Bewertung der technischen Eignung aller Prozesse anhand der 4 Charakteristiken:
 - Vereinzeln
 - Handhaben
 - Positionieren
 - Fügen
- Evaluierung möglicher Einsparungen (manueller Arbeitsinhalt)

Vorgehensweise Konzeption ("7 Schritte")

1. Klären und Präzisieren der Anwendungsziele
2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen
3. Suche nach Lösungsprinzipien
4. Gliederung in realisierbare Teilaufgaben
5. Gestaltung maßgebender Module
6. Machbarkeitsuntersuchung
7. Gestaltung Gesamtsystem

Vorgehensweise Machbarkeitsuntersuchung

- Simulation und Testaufbauten
- Abläufe analysieren und optimieren
 - Analyse der Erreichbarkeiten
 - Materialzuführung
 - Prozessgenauigkeit
 - Prozesskräfte
 - Taktzeiten
 - Platzbedarf
 - ROI (Return of Investment)

Vorgehensweise Realisierung ("9 Schritte")

1. Initialisierung
2. Ausschreibung
3. Bewertung technischer Konzepte
4. Projektdefinition
5. (virtuelle Inbetriebnahme)
6. Aufbau und Inbetriebnahme
7. Aufbau und Inbetriebnahme (vor Ort)
8. Ramp-Up (Produktionsanlauf)
9. Start of Production (SOP)

5.2 Sicherheit und Arbeitsschutz für Roboteranlagen

Sicherheitsaspekte bei der Anlagenentwicklung

Ziele und Definitionen von Sicherheitsbetrachtungen

- **Sicherheit einer Maschine:** Fähigkeit einer Maschine, ihre vorgesehene Funktion während ihrer Lebensdauer auszuführen, wobei das **Risiko** hinreichend verringert wurde
- **Risiko** = Schadensausmaß · Eintrittswahrscheinlichkeit

CE-Kennzeichnung und Überblick über die Normung

- **CE-Zertifizierung** ist Pflicht für Maschinenhersteller
- Mit ihr wird bestätigt, dass
 - die Maschine den grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen der EG-Richtlinien entspricht
 - ein durch die EG-Richtlinien vorgeschriebenes Konformitätsbewertungsverfahren durchgeführt wurde
 - die vorgeschriebene Dokumentation erstellt und ein Dokumentationsverantwortlicher benannt wurde
- **Maschinenrichtlinie 2006/42/EG** stellt Anforderungen an die Sicherheit und Gesundheitsschutz
- Die Durchführung einer **Risikobeurteilung** zur Feststellung aller mit dem Betrieb der Maschine verbundenen Risiken ist der zentrale Arbeitspunkt für den Nachweis einer Konformität mit der Maschinenrichtlinie
- Ein Roboter allein ist keine vollständige Maschine, sondern ein Maschinenbauteil, daher ist die **CE-Kennzeichnung** nicht für den Roboter selbst, sondern für die gesamte Anlage erforderlich → Die Verantwortung für die **CE-Kennzeichnung** liegt beim Integrator

Vorgehen zur Gewährleistung der Anlagensicherheit

Iterativer Prozess, bei dem jede Lösung auf ihre Gefährdungen überprüft wird. Wenn die Risiken nicht akzeptabel sind, muss die Lösung angepasst werden.

1. Entwurf der Maschine

2. Definition der Maschinengrenzen: Definiert Umfang der Analyse

3. Identifikation der Gefährdungen: Alle Tätigkeiten in allen Lebenszyklusphasen der Maschine, auch Fehlbedienungen

4. Risikobeurteilung: Risiko = Schadensausmaß · Eintrittswahrscheinlichkeit → Risikomatrix oder Risikograph

- **Schadensausmaß:** Schwere der Verletzung
- **Eintrittswahrscheinlichkeit:** Wahrscheinlichkeit, dass die Gefährdung eintritt
- **Risikomatrix:** Einteilung in Risikoklassen
- **Risikograph:** Einteilung in Risikostufen nach Schwere, Häufigkeit und Vermeidbarkeit

5. OK?: Wenn nein, (6.) Wenn ja, (7.)

6. Risikominderung: Verringerung des Risikos durch

- Inhärent sichere Konstruktion
- technische Schutzmaßnahmen
- organisatorische Schutzmaßnahmen (z.B. Schulung)
- weiter mit (2.)

7. Ende

Häufige Probleme mit kollaborativen Robotern

- Nutzung nicht sicherer Funktionen für die Risikominderung (Langsamfahrt)
- Vergessen des Werkzeugs als Gefährdung
- Weiche Umhüllungen des Arms hilft wenig, wenn das Werkzeug scharfkantig ist
- Möglichkeit der Kollision mit dem Kopf sorgt für sehr niedrige Kraftgrenzwerte/Geschwindigkeiten → unbrauchbare Taktzeiten

→ Kollaborativer Betrieb rechnet sich in speziellen Anwendungen, ist aber nicht immer die beste Lösung

Gefährdungsbeurteilung und Einteilung von Schutzmaßnahmen

Es wird vom Betreiber erwartet, dass er sicherstellt:

- Eignung der Maschine für den vorgesehenen Verwendungszweck
- Definition und Umsetzung von Schutzmaßnahmen nach dem **TOP-Prinzip** (Technische, Organisatorische, Personenbezogene Maßnahmen)
- Bedienungsanleitung und Schulung des Bedienpersonals (v.a. mit Hinblick auf die Gefahren, die von der Maschine ausgehen)
- Festlegung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen

5.3 Wirtschaftlichkeit von Roboteranlagen

- Roboter stellt selbst nur einen kleinen Teil der Anlage dar
- Wesentliche Kostenblöcke:
 - **Engineering**
 - **Vorrichtungen**
 - **Werkzeuge**
 - **Inbetriebnahme**
- Robotersysteme sind meist Sondermaschinen
- **Lebenszyklusbetrachtung:** Kosten sollten übr alle Phasen des Lebenszyklus betrachtet werden. Problem: Datenlage.

Lebenszyklusphasen

1. **Entwicklung und Integration:** Kosten im Verhältnis zu den Gesamtkosten gering, aber größter Einfluss auf die später entstehenden Kosten
2. **Inbetriebnahme:** Häufig technische Probleme.
3. **Produktionsphase:** Meist Gegenüberstellung von Kostenersparnis durch die Anlage. Anlage lohnt sich meist nach 2-3 Jahren.
4. **Reparatur und Wartung:** Typischerweise 2-5% der Anschaffungskosten
5. **Umrüstung:** Heutige Anlagen sind meist nicht auf Umrüstung ausgelegt. Umrüstungskosten sind schwer zu kalkulieren.
6. **Stilllegung und Entsorgung:** Kosten sind schwer zu kalkulieren.

Zusammenfassung

Bei der Planung von roboterbasierten Automatisierungen bietet die strukturierte Planung entscheidende Vorteile:

- Der Planungsprozess folgt klaren Richtlinien
- Beim Gesamtsystem und bei allen Teilsystemen werden alle möglichen Lösungen betrachtet

Für die sichere Planung kommt den folgenden Aspekten entscheidende Bedeutung zu:

- **Greiferauswahl und zugehörige Machtarbeitsanalysen**
- **Sensorauswahl und zugehörige Machtarbeitsanalysen**
- **Berücksichtigung von zusätzlichen Kosten zur Anpassung der bestehenden IT-Infrastruktur**
- **Anpassung des bestehenden Prozesses bei Integration der Roboterlösung**

5.4 Inbetriebnahme und Abnahme

Phasen der Entwicklung von Robotersystemen:

1. **Ideenphase:** Konkrete IProjektidee, Vorstudie und Machbarkeitsstudie
2. **Analysephase:** Lastenheft, Grobkonzeption, Kalkulation, Pflichtenheft, Vertragsverhandlungen
3. **Planungsphase:** Kick-off-Meeting, Auswahl der Projektpartner, Feinkonzeption, Konstruktions- und Fertigungsfreigabe
4. **Implementierungsphase:** Softwareimplementierung, Hardwareaufbau, Zwischenevaluierung, Arbeit an Projektplänen & Anpassungen, **Inbetriebnahme, Test&Debugging**
5. **Endphase:** Vorabnahme, **Inbetriebnahme beim Kunden, Endabnahme**, formaler Abschluss

Inbetriebnahme

- ungeplante Tätigkeiten zur Behebung von Störungen
- parallel Arbeit nur eingeschränkt möglich
- wenn möglich, **Inbetriebnahme in Baugruppen**
- Planung nur bedingt möglich
- **Steuerung der Inbetriebnahme:** Bei Planabweichungen kleine Korrekturen, bei großen Abweichungen Plananpassung

Endphase

- Erst jetzt kann die Systemfunktionalität vollständig geprüft werden
- vor der Abnahme ist klar zu definieren, was zu prüfen ist, wie geprüft wird, worauf geachtet wird...

7.1 Sensorgesteuerte Robotik

- Man kann zwischen kollaborativen und industriellen Robotern unterscheiden
- Die Sensorik kann dann entweder im Roboter oder in der Umgebung angebracht sein, spezieller am Endeffektor oder in den Gelenken
- Bei der **Admittanzregelung** wird der Roboter so gesteuert, dass er eine bestimmte nachgiebige Anpassung an externe Kräfte oder Bewegungen aufweist. Dies ermöglicht eine flexible Interaktion des Roboters mit seiner Umgebung, was besonders nützlich ist, wenn er mit Menschen zusammenarbeitet. Die Admittanzregelung passt die Dynamik des Roboters an die Umgebungsbedingungen an und ermöglicht eine geschmeidige Reaktion auf äußere Einwirkungen.
- Im Gegensatz dazu zielt die Impedanzregelung darauf ab, die mechanische Steifigkeit des Roboters zu definieren, wodurch der Roboter als steifes und stabiles System agiert. Dies ist besonders wichtig in präzisen Fertigungsanwendungen, bei denen der Roboter genaue Positionen und Kräfte beibehalten muss. Die Impedanzregelung sorgt dafür, dass der Roboter die ihm vorgegebenen Kräfte und Positionen genau beibehält und weniger nachgiebig auf äußere Einflüsse reagiert. Beide Ansätze haben ihre Anwendungen in verschiedenen Industriezweigen, abhängig von den spezifischen Anforderungen der Aufgaben, die der Roboter bewältigen soll.
- Die Impedanzregelung kann die Kräfte am Endeffektor nur indirekt bestimmen und ist daher für die direkte Interaktion mit der Umgebung weniger geeignet.
- Die Admittanzregelung erlaubt dies, sie ist dafür aber deutlich teurer und komplexer.

7.2 Closed-Loop-Benchmarking

Bestandteile: Industrieroboter, Sensorik, Runtime trajectory recognition/adaptation

Performance-Kriterien

- **Bewegung:** Bandbreite, relative Maximalgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsauflösung
- **Operation Characteristics:** Genauigkeit (anhand Tracking-Fehler), Wiederholgenauigkeit, Glattheit
- **Sprungantwort:** Überschwingen, Anstiegszeit, Ausregelzeit, bleibende Abweichung
- **Hardware-Belastung:** Vibrationen

6.1 Zusammenfassungsvorlesung

Roboterdefinition

- Nach ISO 8373: Ein Roboter ist ein programmierbarer Manipulator mit drei oder mehr Achsen für industrielle Anwendungen
- Roboter erzeugen automatisch eine durch ein Programm beschriebene Bewegung, so dass sich einmal festgelegte Abläufe ohne Personaleinsatz reproduzieren lassen
- Der Roboter ist eine universell einsetzbare Maschine, die für verschiedene Prozesse verwendet werden kann

Roboterzelle

- Roboter (mechanische Struktur)
- End-Effektor (Greifer Oder Werkzeug)
- Steuerungstechnik (Roboter, Zelle, Sicherheit, Anbindung an übergeordnete Leittechnik)
- Sicherheitseinrichtung
- Zuführ-, Vereinzelungs-, Bereitstellungseinrichtungen
- Sensorik

Grundlagen Roboter

Kinematik	Serielle Roboter			Parallele und andere Roboter
Bauform	Knickarm	SCARA	Portal	Delta, Seilroboter
Vorteile	Zugänglichkeit, Beweglichkeit, Traglast		Sehr große Reichweite und Nutzlast	Hohe Steifigkeit, Genauigkeit, Dynamik
Nachteile	Mäßige abs. Genauigkeit	eingeschränkte Beweglichkeit, kleiner Arbeitsraum, kleine Traglast		
Typische Prozesse	Schweißen, Kleben, handling	Montage, Pick&Place	Pick&Place, Regalbedienung, Kommissionierung	Pick&Place, Sonderaufgaben
Traglast [kg]	5-1000	0.5-5	0.5-X000	0.5-X000
Dynamik	mittlere Geschw. und Beschl.	sehr große Geschw. und Beschl.	je kleiner, desto schneller	sehr große Geschw. und Beschl.

End-Effektoren

- Ein Endeffektor ist die Funktionseinheit eines Robotersystems, die den zu automatisierenden Prozess bewirkt
- Der Prozess bestimmt den Endeffektor
- Ein Endeffektor ist das Bindeglied zwischen Roboter und Werkstück und ist am Flansch des Roboters angebracht
- Endeffektoren lassen sich einteilen in
 - Greifer
 - Werkzeuge
 - Mess- und Prüfmittel
- Die Entwicklung oder Auswahl von Greifern und Werkzeugen unterliegt vielen Einflussfaktoren
- Einfache Aufgaben: es existieren Komponenten und Baukästen. Immer ist mindestens die Auswahl und Integration notwendig.
- Komplexere Aufgaben: Oft Sonderanfertigung oder komplette Neuentwicklung

→ Greifer und Werkzeuge sind Anpass- oder Sonderkonstruktionen

Steuerungstechnik

- Die Steuerung beinhaltet die Überwachung, den Betrieb, die Kommunikation und die Bedienung des Robotersystems
- Sie baut auf auf den Anwender, den Roboter und den Prozess
- Die Steuerungstechnik einer Anlage muss vorab sorgsam geprüft werden
- Robotersteuerungen sind zum Betrieb einer einfachen Roboterzelle ausreichend
- Erweiterung um eine übergeordnete Soft-SPS erhöht Flexibilität und Größe der Zellensteuerung
- Erweiterung um Technologiepakete erlaubt die Beeinflussung der Roboterbewegung

Programmierung

1. Abbilden der Roboterzelle in einem CAD-Programm (Herstellerdatenbank für Roboter, CAD-Modelle des Werkstücks und der Zelle)
2. Definieren der Bewegungen und des Prozessablaufs
3. Definieren der I/Os und der Parameter
4. Simulation auf Kollisionen, Erreichbarkeit, Taktzeiten, ...
5. Exportieren des Programms in die Robotersteuerung
6. Laden des Programms in die Robotersteuerung
7. Testen des Programms und ggf. Anpassen

Toolkits und Software-Integration

- Komplexe Roboteranlagen benötigen vielfältige Integration von Sensorik, Komponenten und Algorithmen
- Hohe Wiederverwendbarkeit von Entwicklungen senkt mittelfristig Entwicklungskosten
- Entwicklung von Wiederverwendbaren Komponenten erzeugt allerdings zusätzlichen Aufwand
- Middlewares werden für die Integration benötigt und helfen auf wettbewerbsrelevante Entwicklungen zu fokussieren
- Umstellung auf und Einstieg in neue Middlewares kostet Zeit und Energie

Kalibrierung von Robotern

1. Mathematisches **Robotermodell**
2. Auswahl der wichtigsten Modellparameter
3. Auswahl der **Messposen** (Ziel: gute numerische Kondition/Rauschunterdrückung, einfacher Messaufbau)
4. Anfahren der verschiedenen Roboterposen
5. **Messgrößenerfassung**
6. Berechnung der zugehörigen Modellwerte
7. **Parameteridentifikation** durch Minimierung der Fehlerfunktion
8. **Anpassung** der Parameter in der Steuerung

Strukturierte Vorgehensweise beim Planen (VDI 2221)

1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung (liefert: Anforderungsliste)
2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen (liefert: Funktionsstrukturen)
3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen (liefert: prinzipielle Lösungen)
4. Gliedern in realisierbare Module (liefert: modulare Strukturen)
5. Gestalten der maßgebenden Module (liefert: Vorentwürfe)
6. Gestalten des gesamten Produkts (liefert: Gesamtentwurf)

Sicherheit von Robotern

Iterativer Prozess, bei dem jede Lösung auf ihre Gefährdungen überprüft wird. Wenn die Risiken nicht akzeptabel sind, muss die Lösung angepasst werden.

1. **Entwurf der Maschine**

2. **Definition der Maschinengrenzen:** Definiert Umfang der Analyse

3. **Identifikation der Gefährdungen:** Alle Tätigkeiten in allen Lebenszyklusphasen der Maschine, auch Fehlbedienungen

4. **Risikobeurteilung:** Risiko = Schadensausmaß · Eintrittswahrscheinlichkeit → Risikomatrix oder Risikograph

- **Schadensausmaß:** Schwere der Verletzung
- **Eintrittswahrscheinlichkeit:** Wahrscheinlichkeit, dass die Gefährdung eintritt
- **Risikomatrix:** Einteilung in Risikoklassen
- **Risikograph:** Einteilung in Risikostufen nach Schwere, Häufigkeit und Vermeidbarkeit

5. **OK?:** Wenn nein, (6.) Wenn ja, (7.)

6. **Risikominderung:** Verringerung des Risikos durch

- Inhärent sichere Konstruktion
- technische Schutzmaßnahmen
- organisatorische Schutzmaßnahmen (z.B. Schulung)
- weiter mit (2.)

7. **Ende**