

## **Entwurf und Inbetriebnahme von Präzisionsregelungssystemen für translatorische und rotatorische Direktantriebe**

Daniele Pagin, Hermann Briese, Hermann Henrichfreise

*Fachhochschule Köln, Labor für Mechatronik (Cologne Laboratory of Mechatronics, CLM),  
Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln, info@clm-online.de, www.clm-online.de*

Sven Lüdtko

*INA - Drives & Mechatronics GmbH & Co. oHG (IDAM),  
Mittelbergstr. 2, 98527 Suhl, info@ina-dam.de, www.ina-dam.de*

### **Kurzfassung**

Dieser Beitrag beschreibt den Entwurf und die Inbetriebnahme von innovativen Präzisionsregelungssystemen für translatorische und rotatorische Direktantriebe durch eine konsequente Anwendung der mechatronischen Entwicklungsmethodik.

Durch den Einsatz einer beobachtergestützten Zustandsregelung mit Erweiterungen zur Aufbereitung verrauschter Messsignale und Kompensation nichtlinearer Eigenschaften der Regelstrecke weist das geregelte System ein sehr gutes Führungs- und Störverhalten auf.

Mit Hilfe eines zugeschnittenen Softwarewerkzeuges können sowohl für translatorische als auch rotatorische Direktantriebe sukzessive die Stationen der Parameteridentifikation, Analyse, Synthese und prototypischen Realisierung durchlaufen werden, bis ein optimal auf den jeweiligen Antrieb abgestimmtes Regelungssystem validiert ist.

### **Abstract**

This paper describes the design and implementation of innovative precision control systems for linear and rotary direct drives by a consistent application of the mechatronic development methodology.

Due to the use of an observer-based state-space control with extensions for the conditioning of noisy measurement signals and compensation of nonlinear characteristics of the plant, the controlled system shows an excellent reference and disturbance behavior.

The use of a tailored software tool for linear as well as rotary direct drives allows the execution of the design stations parameter identification, analysis, design, and prototypical implementation until an optimally tuned control system for the respective drive is validated.

## **1. Einleitung**

In vielen Anwendungsbereichen der Automatisierungstechnik, wie z.B. bei Handlingsystemen, Pick-and-Place-Maschinen, Bond-Maschinen, Laserschneidmaschinen und Messmaschinen, kommen immer häufiger Direktantriebssysteme (Direct Drive Positioning System, DDPS) zum Einsatz. Diese zeichnen sich unter anderem durch großes Beschleunigungsvermögen, hohe Endgeschwindigkeit sowie hohe Systemsteifigkeit aus.

Die hohen Anforderungen hinsichtlich der Präzision und Dynamik des Systemverhaltens sind mit klassischen regelungstechnischen Methoden nur unzureichend oder gar nicht zu erfüllen. Aus diesem Grund kommen hierfür zunehmend moderne Regelungsverfahren zum Einsatz.

In einem Kooperationsprojekt zwischen dem Labor für Mechatronik (Cologne Laboratory of Mechatronics, CLM) und der INA - Drives & Mechatronics GmbH & Co. oHG (IDAM) wurde für Direktantriebe eine modellbasierte optimale Lageregelung mit Erweiterungen zur Aufbereitung verrauschter Messsignale und Kompensation nichtlinearer Eigenschaften der Regelstrecke wie Reibung und Kraft- bzw. Momentenwelligkeit entworfen und implementiert. Damit werden die oben genannten Anforderungen an das Systemverhalten erfüllt.

Des Weiteren wurde ein auf MATLAB/Simulink basierendes Entwurfs- und Inbetriebnahme-Werkzeug für translatorische und rotatorische Direktantriebe entwickelt. Damit können die einzelnen Stationen - von der Parameteridentifikation über die Analyse und Synthese der Regelung bis hin zur Realisierung auf einem dSPACE Echtzeitsystem - auf einfache Weise durchgeführt werden. Der Anwender ist damit in der Lage, eine optimal auf den jeweiligen Direktantrieb abgestimmte Regelung in kürzester Zeit zu entwerfen und in Betrieb zu nehmen.

## **2. Mechatronischer Entwicklungsprozess**

Die komplexe Aufgabenstellung des mechatronischen Systementwurfs verlangt eine systematische Vorgehensweise, die sich im nachfolgend dargestellten mechatronischen Entwicklungsprozess widerspiegelt.

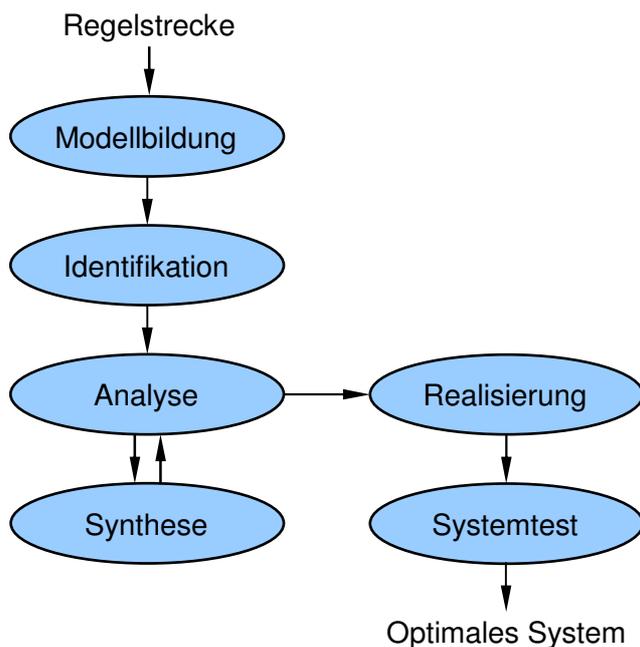


Bild 1: Mechatronischer Entwicklungsprozess

Für die gegebene Regelstrecke beginnt der Entwicklungsprozess mit der Modellbildung. Darin werden alle für die definierten Zielvorgaben relevanten Systemeigenschaften durch ein mathematisches Modell mit den entsprechenden Parametern berücksichtigt. In der Identifikation werden die Parameter des mathematischen Modells bestimmt. Hierzu werden in einem numerischen Optimierungsprozess die Modellparameter gezielt variiert, bis die berechneten und gemessenen Systemantworten weitestgehend übereinstimmen. Daraufhin erfolgt die Analyse des mathematischen Modells. Ziel dabei ist, einen möglichst tiefen Einblick in die Eigenschaften des Systems zu gewinnen. Dieser Einblick erlaubt die Entwicklung gezielter Maßnahmen für eine Korrektur unerwünschter Eigenschaften und Verbesserung des Systemverhaltens. In der Synthese erfolgt die Erweiterung des Systems um eine Regelung. Dadurch soll ein optimales Systemverhalten erreicht werden. Danach wird in der Analyse das Verhalten des geregelten Systems untersucht. Dies erfolgt unter anderem durch Simulation des Systemverhaltens mit einem realitätsnahen mathematischen Modell der Regelstrecke und der entworfenen Regelung. Zeigt das geregelte System das gewünschte Verhalten, erfolgt die Realisierung der Regelung prototypisch auf einem Echtzeitsystem durch automatische Codegenerierung. Zum Schluss wird das entworfene Regelungssystem im Systemtest validiert und der Entwicklungsprozess mit einem optimalen System verlassen.

### 3. Regelstrecke

Zunächst werden der Systemaufbau und das Wirkprinzip der betrachteten Klasse von Regelstrecken erläutert. Das nachfolgende Bild zeigt hierfür die schematische Darstellung eines translatorischen Direktantriebes.

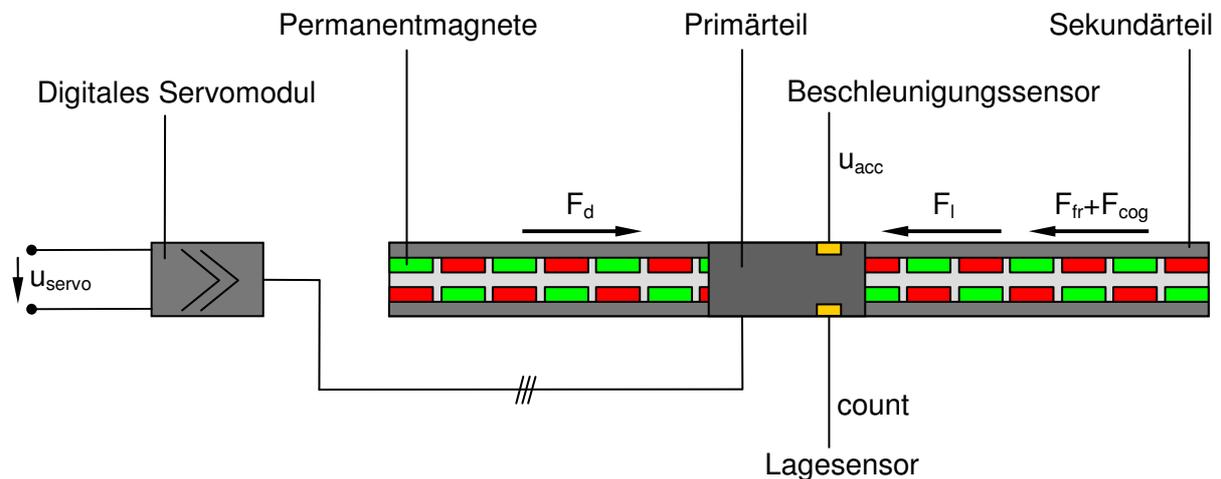


Bild 2: Schematische Darstellung eines translatorischen Direktantriebes

Das digitale Servomodul beinhaltet die Leistungselektronik mit elektronischer sinusförmiger Kommutierung der Phasenströme des Motors und die Stromregelung. Die Steuereingangsgröße der Regelstrecke ist die Eingangsspannung  $u_{\text{servo}}$  des Servomoduls für den resultierenden kraftbildenden Strom. Der Motor (ein 3-phasiger AC-Synchronmotor) besteht aus dem Primärteil mit den Motorspulen und dem Sekundärteil, auf dem Permanentmagnete fixiert sind. Durch die Bestromung der Spulen entsteht zwischen dem Primär- und Sekundärteil die antreibende Kraft  $F_d$ . Im Mechanismus (bewegte Masse mit Führungen) treten als Störgrößen Reibung und Kraftwelligkeit durch eine magnetische Rastkraft auf, die mit  $F_{\text{fr}}$  und  $F_{\text{cog}}$  bezeichnet sind. Zusätzlich kann am Primärteil als weitere Störgröße eine externe Lastkraft  $F_l$  angreifen. Als Messgröße steht für die Regelung der Zählerstand  $\text{count}$  eines Inkrementalencoders für die Relativlage zwischen Primär- und Sekundärteil zur Verfügung. Optional ist als weitere Messgröße die Ausgangsspannung  $u_{\text{acc}}$  eines Beschleunigungssensors für die Relativbeschleunigung vorhanden.

Für die betrachtete Klasse von Regelstrecken werden zunächst Modelle entwickelt, die die Grundlage für die Analyse und Synthese der Regelung bilden.

#### 4. Modellbildung

Die Regelstrecke wird für die Modellbildung in die Teilsysteme Servomodul und Motor, Mechanismus und Sensorik aufgeteilt. Dies ist im nachfolgenden Bild dargestellt.

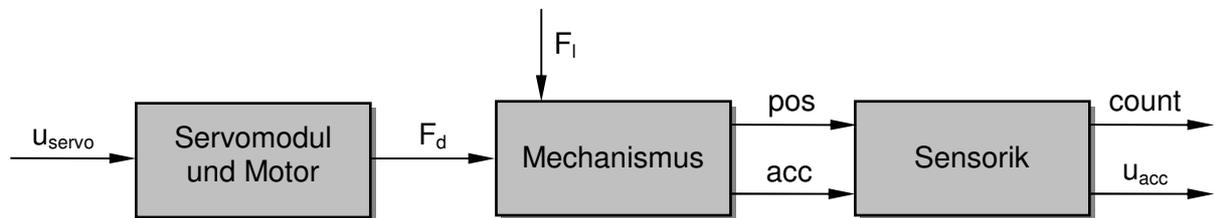


Bild 3: Teilsysteme der Regelstrecke

Für die einzelnen Teilsysteme wurden mathematische Modelle entwickelt, die alle für die Entwicklung einer optimalen Lagereglung relevanten Systemeigenschaften abbilden. Die Teilmodelle wurden in Form eines Simulink-Blockdiagramms zu einem nichtlinearen Gesamtmodell zusammengefügt. Dieses nichtlineare Modell wird für eine realitätsnahe Analyse des geregelten Systems in der Simulation verwendet.

Weiterhin wurde aus dem nichtlinearen Modell ein linearisiertes Modell der Regelstrecke abgeleitet, das für die Analyse und Reglersynthese benötigt wird. Die zugehörigen Gleichungen wurden unter MATLAB in Zustandsform angegeben. Gegenüber dem nichtlinearen Modell für die Simulation sind darin Nichtlinearitäten wie Reibung, Kraftwelligkeit und Begrenzungen sowie Mess- und Quantisierungsrauschen vernachlässigt. Die entwickelten Modelle der Regelstrecke sind sowohl für translatorische als auch für rotatorische Direktantriebe einsetzbar.

#### 5. Parameteridentifikation

Nach der Modellbildung erfolgt die Parameteridentifikation. Hier wird das Verhalten der Modelle der Regelstrecke an das reale Systemverhalten angepasst. Dies erfolgt bei der bereits festgelegten Modellstruktur durch die Ermittlung der optimalen Parameter für das nichtlineare und linearisierte Modell.

Für die Durchführung von Experimenten zur Ermittlung des realen Systemverhaltens wird eine einfache Startregelung entworfen und in Betrieb genommen.

Der Identifikationsprozess ist anschaulich im nachfolgenden Bild dargestellt.

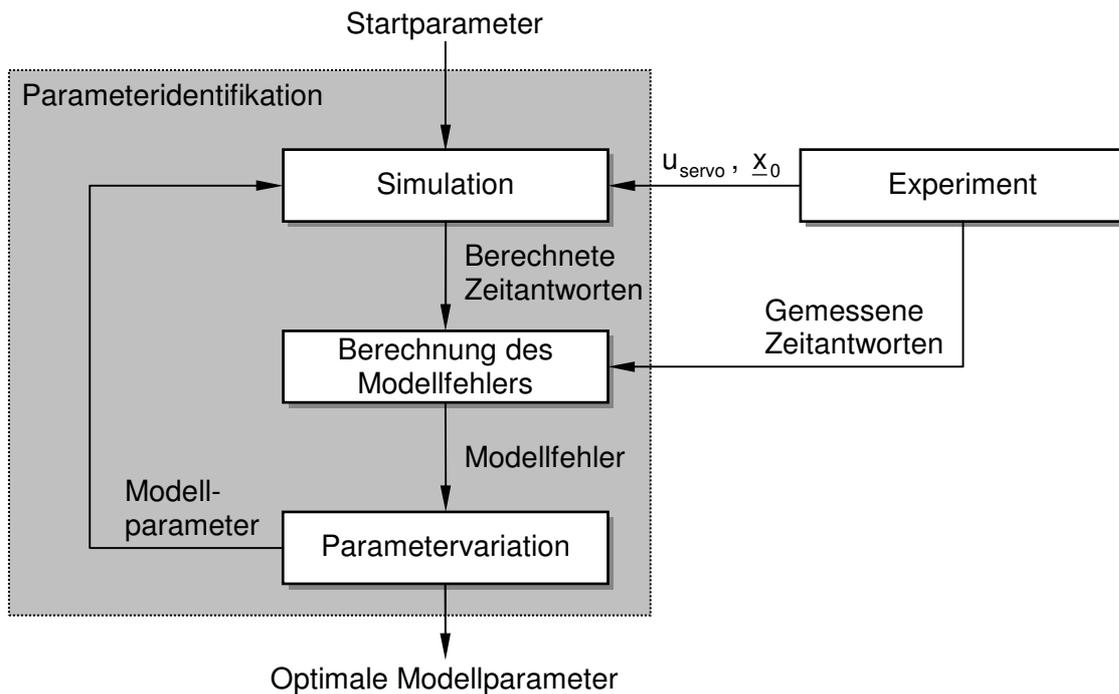


Bild 4: Identifikationsprozess

Im Identifikationsprozess werden mit dem realen geregelten System unterschiedliche Experimente durchgeführt, die eine Identifikation der Parameter des nichtlinearen und linearisierten Modells ermöglichen. Dabei werden sowohl die Steuereingangsgröße  $u_{\text{servo}}$  in die Regelstrecke als auch alle verfügbaren Systemantworten messtechnisch erfasst.

Die Parameteridentifikation erfolgt in einem rekursiven Prozess mit digitaler Simulation der Modelle der Regelstrecke, der Berechnung eines Modellfehlers aus den gemessenen und berechneten Zeitantworten und der gezielten Variation der Modellparameter zur Minimierung des Modellfehlers mit Hilfe eines numerischen Optimierungsverfahrens [5]. Für die Simulation werden die Modelle zu Anfang mit den aus Messdaten ermittelten Anfangszuständen im Vektor  $\underline{x}_0$  versehen. Die Simulation erfolgt mit der im Experiment aufgezeichneten Steuereingangsgröße  $u_{\text{servo}}$ . Am Ende des rekursiven Prozesses liegen die optimalen Modellparameter und damit validierte Modelle der Regelstrecke vor. Diese bilden die Basis für den Entwurf der optimalen Regelung und die Analyse des geregelten Systems.

## 6. Regelungsentwurf

Die Zielsetzung für den Entwurf der Regelung ist ein optimales Führungs- und Störverhalten. Dazu ist für die gewünschte hohe Systemdynamik eine hohe Regelungsbandbreite

erforderlich. Zudem soll die Regelung robust gegenüber Parameterschwankungen in der Regelstrecke und unempfindlich gegenüber äußeren Störeinflüssen wie Messrauschen sein. Um diese Ziele zu erreichen, wurde eine beobachtergestützte Zustandsregelung gewählt. Ihr Entwurf erfolgt als optimale lineare quadratische gaußsche Regelung (LQG-Regelung) [1]. Darüber hinaus wurden nichtlineare Erweiterungen der Regelung zur Kompensation der Reibung und der Kraftwelligkeit durch die magnetische Rastkraft entwickelt, die eine weitere Erhöhung der Regelgüte ermöglichen. Das nachfolgende Bild zeigt den LQG-Regler (grau hinterlegt) mit diesen Erweiterungen.

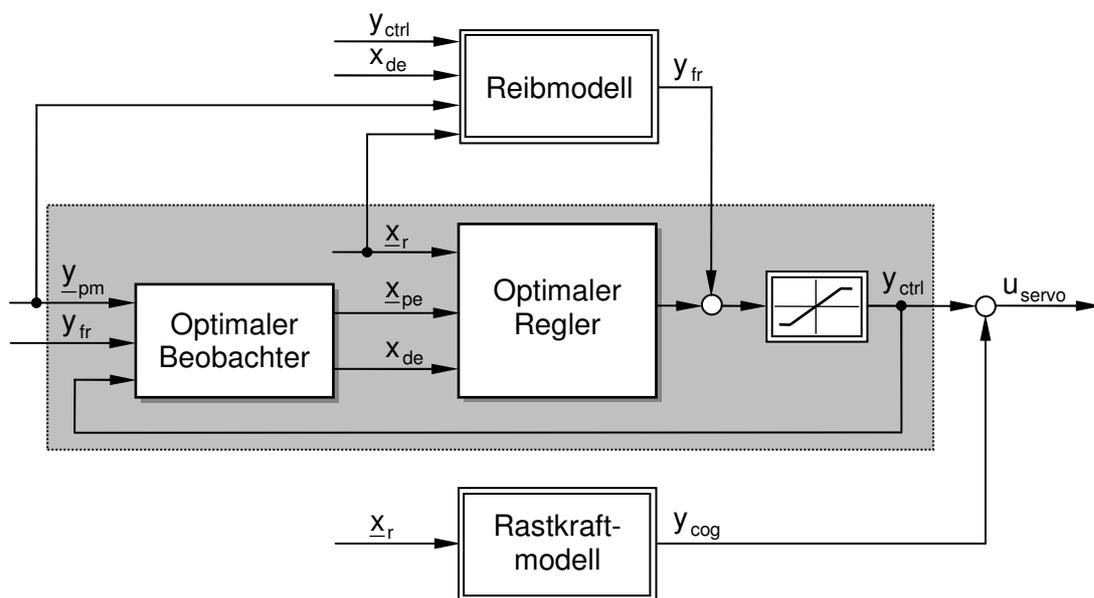


Bild 5: Optimaler Lageregler

Der LQG-Regler besteht aus einem optimalen linearen Regler (LQR) mit statischer Rückführung der geschätzten Zustandsgrößen der Regelstrecke im Vektor  $\underline{x}_{pe}$  sowie Aufschaltung der Führungsgrößen im Vektor  $\underline{x}_r$  und Aufschaltung der geschätzten Störgröße  $x_{de}$  (für Reibung und externe Lastkräfte) und einem optimalen linearen Beobachter (LQE) zur Schätzung der Zustands- und Störgrößen aus den Messgrößen im Vektor  $\underline{y}_{pm}$  und der Reglerausgangsgröße  $y_{ctrl}$ .

Die mit der LQG-Regelung erreichbare Regelgüte ist unter anderem von der Schnelligkeit der linearen Schätzung der Störgröße  $x_{de}$  abhängig. Diese wird maßgeblich durch die zur Verfügung stehenden Messgrößen und deren Qualität beeinflusst. So kann die Schnelligkeit der linearen Schätzung der Störgröße durch die Einbeziehung einer Beschleunigungs-

messung in den Regelalgorithmus erhöht werden, wodurch transiente Lagefehler schneller ausgeregelt werden. Abhängig von der Qualität der Beschleunigungsmessung kann zusätzlich eine digitale Signalaufbereitung, z.B. in Form einer Offsetkorrektur und Filterung für Messrauschen, erforderlich sein.

Mit der linearen LQG-Regelung allein treten zum Zeitpunkt des Losbrechens aus der Haftreibung beim Anfahren größere transiente Lagefehler auf. Eine Reduktion dieser Anfahrfehler kann durch die nichtlineare Erweiterung der linearen Regelung zur Kompensation der Reibung (siehe Bild 5) erreicht werden. Hierfür wurden ein adaptives und ein neuronales Reibmodell entwickelt und untersucht.

Das nichtlineare adaptive Reibmodell rekonstruiert den sprungförmigen Verlauf der Reibung bei Geschwindigkeit Null [2]. Die Adaption der maximalen Haftreibkräfte an die real vorliegenden Werte erfolgt mit Hilfe der linearen Schätzung der Störgröße. Durch Aufschalten des Reibmodellausganges wird eine deutliche Reduktion der Anfahrfehler erreicht (siehe Kapitel 7.2, Bild 10).

Das neuronale Reibmodell dagegen rekonstruiert den gesamten Verlauf der Reibung [3]. Die Anpassung der Parameter der verwendeten neuronalen Netze erfolgt dabei in Echtzeit. Auch durch Aufschalten des Ausganges dieses Reibmodells werden die Anfahrfehler deutlich reduziert. Dabei ist abhängig von der Form der Reibungskennlinie und der Schnelligkeit der linearen Schätzung der Störgröße unter Umständen eine weitere Verbesserung gegenüber dem nichtlinearen adaptiven Reibmodell möglich.

Bei eisenbehafteten Antrieben tritt eine magnetische Rastkraft auf, die auf die Anziehung zwischen den Permanentmagneten und dem Eisen des Motors zurückzuführen ist. Während der Bewegung entstehen dadurch periodische, sinusförmige Störkräfte. Liegt die zugehörige Frequenz nicht weit genug unterhalb der Regelungsbandbreite, können die resultierenden Lagefehler durch die lineare Störgrößenkompensation in der LQG-Regelung nicht ausreichend ausgeregelt werden. Aus diesem Grund wurde die Regelung um ein Modell zur Rekonstruktion und Kompensation der magnetischen Rastkraft (siehe Bild 5) erweitert. Das Modell basiert auf dem in [4] beschriebenen Ansatz. Durch Aufschalten des Ausganges des Rastkraftmodells werden die rastkraftbedingten Lagefehler deutlich reduziert (siehe Kapitel 7.2, Bild 11).

## 7. Entwurfs- und Inbetriebnahmewerkzeug

Für eine schnelle und fehlerfreie Bearbeitung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Stationen im Entwicklungsprozess wurde ein Entwurfs- und Inbetriebnahmewerkzeug entwickelt. Dieses auf MATLAB/Simulink basierende Softwarewerkzeug ist sowohl für translatorische als auch rotatorische Direktantriebe mit der in der Modellbildung festgelegten Systemstruktur verwendbar. Der Anwender ist damit in der Lage, in kürzester Zeit eine optimal abgestimmte Lageregelung für einen Direktantrieb zu entwerfen und in Betrieb zu nehmen.

### 7.1. Funktionalität

Das Werkzeug unterstützt die einzelnen Stationen des in Bild 6 dargestellten Entwurfs- und Inbetriebnahmeprozesses. Sämtliche für die Analyse, Simulation und Inbetriebnahme erforderlichen Modelle sind im Werkzeug hinterlegt.

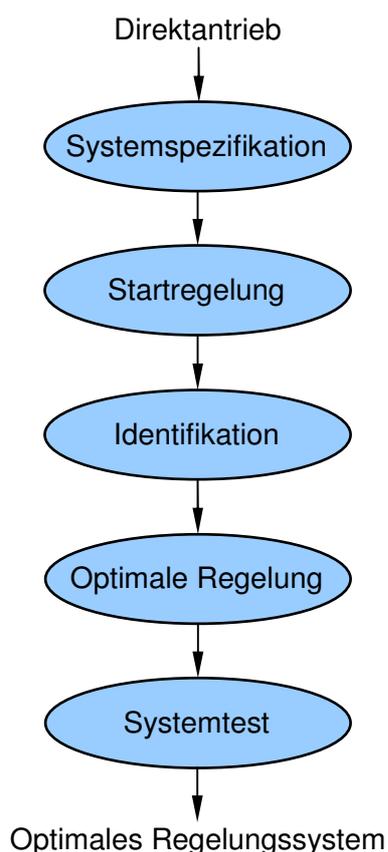


Bild 6: Entwurfs- und Inbetriebnahmeprozess

Beginnend mit der Systemspezifikation erfolgen Angaben über die Art des Antriebes (translatorisch, rotatorisch), die Verfügbarkeit einer Beschleunigungsmessung und das Auftreten einer magnetischen Rastkraft. Darüber hinaus werden bekannte Parameter, wie z.B. die des Servomoduls, angegeben. Unsichere oder unbekannte Parameter, wie z.B. Masse bzw. Massenträgheitsmoment und Reibparameter, können grob identifiziert oder mit Hilfe von Überschlagsformeln automatisch vorbesetzt werden. Außerdem werden weitere für die Inbetriebnahme erforderliche Module (z.B. Indexsuche, Sicherheitsumgebung) parametrisiert.

Im nächsten Schritt wird zur Durchführung von Experimenten für die Identifikation der Modellparameter eine einfache PID-Startregelung entworfen. Die Eigenschaften der Startregelung (Anregelzeiten, Robustheit, etc.) werden mit Hilfe von Sprungantworten, Bodediagrammen und Eigenwerten sowie durch Simulation mit dem nichtlinearen Streckenmodell analysiert. Die Inbetriebnahme der Regelung erfolgt durch

automatische Codegenerierung auf einem dSPACE Echtzeitsystem.

In der Identifikation werden, wie in Kapitel 5 beschrieben, geeignete Experimente durchgeführt und die für eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Zeitantworten optimalen Modellparameter bestimmt. Am Ende des Identifikationsprozesses liegen validierte Modelle der Regelstrecke vor. Mit diesen erfolgt der Entwurf, die Analyse und Inbetriebnahme der optimalen Regelung.

Der Entwurfs- und Inbetriebnahmeprozess endet mit dem Systemtest. Hier wird das entworfene Regelungssystem validiert. Dazu werden für das geregelte System Sollzeitverläufe definiert, Messungen durchgeführt, die an die Regelung gestellten Anforderungen überprüft und die Regelung gegebenenfalls besser abgestimmt. Am Ende des Entwurfs- und Inbetriebnahmeprozesses liegt ein validiertes optimales Regelungssystem vor.

## 7.2. Prototypische Realisierung

Für die Bearbeitung der Stationen des Entwurfs- und Inbetriebnahmeprozesses gemäß Bild 6 stellt das Werkzeug auf Registerkarten zugeschnittene Benutzeroberflächen zur Verfügung. Im Folgenden werden die Benutzeroberflächen für die Stationen Identifikation und Optimale Regelung des Entwurfs- und Inbetriebnahmeprozesses näher beschrieben.

Mit Hilfe der in Bild 7 dargestellten Benutzeroberfläche führt der Anwender die Parameteridentifikation durch.

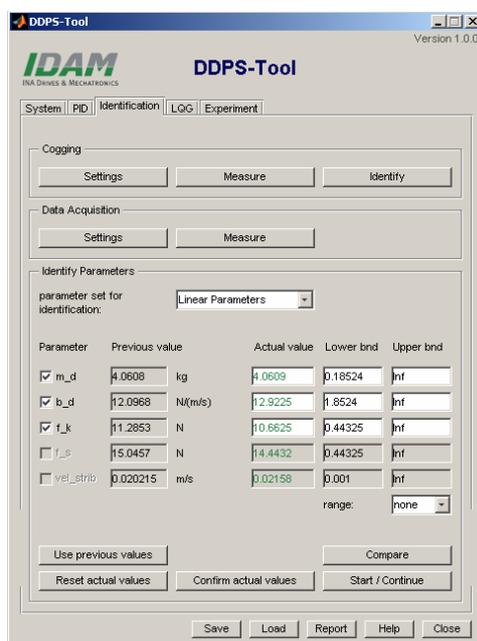


Bild 7: Benutzeroberfläche zur Identifikation

Die Oberfläche enthält Steuerelemente, mit denen in Form von Sollzeitverläufen für das geregelte System geeignete Experimente für die Identifikation der Parameter des nichtlinearen und linearisierten Modells der Regelstrecke vorgegeben, durchgeführt und die zugehörigen Zeitantworten erfasst werden. Eine weitere Gruppe von Steuerelementen implementiert die in Kapitel 5 beschriebene Parameteridentifikation über auszuwählende freie Modellparameter. Am Ende der Identifikation liegen die optimalen Modellparameter vor.

Weitere Steuerelemente dienen zur Ermittlung von Kennlinien für das Modell zur Rekonstruktion und Kompensation des Verlaufes der magnetischen Rastkraft. Dazu werden wieder Sollzeitverläufe für Experimente definiert, die Experimente mit dem

realen System durchgeführt und die benötigten Zeitverläufe erfasst. Aus Letzteren werden die Kennlinien ermittelt.

Bild 8 zeigt gemessene Zeitantworten sowie die zugehörigen simulierten Zeitantworten vor und nach der Identifikation der Modellparameter.

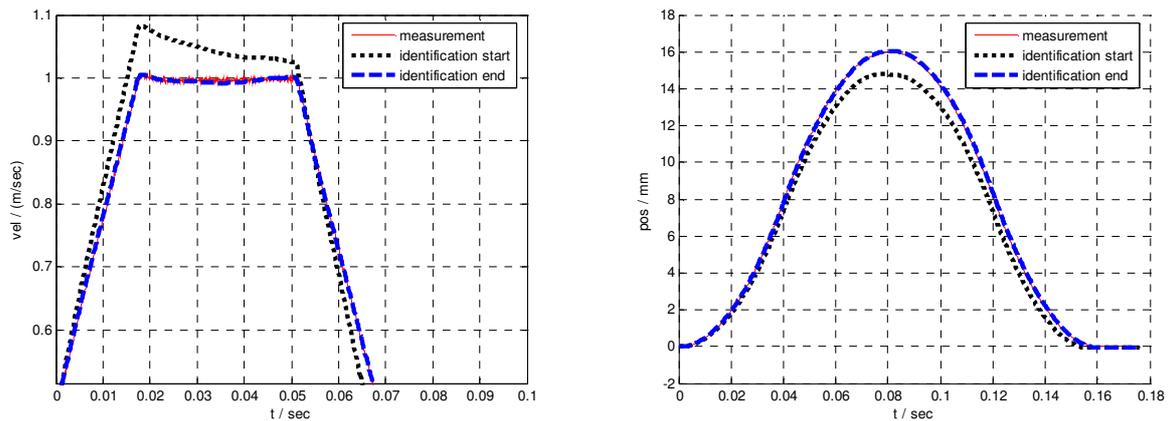


Bild 8: Gemessene (durchgezogen) und simulierte Zeitantworten vor (punktiert) und nach (gestrichelt) der Identifikation der Parameter des linearisierten (links) und nichtlinearen (rechts) Modells

Vor der Identifikation der Modellparameter bestehen noch deutliche Unterschiede zwischen den gemessenen und simulierten Zeitantworten. Am Ende ist eine gute Übereinstimmung der Zeitantworten zu erkennen, so dass mit den identifizierten Modellparametern validierte Modelle der Regelstrecke vorliegen.

Der Entwurf und die Inbetriebnahme des optimalen Regelungssystems werden mit der in Bild 9 dargestellten Benutzeroberfläche durchgeführt. Sie enthält Steuerelemente für den Entwurf des statischen Zustandsreglers (LQR) und des dynamischen Beobachters (LQE) für die Regelung. Weitere Steuerelemente ermöglichen die Erweiterung des linearen Regelgesetzes um Modellanteile zur nichtlinearen Reibungskompensation und zur Kompensation der magnetischen Rastkraft. Steht am Antrieb eine Beschleunigungsmessung zur Verfügung (siehe Bild 2), kann diese über entsprechende Steuerelemente zur Erhöhung der Schnelligkeit der linearen Schätzung der Störgröße für die Regelung verwendet und gegebenenfalls zur Unterdrückung von Messrauschen gefiltert werden.

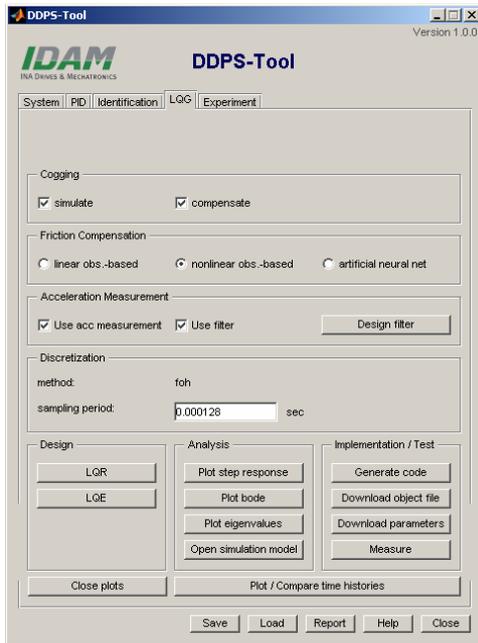


Bild 9: Benutzeroberfläche zur optimalen Regelung

Eine Gruppe von Steuerelementen ermöglicht die Analyse der entworfenen Regelung mit Hilfe von Sprungantworten, Bodediagrammen und Eigenwerten sowie durch Simulation mit dem nichtlinearen Streckenmodell und den nichtlinearen Erweiterungen (Reibungs- und Rastkraftkompensation) der Regelung.

Eine weitere Gruppe von Steuerelementen dient für die Inbetriebnahme der entworfenen Regelung auf einem dSPACE Echtzeitsystem durch automatische Codegenerierung sowie für den Test und die Validierung des Regelungssystems durch Messungen mit definierten Experimenten und Vergleich mit Simulationsergebnissen.

Bild 10 zeigt Ergebnisse für einen eisenlosen translatorischen Direktantrieb. Dieser weist aufgrund von Dichtungen an den Linearführungen eine relativ hohe Losbrechkraft (etwa 15 N, entspricht etwa 5% der maximalen Antriebskraft) auf. Die verwendeten Sollzeitverläufe für Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind auf der linken Seite abgebildet. Diese werden von einem Referenzprofilgenerator bereitgestellt. Auf der rechten Seite sind die gemessenen Zeitverläufe des Lagefehlers ohne und mit nichtlinearer Erweiterung der Regelung zur Kompensation der Reibung dargestellt.

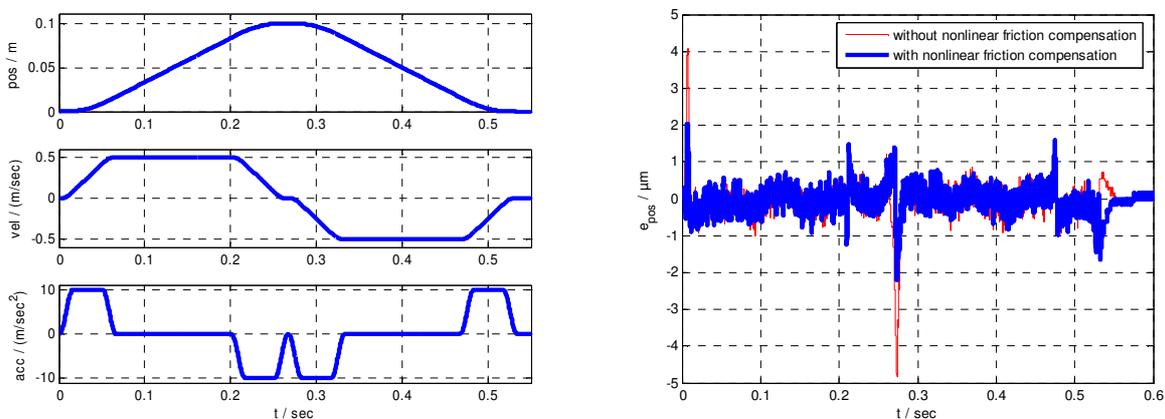


Bild 10: Sollzeitverläufe (links) und gemessene Lagefehler (rechts) ohne (dünn) und mit (dick) nichtlinearer Erweiterung der Regelung zur Kompensation der Reibung

Ohne die nichtlineare Reibungskompensation sind aufgrund der relativ hohen Losbrechkraft bei Bewegungsbeginn und Bewegungsumkehr noch größere Anfahrfehler zu erkennen. Durch die nichtlineare Erweiterung der Regelung zur Kompensation der Reibung werden die Anfahrfehler deutlich reduziert. In allen anderen Bewegungsphasen bleibt der Lagefehler in einem Toleranzband von etwa  $\pm 1\mu\text{m}$ .

Bild 11 zeigt Ergebnisse aus dem Systemtest für einen eisenbehafteten rotatorischen Direktantrieb mit einem großen magnetischen Rastmoment (etwa 3 Nm Spitze-Spitze, entspricht etwa 7% des maximalen Antriebsmomentes). Auf der linken Seite sind wieder die verwendeten Sollzeitverläufe für Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung abgebildet. Auf der rechten Seite sind die gemessenen Zeitverläufe des Lagefehlers ohne und mit nichtlinearer Erweiterung der Regelung zur Kompensation der magnetischen Rastkraft dargestellt.

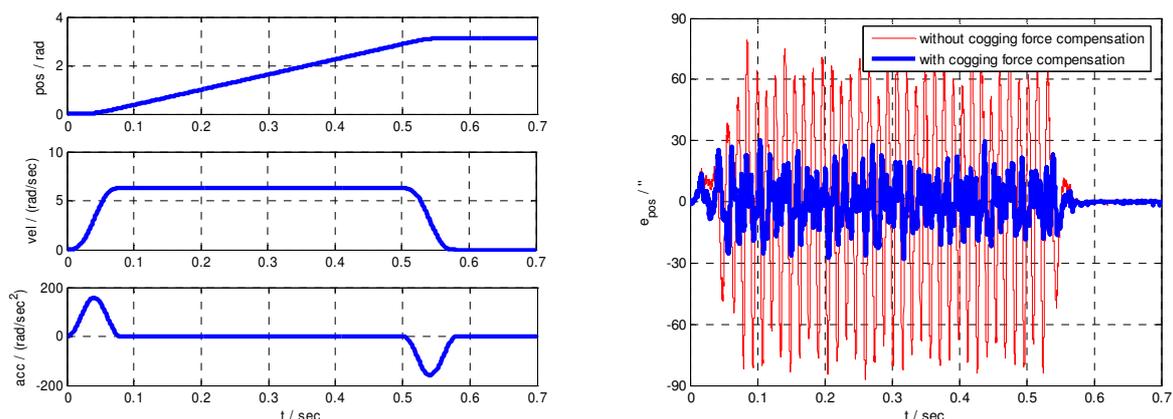


Bild 11: Sollzeitverläufe (links) und gemessene Lagefehler (rechts) ohne (dünn) und mit (dick) nichtlinearer Erweiterung der Regelung zur Kompensation der magnetischen Rastkraft

Im Verlauf der Lagefehler ist der Einfluss der magnetischen Rastkraft zu erkennen. Durch die nichtlineare Erweiterung der Regelung zur Kompensation der magnetischen Rastkraft werden die entstehenden periodischen Lagefehler deutlich reduziert. Für eine weitere Reduktion der Lagefehler wird zurzeit an der Verbesserung des Modells für die Kompensation der magnetischen Rastkraft gearbeitet.

## 8. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden der Entwurf und die Inbetriebnahme einer optimalen Lageregelung für Direktantriebe dargestellt.

Die alleinige Verwendung einer linearen LQG-Regelung mit linearer Schätzung und Kompensation von Störgrößen lieferte bereits gute Ergebnisse. Verbleibende Lagefehler, die durch nichtlineare Eigenschaften (Reibung, magnetische Rastkraft) der Regelstrecke entstehen, wurden durch nichtlineare Erweiterungen des linearen Regelgesetzes weiter reduziert.

Durch die konsequente Anwendung der mechatronischen Entwicklungsmethodik und den Einsatz leistungsfähiger Hardware und Softwarewerkzeuge konnte in kürzester Zeit eine optimal auf den jeweiligen Antrieb abgestimmte Lageregelung realisiert werden.

Das entwickelte Entwurfs- und Inbetriebnahmewerkzeug ermöglicht dem Antriebshersteller die Realisierung eines optimal abgestimmten Regelungssystems für unterschiedliche translatorische und rotatorische Antriebe. In eine eigenständige Anwendung für die Produkthardware überführt könnte das Softwarewerkzeug in Zukunft dem Endanwender eines Antriebssystems für die eigene Feinabstimmung der Regelung zur Verfügung gestellt werden.

## Literatur

- [1] H. Henrichfreise: Prototyping of a LQG Compensator for a Compliant Mechanical Drive System with Friction. 1. Workshop TransMechatronik - Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn 1997.
- [2] H. Henrichfreise, C.Witte: Beobachtergestützte nichtlineare Kompensation trockener Reibung in einem Positionierantrieb. Automatisierungstechnik 46 (1998), Heft 3, S.128-135.
- [3] K.-P. Hesseler, H. Henrichfreise: Einsatz neuronaler Netze zur Kompensation nichtlinearer Streckeneigenschaften. XV. Deutsch-Polnisches Seminar, FH-Köln, November 2003.
- [4] H. K. Tönshoff, U. Brahms: Verbesserte Regelung für Lineardirektantriebe in Werkzeugmaschinen. Antriebstechnik 37 (1998), Heft 8, S. 47-49.
- [5] S. Klotzbach, S. Oedekoven, O.Grassmann: Optimierung im mechatronischen Entwicklungsprozess. 5. VDI-Mechatroniktagung 2003 - Innovative Produktentwicklung, Fulda, 7.-8. Mai 2003.