

# 1. Einleitung

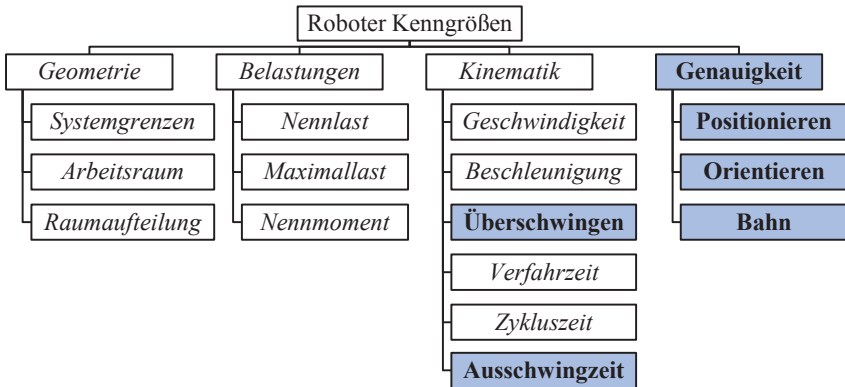


Abbildung 1.1.: Kenngrößen eines Roboters nach VDI 2861 [Ver88]

Ein zentrales Ziel des Wirtschaftsprojekts Industrie 4.0 für den Standort Deutschland ist die zunehmende Digitalisierung der Wirtschaft. Dadurch können schnellere Entwicklungszyklen und bessere Produkte gewährleistet werden. Dies umfasst nicht nur das Prozessmanagement und die Datenverarbeitung, sondern auch eine Umstellung in Forschung und Entwicklung. Es bedeutet für den Maschinen- und Anlagenbau einen wichtigen Schritt weg vom aufwendigen, realen Prototypenbau und den zeitraubenden Trial-and-Error-Versuchen hin zum digitalen Schatten als komplexes Planungsmodell. Dieses kann über alle Entwicklungsstufen bis hin zur späteren Wartung dynamisch bearbeitet und angepasst werden und ermöglicht schnelle Optimierungen. So kann ressourcenschonend, kosteneffizient, interdisziplinär und zeitsparend gearbeitet werden.

Die Erstellung digitaler Modelle im Maschinenbau erfolgt als Simulation. Eine Simulation ist immer eine abstrakte Darstellung der Realität, die es erlaubt, sich auf bestimmte Parameter zu konzentrieren und dabei weniger relevante oder komplexere Themen auszublenden. Dies hat dazu geführt, dass für die Simulation von Robotern bei einigen Kenngrößen, wie der Geometrie oder den Belastungen bereits auf sehr gute Modelle zurückgegriffen werden kann (s. Abbildung 1.1). Allerdings lassen sich andere Eigenschaften, wie zum Beispiel das Schwingungsverhalten bisher nur unzureichend modellieren. Dies führt zu ungenauen Modellen hinsichtlich der Positionierung und des Bahnfahrverhaltens.

Bisher wurde das Schwingungsverhalten meist über Regelungsalgorithmen [Mob10] und Trajektoriengenerierung [Rei10] optimiert. Durch gezielte Gestaltung des magnetischen Kreises der Ständerwicklung von permanent-erregten Synchronmotoren oder durch adaptive Störgrößenkompensation lassen sich Schwingungsanregungen durch Pol- und Nutrastmomente verringern [Mai11].

Dabei wurde nur wenig auf die Mechanik des Roboters geachtet (s. Abbildung 1.2). In dieser Arbeit wird ein Modell entwickelt, das die Einflüsse aller mechanischen Bauteile, wie Wälzlager, Antriebsstrang, Strukturteile und Verkabelung auf das Schwingungsverhalten abbildet. Mit Hilfe dieses Modells können gezielt Optimierungen an den Komponenten durchgeführt werden.

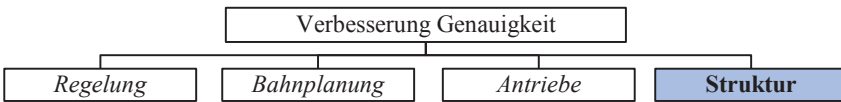


Abbildung 1.2.: Maßnahmen zur Verbesserung der Genauigkeit eines Industrieroboters

Als Arbeitsgrundlage dient ein Industrieroboter mit serieller Kinematik, sechs Freiheitsgraden und rotatorischen Gelenken. Dieser Robotertyp wird vorzugsweise im Automobil- und General-Industry-Bereich eingesetzt und hat damit einen Marktanteil von ca. 65% [LM18]. Während die Modellierung der einzelnen Komponenten in Modelica erfolgt, werden die Messreihen zur Validierung an einem KUKA KR 6 R 900 sixx Roboter durchgeführt.

## 2. Stand der Technik

Zur besseren Einordnung des Themas erfolgt vorab ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Modellierung von Industrierobotern und deren Komponenten. Im Anschluss werden die Erkenntnisse im Hinblick auf die Anwendung in einem Modell diskutiert.

### 2.1. Modellierung serieller Roboter

In diesem Abschnitt erfolgt eine Darstellung von üblichen Vorgehensweisen zur Modellierung von Industrierobotern, die das Schwingungsverhalten beschreiben. Pro Modellierungsansatz und Typ erfolgt beispielhaft eine Nennung. Meist existieren deutlich mehr Publikationen, die ähnliche Sichtweisen und Ansätze zeigen.

In [PA94] erfolgt die Modellierung der kinematischen Glieder eines aktuierten Zweischlags mit Drehgelenken als Euler-Bernoulli-Balken. Mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens wird die Balkengeometrie bestimmt, wobei die bewegte Masse minimiert und die Bahnengenauigkeit auf Referenztrajektorien maximiert wird. Antriebsstränge und Anregungen werden nicht modelliert.

Eine detailliertere Modellierung eines Zweischlags ist in [HS12] beschrieben. Die kinematischen Glieder sind mit dem Ansatz des Floating Frame of Reference modelliert und mit diesem Modell werden für Referenztrajektorien Schnittreaktionen berechnet. Mit diesen Lastkollektiven erfolgt eine Topologieoptimierung zur optimalen mechanischen Gestaltung der kinematischen Glieder. Als Kriterien der Topologieoptimierung werden die Minimierung mechanischer Spannungen, die statische Nachgiebigkeit und die Eigenfrequenz verwendet. Die Systemdynamik des Antriebsstrangs und das Anregungsverhalten werden nicht modelliert.

Auf Basis eines Finite-Elemente Modells der kinematischen Glieder eines seriellen Fünffachsroboters erfolgt eine steifigkeitsbasierte Dimensionierung für die Fräsbearbeitung [DBL17]. Dabei werden zuerst verschiedene Konzepte und die Wahl der Gelenktypen (rotatorisch oder translatorisch) im Hinblick auf die Anwendung in Bearbeitungsprozessen evaluiert. Danach erfolgt eine iterative Entwicklung der Strukturteile durch FEM-basierte Modelle unter Vorgabe von Schnittreaktionen in den Gelenken aus repräsentativen Bearbeitungsprozessen in verschiedenen Roboterpositionen. Basierend auf der Starrkörperbewegung werden die Antriebe dimensioniert, wobei Torsionsschwingungen und das Anregungsverhalten nicht berücksichtigt werden.