

Digitaler Zwilling für das dynamische Verhalten eines Industrieroboters, Anwendung im Kontext des Projektes CUBE

Projekt CUBE – Überblick

Forschungsprojekt CUBE: Arbeitsraumabhängige, zustandsraumbasierte Vorsteuerung von Industrierobotern zur Genauigkeitssteigerung.

Projektpartner sind die Technische Universität Chemnitz und Dr. Binde Ingenieure GmbH.



Industrieroboter (IR) sind gekennzeichnet durch deutlich geringere Positions- und Wiederholgenauigkeiten als Werkzeugmaschinen. Die Ursachen dafür sind in der arbeitsraumabhängigen und geringen Steifigkeit der kinematischen Struktur eines IR zu finden, die zu niederfrequenten Schwingungen führen.

Projekt CUBE – Überblick

Das Forschungsprojekt adressiert einen progressiven Ansatz zur Kompensation statischer und dynamischer Fehler an einem IR ohne den Einsatz zusätzlicher Messtechnik oder externer IT.

Entwicklungsziel ist eine arbeitsraumabhängige Kompensation von Fehlern mittels antriebsinterner Filter.

Das Projekt kann in drei Teilaufgaben unterteilt werden:

- Identifizieren des Industrieroboters in verschiedenen Positionen (Posen) mittels Messung und Simulation
- Ermitteln von positionsabhängigen Vorsteuerparametern
- Implementieren der positionsabhängigen Vorsteuerparameter in die Steuerung des Industrieroboters

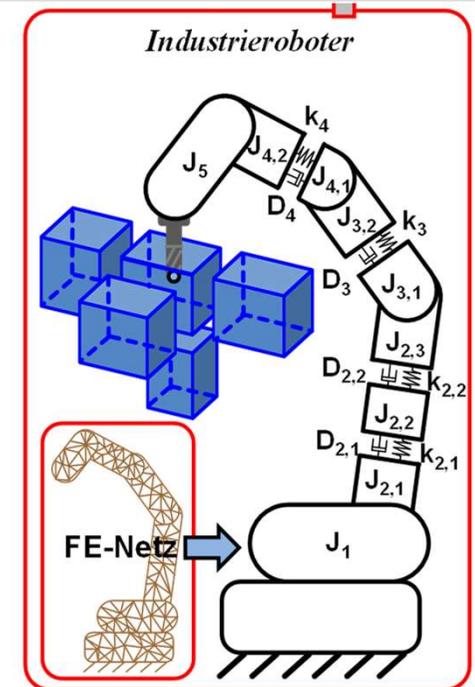


Abbildung 1: Projekt CUBE

Ausgangspunkt:

- 6-Achs Roboter Comau NJ130 2.05 mit NC Steuerung
- Einstelldaten der NC Steuerung
- CAD des Roboters, Materialeigenschaften, Massen, Steifigkeiten

Zielstellung:

- Modellierung eines digitalen Zwillings für das dynamische Verhalten des Industrieroboters

Umsetzung:

- Modellierung der mechanischen Regelstrecke mittels Simcenter 3D (FEM)
- Simulation des Gesamtsystems (Roboter mit Kaskadenregelung) mit Matlab Simulink (Systemsimulation)

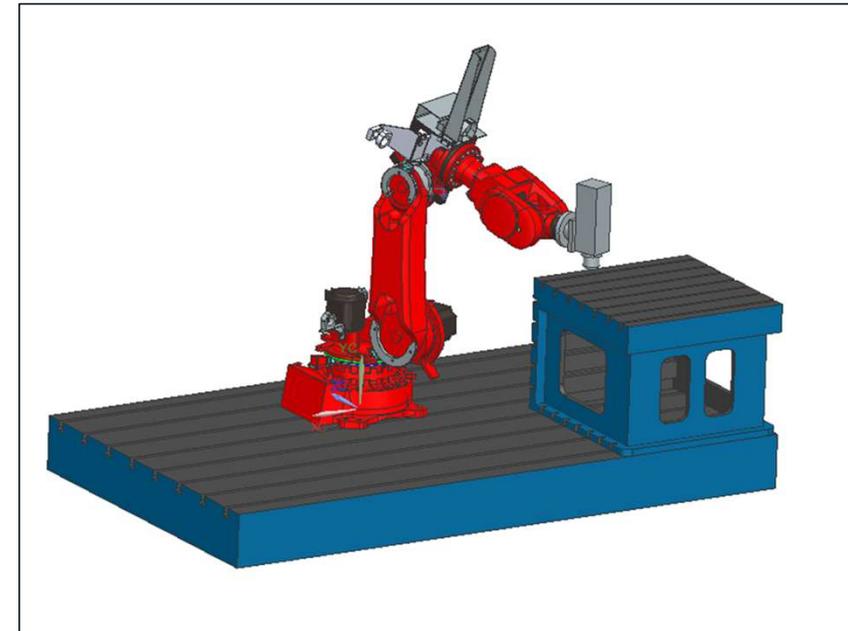


Abbildung 2: CAD Geometrie Roboter Comau

CAD-Daten des Roboters:

- Grundgestell mit Aufstellelementen inklusive Aufspanntisch und Montageplatte entsprechend der Aufstellsituation des Roboters
- Auf dem Grundgestell mit Montageplatte ist der Roboter verschraubt
- Die einzelnen Arme sind drehbar gelagert, serielle Anordnung
- Die Antriebsstränge bestehen jeweils aus Servomotoren und Getrieben
- Arbeitsspindel

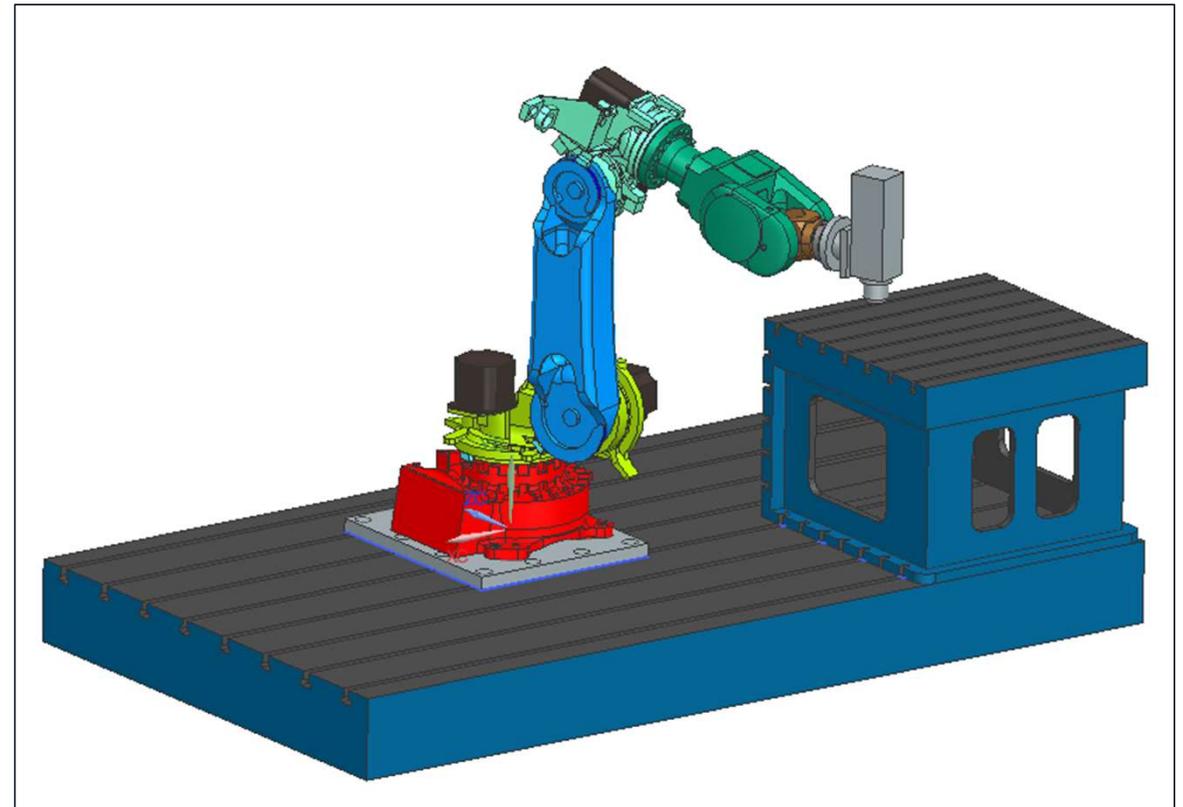


Abbildung 3: Idealized Geometry Roboter Comau

Modellierung der mechanischen Regelstrecke als finite Elemente Modell mit Simcenter 3D:

Fem File:

- Der Industrieroboter wird mit seinen Strukturteilen detailliert 3-dimensional abgebildet. Die Vernetzung erfolgt mit CTETRA(10) Elementen.
- Die Lagerungen werden mit Federelementen und Rigid-Elementen abgebildet. CBUSH und RBE3 Elemente werden verwendet.
- Die Antriebsstränge werden als Feder-Masse-Systeme abstrahiert. Aufgrund fehlender Detailinformationen mussten Motor und Getriebe zusammengefasst werden.

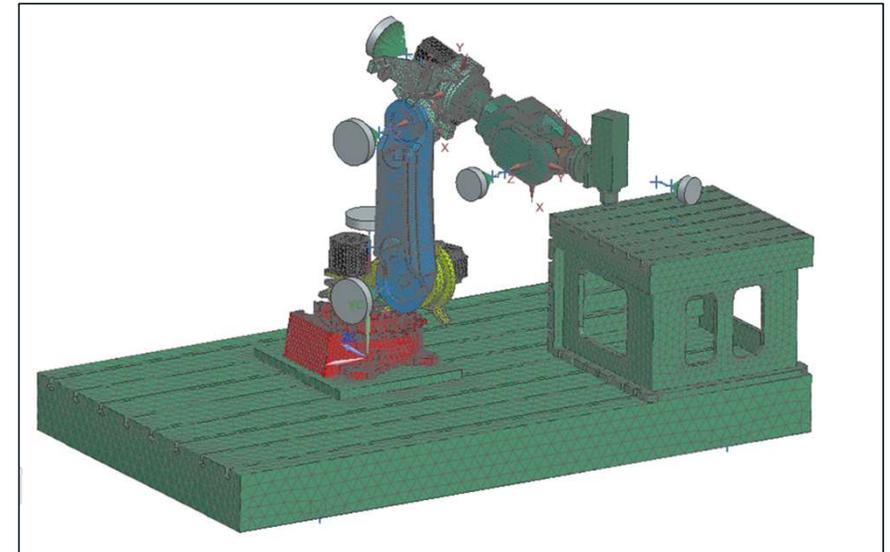


Abbildung 4: FEM Modell Roboter Comau

Modellierung der mechanischen Regelstrecke als finite Elemente

Modell mit Simcenter 3D:

Sim File:

- Die Antriebsstränge werden durch eine Manual Coupling zwischen dem jeweiligen Gegenlager und der Einleitung am Arm eingebunden.
- SOL103 REAL EIGENVALUES
 - Motor frei (Resonanz)
 - Motor geklemmt (Tilger, Blocked Rotor Frequency)
- SOL103 FLEXIBLE BODY
 - Export Options für Matlab, Typ: Statespace
 - Eingänge und Ausgänge werden definiert. Dies geschieht mittels DOF Sets (Typ USET)
 - Modale Dämpfung

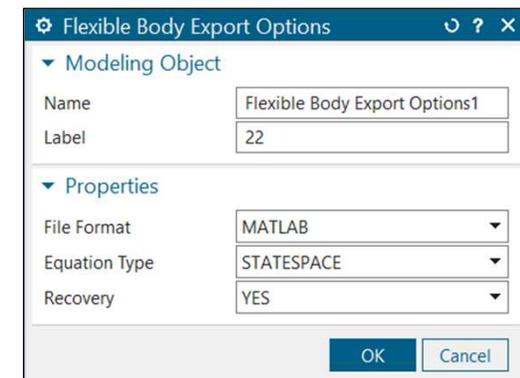
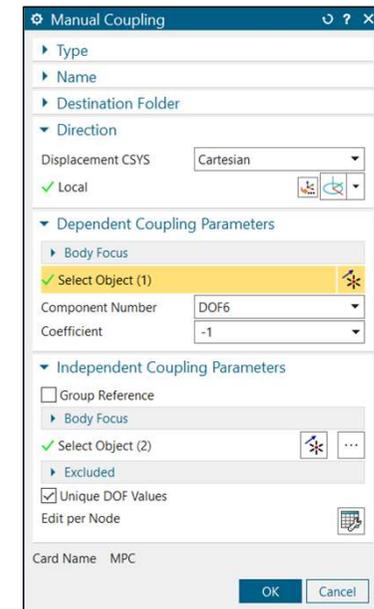


Abbildung 5: Features im Sim File Roboter Comau

Ergebnisse der FEM Simulation:

- SOL103 REAL EIGENVALUES: Untersuchung der Eigenmodes der Resonanzen (mit freien Motoren) und Tilger (mit fixierten Motoren).
 - Plausibilität des Simulationsmodelles überprüfen
 - Die Eigenwerte und Animationen der Eigenmodes werden gemeinsam mit den in der Systemsimulation ermittelten Pol- und Nullstellen zur Interpretation der Mechanik und des Gesamtsystems verwendet.

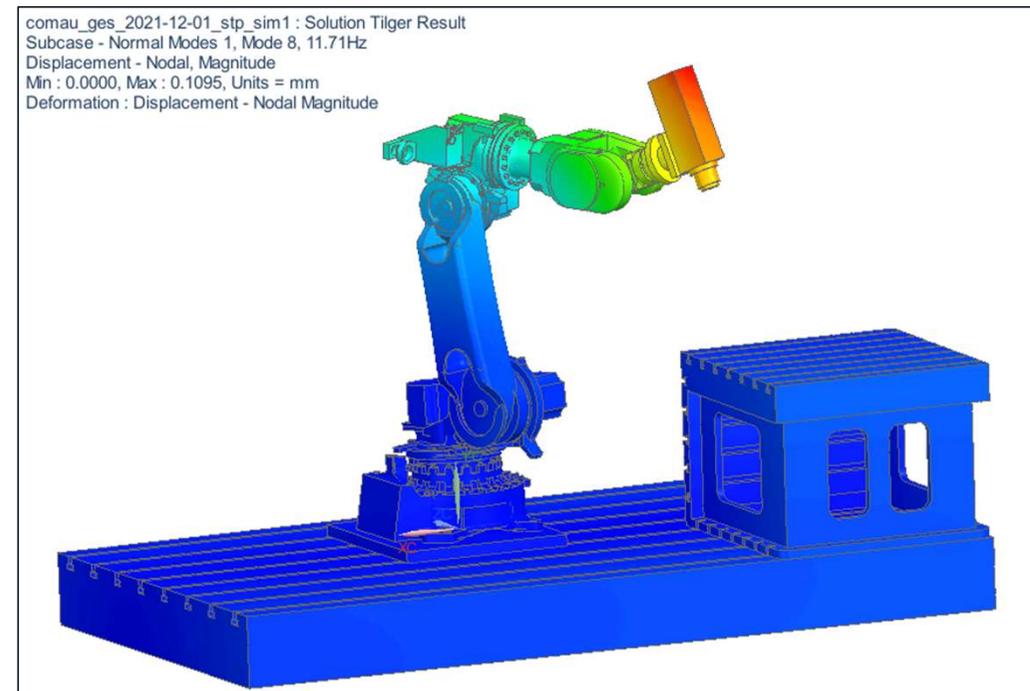


Abbildung 6: Postprocessing Eigenmode Roboter Comau

Ergebnisse der FEM Simulation:

- SOL103 FLEXIBLE BODY: Die mechanische Regelstrecke des Industrieroboters wird in der Zustandsraumdarstellung ermittelt.
- Das ausgegebene Format ist ein Matlab m-File.
- Der m-File wird in der Systemsimulation verwendet, er wird als Repräsentation der mechanischen Regelstrecke in das Gesamtsystem eingebunden.

```
%  
% Input (U7) Degrees of Freedom  
clear U7DOF  
U7DOF=[ 1 13 25 37 47 57 77 77 77 78 78 78;  
        6 6 6 6 6 6 1 2 3 1 2 3]';  
%  
% Output (U8) Degrees of Freedom  
clear U8DOF  
U8DOF=[ 1 5 6 13 17 18 25 29 30 37 47 57 77 77 77 78 78 78;  
        6 1 1 6 1 1 6 1 1 6 6 6 1 2 3 1 2 3]';  
%  
% State Space [A] Matrix  
clear A11 A12 A21 A22 AMAT  
A11=[ -8.282401796530793E-03  0.000000000000000E+00  0.000000000000000E  
       0.000000000000000E+00 -4.306945789969382E-03  0.000000000000000E+00  
       0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00 -2.354047090031036E-03
```

Abbildung 7: m-File Zustandsraumdarstellung Roboter Comau

Modellierung des Gesamtsystems in Matlab

Simulink:

- Modellierung der Kaskadenregelung für alle 6 Achsen.
- Einbindung der mechanischen Regelstrecke des Industrieroboters (Zustandsraumdarstellung, ermittelt in Simcenter 3D) in das Gesamtsystem
- Anschließen von Eingängen und Ausgängen.
- Mit der Systemsimulation können Frequenzgänge, Übertragungsfunktionen und Sprungantworten des Industrieroboters ermittelt werden.

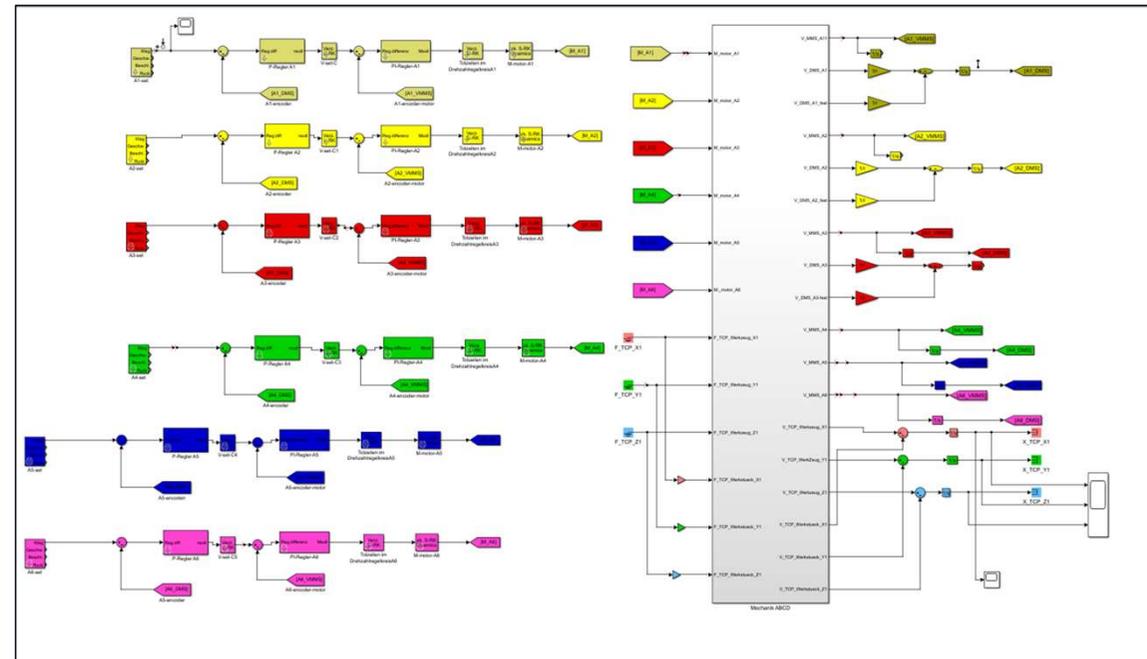


Abbildung 8: Systemsimulationsmodell Roboter Comau

Ergebnisse:

- Mit Hilfe der Übertragungsfunktionen und Frequenzgänge kann der Industrieroboter identifiziert werden.
- Simulationen:
 - Drehzahlregelstrecke
 - Geschwindigkeitsfrequenzgang
 - Dynamische Steifigkeit
 - Positioniervorgang

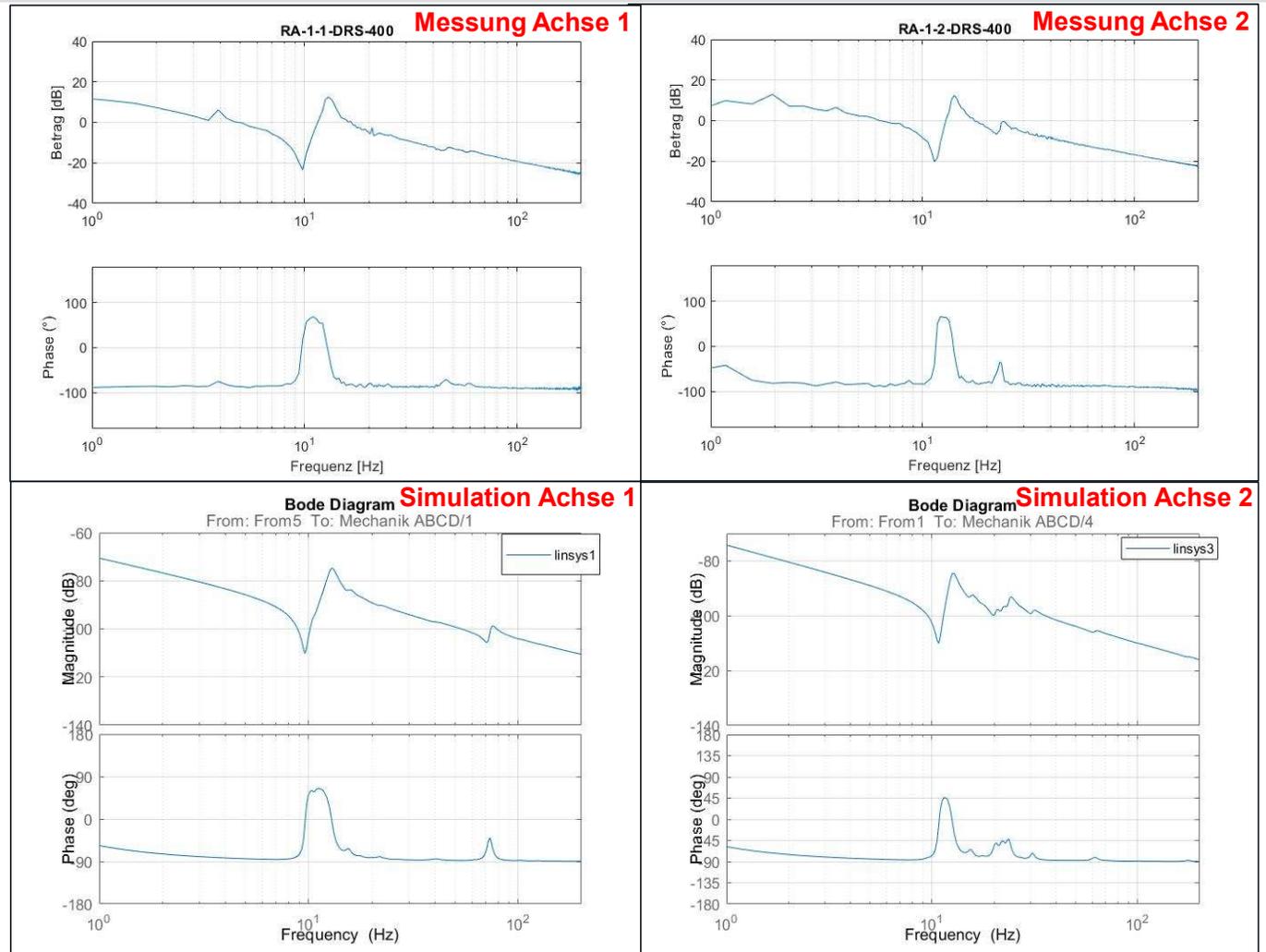


Abbildung 9: Drehzahlregelstrecke Achsen 1 und 2, Messung (oben, motorseitig) und Simulation (unten, lastseitig)

Verifizieren des Simulationsmodelles mit den Messungen:

- Abgleich des Simulationsmodelles mit den Messungen zur Verifizierung des Simulationsmodelles
- Es wird angestrebt, eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Frequenzgängen zu erreichen
- Dabei werden die Pol- und Nullstellen der Frequenzgänge verglichen
- Bei Abweichung des Frequenzwertes:
 - Massen und Steifigkeiten können Ursache sein
 - Interpretieren der Animationen der Eigenformen: Ursache herausfinden
 - Meist anpassen von Federsteifigkeiten
- Bei Abweichung der Amplitude:
 - Dämpfung kann die Ursache sein
 - Dämpfung global oder lokal anpassen, eventuell frequenzabhängig

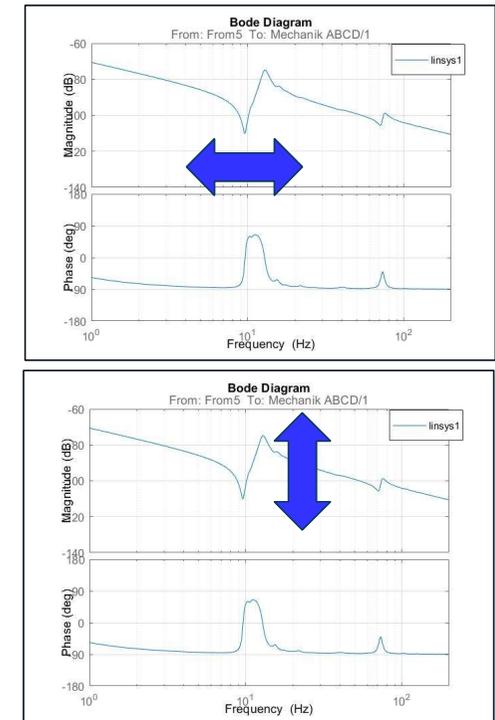


Abbildung 10: Bode Diagramme, Abweichung Frequenzwert (oben) Abweichung Amplitude (unten)

Anwendung der Simulationsergebnisse:

- Ergebnis der Simulation ist eine Systembeschreibung im Zustandsraum

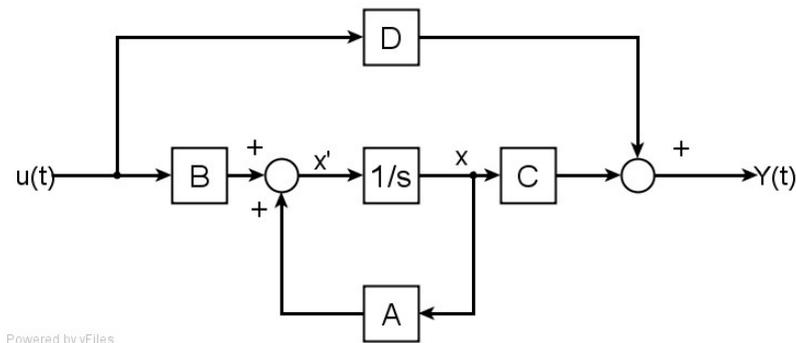


Abbildung 11: Blockschaltbild in Zustandsraumdarstellung

- Parametrierung der Filter erfolgt über Polynome, daher ist eine Überführung der Zustandsraumdarstellung in eine Übertragungsfunktion notwendig
- Ordnung von Zähler- und Nennerpolynome größer 200, daher Ordnungsreduktion notwendig
- Nutzung mathematischer Verfahren in der Entwicklungsumgebung Matlab zur Reduktion

Workflow zur Berechnung der Filter:

- Ordnungsreduktion durch Zerlegung des Systems in nieder- und höherfrequente Anteile
- Entfernung der Frequenzanteile kleiner 0,1 Hz
- Nutzung weiterer mathematischer Verfahren und Toolboxen (Model-Reducer Toolbox) zur Ordnungsreduktion
- Bestimmung der Übertragungsfunktionen für Lage, Drehzahl und Strom
- Invertierung der jeweiligen Übertragungsfunktionen

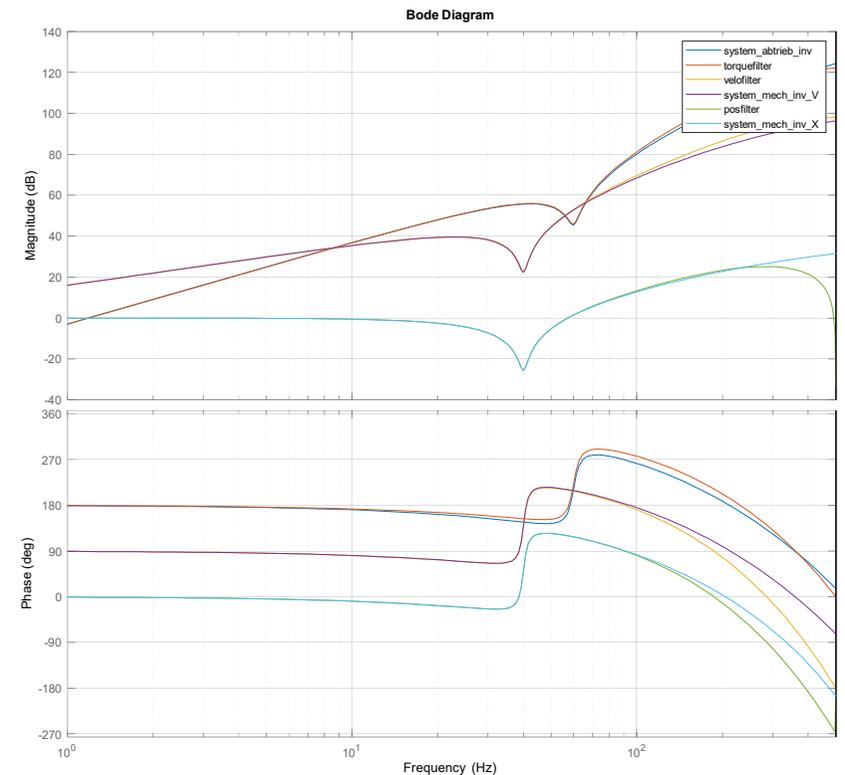


Abbildung 12: Bode Diagramme, Ermittlung der Filter

Zusammenfassung und Ausblick

- Durch die serielle Anordnung seiner Kinematik hat der Industrieroboter in verschiedenen Posen unterschiedliche dynamische Eigenschaften → viele verschiedene Posen notwendig um Bereiche (Cubes) mit hinreichend gleichwertigen dynamischen Eigenschaften zu lokalisieren.
- Für diese Bereiche können mit Hilfe der Übertragungsfunktionen und Frequenzgänge jeweils Vorsteuerparameter ermittelt werden, welche eine Verbesserung der Genauigkeit des Industrieroboters im jeweiligen Bereich des Arbeitsraumes ermöglichen
- Die Anzahl der durchzuführenden physikalischen Messungen kann mit Hilfe des digitalen Zwillings verringert und vereinfacht werden. Der digitale Zwilling kann die Messungen ergänzen und bei ausreichendem Reifegrad (Verifizierung, Erfahrung) ersetzen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Haiko Klause

CAE Ingenieur

haiko.klause@drbinde.de