

Dual-Loop-Regelung – eine Möglichkeit zur Vermeidung von Schwingungen des Antriebssystems und zur Kompensation des Getriebespiels

Die Positionierung mechanischer Lasten mit einem elektrischen Antrieb ist mit einem Steuerungssystem möglich, das auf einer kaskadierten Reglerstruktur mit einem PID-Positions- und unterlagertem schnellen Strom-Regelkreis basiert. Bei Anwendungen, in denen Getriebe, Spindeln oder Antriebsriemen zur Übertragung der Bewegung der Motorwelle auf die Last verwendet werden, können mechanische Einflüsse und Toleranzen dieser Übertragungselemente jedoch eine negative Auswirkung auf die Reaktionsfähigkeit und Qualität der lastseitigen Positionierung haben. Ein typisches Beispiel ist das Getriebespiel, welches zu einem internen „Bewegungsverlust“ aufgrund der Spalte und Toleranzen zwischen den Verzahnungen der einzelnen Getriebestufen führen kann. Bei Systemen, in denen lange Wellen oder komplexe Übertragungsmechanismen zum Einsatz kommen, kann die Steifigkeit der mechanischen Verbindung zwischen Motor und Last begrenzt sein, d.h. elastische Effekte auftreten. In beiden Fällen führt das vorstehend genannte Konzept eines Steuerungssystems unter Umständen zu resonanten Schwingungen. Es können sogenannte „Chattering“- oder „Hunting“-Effekte auftreten, bei denen die Zielposition der Last nicht exakt erreicht wird oder die Last permanent um diese Zielposition schwingt. Im schlimmsten Fall wird der Regelkreis instabil. In diesen Fällen ist ein komplexeres Regelungskonzept erforderlich.

Wird eine sehr präzise Positionierung der Last benötigt, ist ein zusätzlicher abgangsseitiger Istwertgeber (Encoder) zur direkten Messung der Lastbewegung zu empfehlen. Solche Antriebssysteme enthalten somit zwei Encoder zur Positionserfassung:

- Einen Drehgeber, der als „Hilfs-“ oder „Auxiliary-Encoder“ bezeichnet wird und steif mit der Motorwelle verbunden ist und idealerweise ein Bestandteil der Motorkombination ist.
- Ein weiterer Geber, der als „Haupt-“ oder „Main-Encoder“ bezeichnet wird, ist abgangsseitig bei der zu bewegenden Last angekoppelt.

Falls wie beschrieben zwei Encoder im System vorhanden sind, können beide Positionsmessungen zur Regelung herangezogen werden, um eine deutlich bessere Qualität und Präzision der Lastbewegung zu erzielen und die negativen Einflüsse von Toleranzen, Spiel und Elastizitäten der mechanischen Antriebskomponenten zu kompensieren. Dieses Regelungskonzept, bei dem sowohl motor- wie lastseitige Encoder-Informationen verarbeitet werden, wird als Dual-Loop-Regelung bezeichnet. Solch eine Dual-Loop-Reglerstruktur, die eine präzise Positionierung auch mit „nicht idealen“ mechanischen Komponenten im Antriebsstrang ermöglicht, steht bei den maxon EPOS4-Positioniersteuerungen für DC- und EC-Motoren zur Verfügung (**Abb. 1**). Um mechanischen Resonanzen und dem Getriebespiel entgegenzuwirken wird die Dual-Loop-Regelung durch einen Filter zweiter Ordnung und einen Gain Scheduler erweitert. Die EPOS4 Inbetriebnahme-Software „EPOS Studio“ verfügt zudem über einen Wizard zum vollautomatischen Tuning (= Anpassung) der Parameter dieses komplexen Regleralgorithmus auf das mechanische Antriebssystem und die Last. Die Aufzeichnung und der Export von Bode-Diagrammen der Übertragungsfunktion des Antriebs wird ebenfalls unterstützt. Die Bode-Diagramme können von Regelungstechnikern zur Analyse oder zur manuellen Berechnung der optimalen Reglerparameter herangezogen werden.

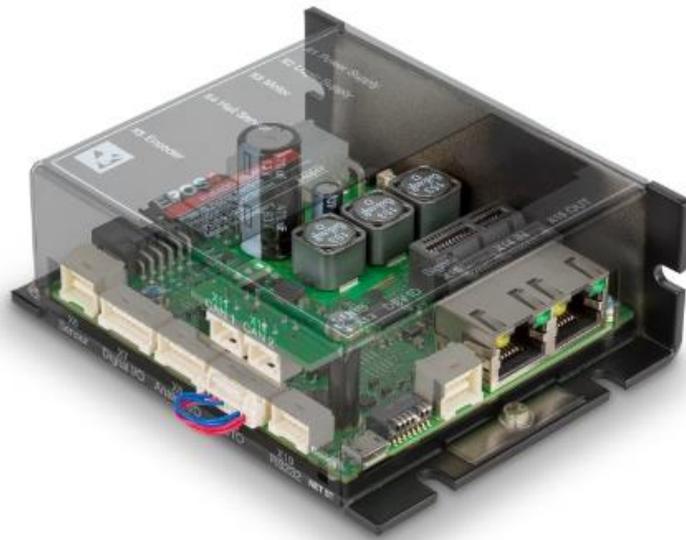


Abb. 1 Die Positioniersteuerung EPOS4 50/5 von maxon.

Reglerarchitektur

Abb. 2 zeigt die kaskadierte Reglerstruktur, die in der Positioniersteuerung EPOS4 bei Einsatz der Dual-Loop-Regelung verwendet wird. Der innerste Regelkreis ist eine feldorientierte (= FOC) Motorstromregelung basierend auf der Motorstrommessung als Feedbacksignal. Der zweite innere Regelkreis (als „Hilfsregelkreis“ oder „Auxiliary control“ bezeichnet) regelt die Motordrehzahl basierend auf dem Encoder an der Motorwelle, während der äussere Regelkreis (als „Hauptregelkreis“ oder „Main control“ bezeichnet) die Lastposition basierend auf dem lastseitigen Encoder regelt.

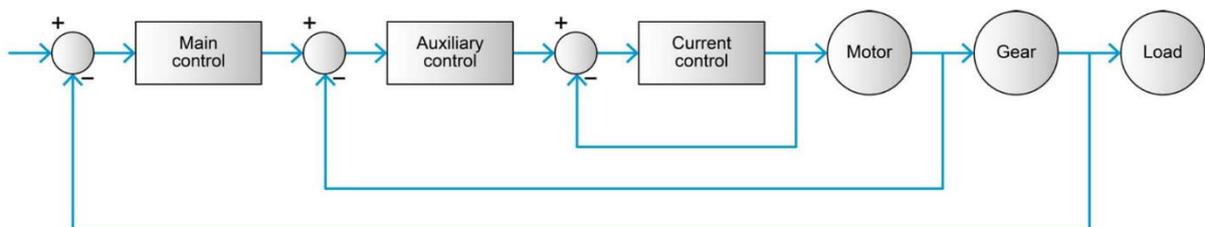


Abb. 2 Die Dual-Loop-Architektur besteht aus drei integrierten Rückführkreisen.

Eine detailliertere Ansicht der Struktur der EPOS4 Dual-Loop-Regelung ist **Abb. 3** zu entnehmen. Der Hauptregelkreis besteht aus einem proportionalen (P) Regler, einem Gain Scheduler, der auf die Verstärkung des proportionalen Reglers wirkt, und einem Filter zweiter Ordnung (= „Main loop filter“) für die Ausgangsgrößen des Hauptregelkreises (= „Main loop“). Von einem Bahnplaner werden die SOLL-Position der Last, deren SOLL-Geschwindigkeit und SOLL-Beschleunigung, als Eingangsgrößen für den Hauptregelkreis vorgegeben. Als weitere Eingangsgröße des Hauptregelkreises misst der Encoder an der Last deren aktuelle IST-Position. Dieser Hauptregelkreis wird bei der Dual-Loop-Regelung der EPOS4 im 833 Hz Takt ausgeführt; was einem Drittel der Taktfrequenz des Hilfsregelkreises von 2,5 kHz entspricht. Der Hilfsregelkreis besteht aus einem proportional-integralen (PI) Regler mit Vorsteuerung (Feed Forward, FF) und einem Beobachter (= „Observer“), der die Motordrehzahl aus der Positionsinformation des motorseitigen Encoders und der Motorstrommessung abschätzt.

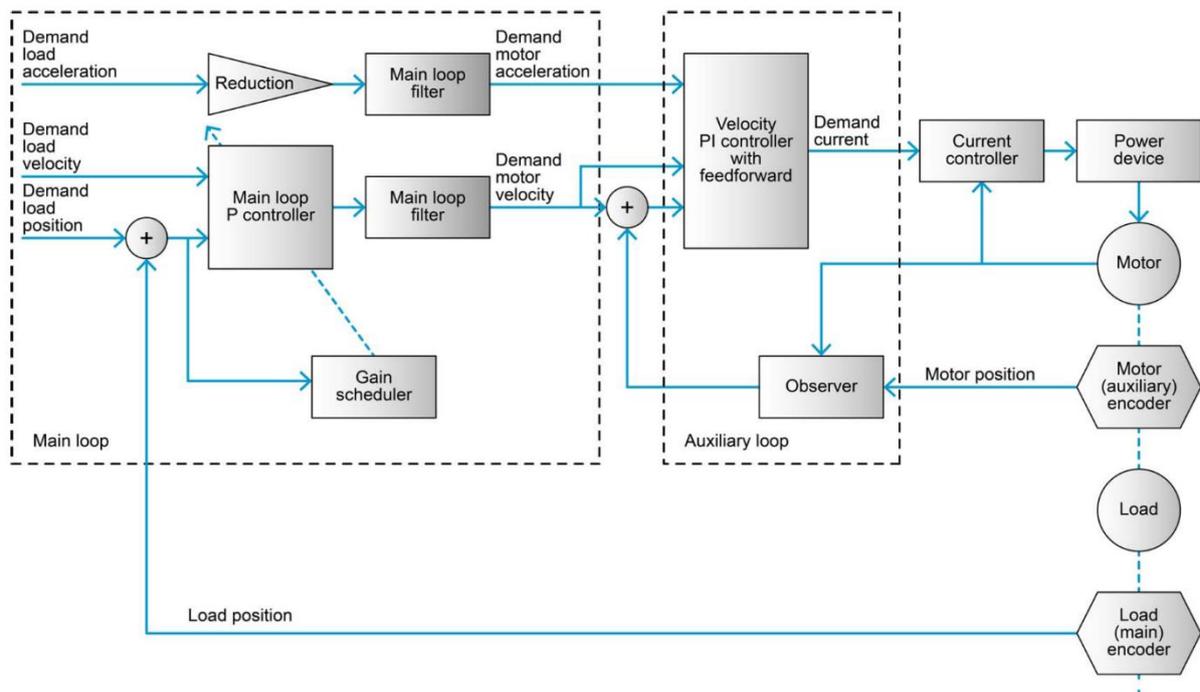


Abb. 3 Detaillierte Darstellung aller Komponenten des Dual-Loop-Steuerungssystems.

Gain Scheduler

Der Gain Scheduler (= eine Art von „automatischer Anpassung der P-Verstärkung“) ist der Algorithmus, den die EPOS4 Dual-Loop-Regelung zur Eliminierung von sogenannten „Chattering“- oder „Hunting“-Effekten verwendet, die durch das Getriebeispiel verursacht werden. Einerseits sollte die P-Verstärkung (= „P Gain“) des Hauptregelkreises (= „Main loop“) möglichst hoch eingestellt werden, sodass die Regelung schnell und aggressiv auf Abweichungen von der SOLL-Vorgabe reagieren kann und der Antrieb möglichst präzise den Vorgabewerten folgt. Andererseits kann eine zu hoch eingestellte P-Verstärkung dazu führen, dass die gewünschte SOLL-Position der Last nicht stabil erreicht wird, sondern stattdessen um diese herum schwingt. Dies kann durch eine Reduktion der P-Verstärkung des Hauptregelkreises vermieden werden. Der Gain Scheduler ermöglicht als Lösung für diese beiden

Anforderungen die automatische Anpassung der P-Verstärkung, indem er die P-Verstärkung des Hauptregelkreises von der Abweichung zwischen der lastseitigen SOLL- und IST-Position, dem sogenannten Schleppfehler, abhängig macht. Wenn der Schleppfehler gross ist, ist die P-Verstärkung ebenfalls gross; dies führt zu einem aggressiveren Verhalten der Steuerung, welches wiederum zu einer schnellen Reduzierung des Fehlers zwischen der lastseitigen SOLL-Vorgabe und der erfassten IST-Position führt. Durch die Reduzierung der SOLL-/IST-Abweichung wird auch die Verstärkung des Hauptregelkreises reduziert, sodass bei Annäherung der lastseitigen IST-Position an die Zielposition die Regelung nicht mehr zu „aggressiv“ reagiert und trotz Getriebeispiel im Antrieb keine Schwingungen auftreten.

Hauptregelkreis-Filter (= „Main loop filter“)

Falls die Verbindung zwischen Motor und Last nicht ausreichend steif ist (was zum Beispiel durch Elastizitäten von Kupplungen, Riemen oder lange Wellen bedingt sein kann), muss die Dual-Loop-Regelung in den Antrieb induzierte Schwingungen unterdrücken. Diese Schwingungen treten bei einer bestimmten Frequenz auf. Diese sogenannte „Resonanzfrequenz“ ist von Elastizität, Dämpfung und Kupplungsgeometrie abhängig. Selbst eine geringfügige Anregung des Antriebs auf dieser Frequenz kann zur signifikanten Verstärkung von Schwingungen führen. Um dies zu vermeiden, verwendet die EPOS4 Dual-Loop-Regelung einen Kerbfilter (= „Notch filter“) zweiter Ordnung. Dieser ist so ausgelegt, dass er die Resonanzfrequenz und den angrenzenden Frequenzbereich im Ausgangssignal des Hauptregelkreises unterdrückt. Auf diese Weise wird verhindert, dass harmonische Schwingungen im Antriebsstrang erzeugt werden.

Autotuning-Verfahren

Um die Inbetriebnahme zu vereinfachen, bietet maxon die „EPOS Studio“ Software mit einem integrierten Wizard für das Autotuning an, mit dem die Parameter der Dual-Loop-Regelung ermittelt und überprüft werden können. Das Autotuning-Verfahren besteht aus zwei vollautomatisch ausgeführten Experimenten.

- Das erste Experiment verursacht Schwingungen der Motorposition, welche zur Bestimmung des Trägheitsmoments und der Drehmomentkonstante des Motors sowie der Reibung im Motor verwendet werden. Basierend auf den identifizierten Daten werden die Parameter für den Hilfsregelkreis und den Beobachter berechnet.
- Das zweite Experiment wird zur Berechnung der Parameter für den Hauptregelkreis einschliesslich des Kerbfilters eingesetzt. In diesem Experiment wird ein PRBS-Signal (= „Pseudo-Random Binary Sequence“) zur Anregung der Regelstrecke verwendet. Aus Sicht der Regelungstechnik besitzen PRBS-Signale zwei günstige Eigenschaften. Einerseits sind sie periodisch, wodurch aus den Daten verschiedener Perioden ein Durchschnitt gebildet werden kann. Andererseits ist die Grösse ihrer Fourier-Transformation über das gesamte Spektrum flach; was wiederum eine gute Identifizierung der Übertragungsfunktion ermöglicht. Basierend auf den sich ergebenden Eingangs-/Ausgangsdaten kann die Übertragungsfunktion des Systems, das durch den Hauptregelkreis geregelt werden soll, identifiziert werden. EPOS Studio liefert ein Bode-Diagramm dieser Übertragungsfunktion. Ein typisches Diagramm ist in **Abb. 4** dargestellt. Dieses Diagramm enthält nützliche Informationen für Regelungstechniker. Es zeigt eine allfällige Resonanzstelle und deren Frequenz. Diese Information kann zur

Ermittlung von Reglerbegrenzungen verwendet werden. Die Daten des Frequenzgangs bzw. die Frequenzkennlinie des Bode-Diagramms können exportiert werden und bei Bedarf für eine weiterführende Analyse oder Optimierung der Reglerparameter verwendet werden. Auf Grundlage der identifizierten Übertragungsfunktion werden die Parameter der Hauptregelkreis, Gain Scheduler und Kerbfilter automatisch berechnet.

EPOS Studio bietet die Möglichkeit die Parameter der Dual-Loop-Regelung – teilweise oder vollständig – manuell anzupassen, um bei Bedarf spezifische Reglereigenschaften weiter zu optimieren.

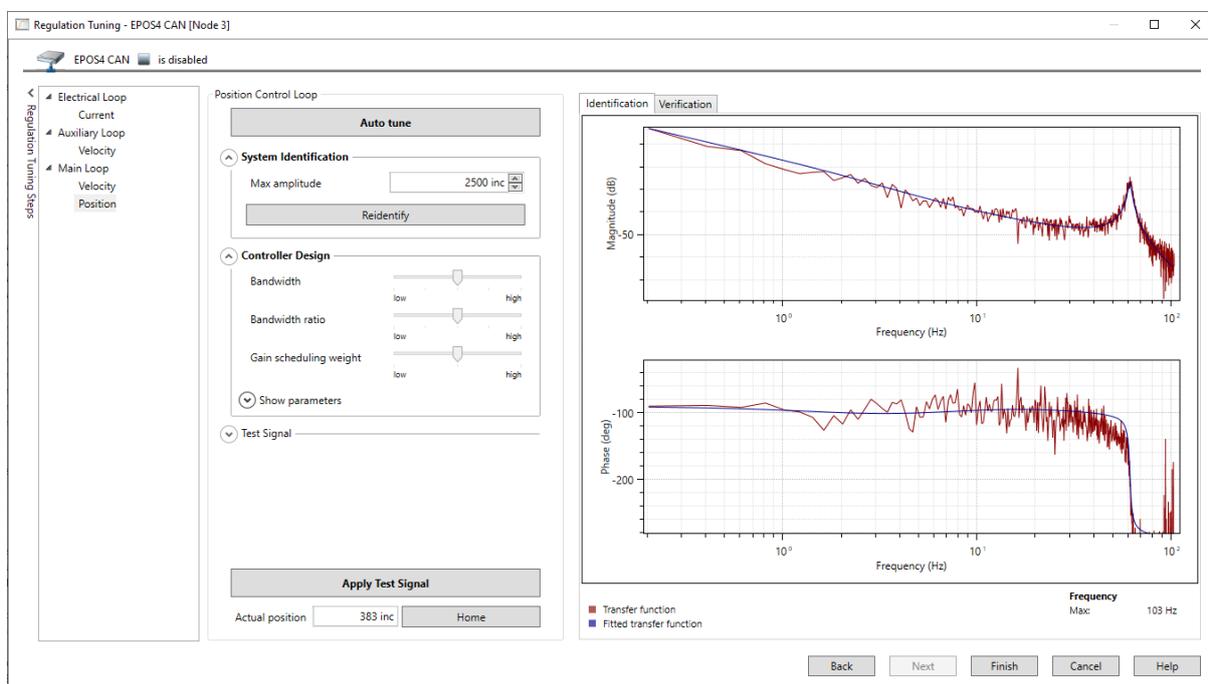


Abb. 4 Beispiel einer durch EPOS4 identifizierten Übertragungsfunktion, die eine eindeutige Resonanzstelle aufweist.

Leistung im Vergleich mit Single-Loop-Steuerung

Zur Veranschaulichung der Vorteile bei Verwendung der EPOS4 Dual-Loop-Regelung folgt ein Vergleich mit der EPOS4 Positioniersteuerung, welche als Single-Loop-Regler konfiguriert wurde. Letztere nutzt den lastseitigen Encoder für die Positionsregelung und den motorseitigen Encoder nur zur Kommutierung des bürstenlosen Motors.

Die Tests werden an einem mechanischen System mit zwei unterschiedlichen Arten der mechanischen Kopplung zwischen Last und Antriebsmotor durchgeführt:

- Im ersten Fall besteht die Verbindung zwischen Antriebsmotor und Last aus Zahnrädern mit deutlichem Spiel (**Abb. 5**).
- Im zweiten Fall ist zwischen Antriebsmotor und Last eine weiche, elastische Kupplung mit schwach gedämpfter Resonanz (**Abb. 6**) vorhanden.

Die Last besteht in beiden Fällen aus einem weiteren Motor, der benutzt wird um ein Stördrehmoment zu erzeugen. Die an die beiden Motoren angeschlossenen EPOS4 Steuerungen werden über EPOS Studio gesteuert. Über den „Data Recorder“ von EPOS Studio werden die Daten des Experiments erfasst.

In beiden Experimenten ist der Testmotor ein EC-4pole 30 von maxon, kombiniert mit einem Encoder mit 500 Impulsen pro Umdrehung (= „cpt – counts per turn“) und einem maxon GP 32 HP Getriebe mit einer Untersetzung von 14:1. Als Last wird ein EC-max 40 Motor von maxon mit einem 7500 cpt Encoder verwendet.

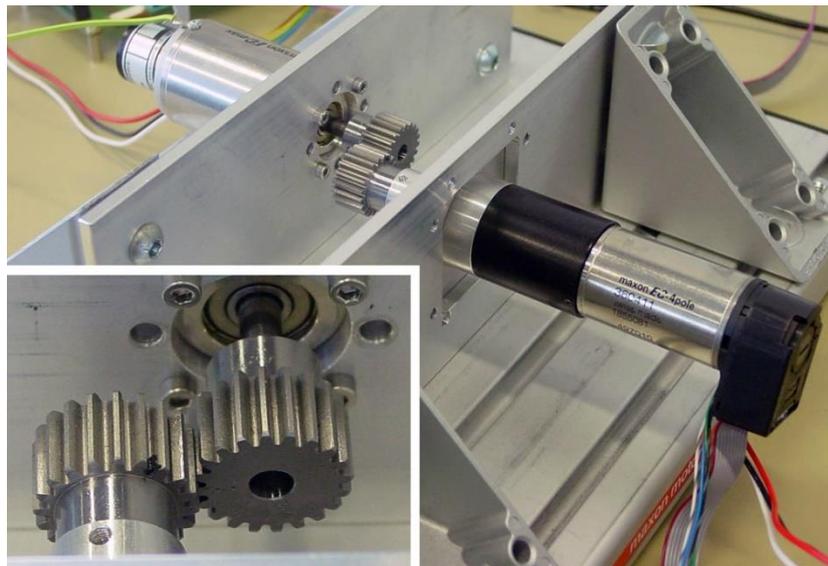


Abb. 5 System mit Spiel. Die Detailaufnahme zeigt die Verbindung über Zahnräder.

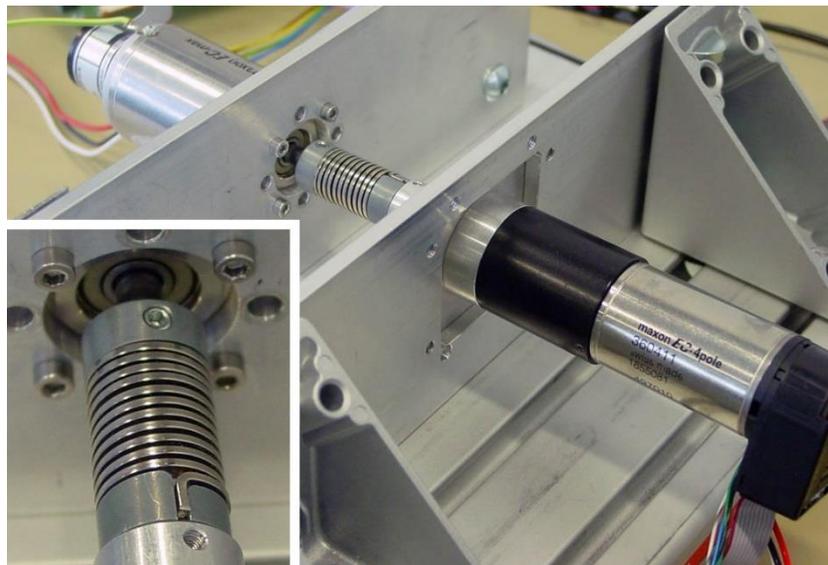


Abb. 6 System mit Elastizität. Die Detailaufnahme zeigt die elastische Verbindung.

Zur Evaluierung des Führungsverhaltens (= Abweichung zwischen SOLL-/IST-Position der Last) wird ein Bewegungsprofil mit trapezförmigem Drehzahlprofil vorgegeben. Damit identische Bedingungen für die Single- und die Dual-Loop-Steuerung sichergestellt sind, wird die Last anfänglich so positioniert, dass die Zahnräder in Bezug auf die Zielposition in entgegengesetzter Richtung im Eingriff stehen. So muss die Steuerung zunächst den spielbedingten Schlupf überwinden, bevor die effektive Bewegung der Last in Richtung der Zielposition startet.

Abb. 7 zeigt das Lastpositionsprofil und den Schleppfehler beim Experiment mit der Single- und der Dual-Loop-Regelung für den ersten Fall mit der Verbindung via Zahnräder. Wie die Abbildung zeigt, steigt der Fehler bei der Single- und der Dual-Loop-Regelung durch den spielbedingten Schlupf in den ersten Millisekunden in gleicher Weise an. Die Dual-Loop-Regelung überwindet den Schlupf jedoch schneller und zeigt insgesamt einen kleineren Schleppfehler.

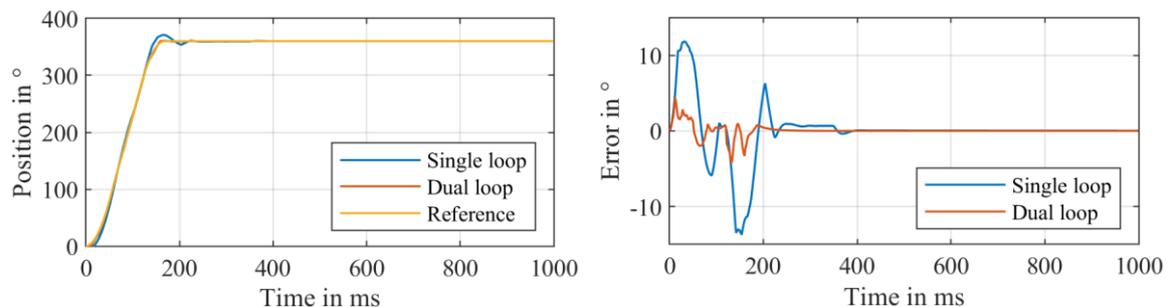


Abb. 7 Vergleich des Last-Bewegungsprofils zwischen der Single- und der Dual-Loop-Regelung beim System mit Getriebeispiel. Führungsverhalten (links) und Schleppfehler (rechts).

Abb. 8 zeigt das Lastpositionsprofil und den Schleppfehler beim Experiment mit der Single- und der Dual-Loop-Regelung für den zweiten Fall mit der Kupplung mit Elastizität. Abgesehen von einem leichten Überschwingen tritt bei der Dual-Loop-Regelung am mechanischen System keine Resonanz auf und der Schleppfehler beträgt maximal nur ein Sechstel von dem Fehler, der bei der Single-Loop-Regelung aufgezeichnet wurde.

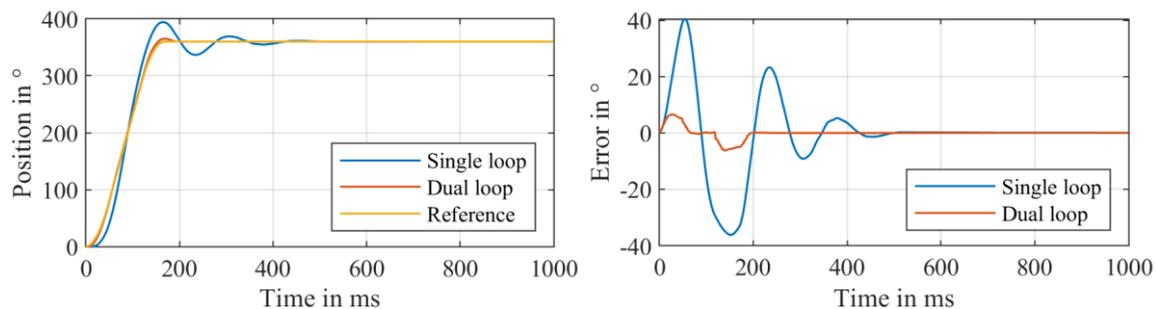


Abb. 8 Vergleich des Last-Bewegungsprofils zwischen der Single- und der Dual-Loop-Regelung beim System mit Elastizität. Führungsverhalten (links) und Schleppfehler (rechts).

Schlussfolgerung

In diesem Artikel wurde die Architektur der Dual-Loop-Regelung der EPOS4 Positioniersteuerung von maxon vorgestellt. Bei dieser Architektur sind sowohl Motor als auch Last mit jeweils einem eigenen Encoder bestückt, um das Reglerverhalten im Vergleich zur Konfiguration mit nur einem einzigen Encoder zu verbessern. Integrale Bestandteile dieser Dual-Loop-Implementation sind des Weiteren ein Gain Scheduler, um „Chattering“- und „Hunting“-Effekte auszuschliessen, sowie ein Filter zweiter Ordnung, der die Anregung mechanischer Resonanzen unterbinden soll.

Die EPOS Studio Software besteht aus einer leistungsstarken Sammlung von Wizards und Tools inklusive eines Autotuning-Features für die Dual-Loop-Regelung. Das Autotuning und die zugehörigen Datenaufzeichnungen können einerseits zur vollständigen und automatischen Parametrierung der Dual-Loop-Regelung eingesetzt werden, andererseits aber auch zum Erfassen wichtiger Informationen über den mechanischen Antrieb genutzt werden. Bei Bedarf können mit diesen Daten durch manuelle Anpassungen der Reglerparameter spezifische Systemeigenschaften weiter optimiert werden.

Die Dual-Loop-Regelung wurde in Bezug auf das Führungsverhalten mit einer Single-Loop-Regelung verglichen. Insgesamt ist dabei festzustellen, dass sich bei mechanischen Systemen, in denen der Antrieb eine gewisse Elastizität oder signifikantes Getriebeispiel aufweist, die Position der Last mit einer Dual-Loop-Architektur präziser regeln lässt.

AutorInnen



Federico Percacci erwarb 2014 den Bachelor-Abschluss in Automatisierungstechnik an der Politecnico di Milano, Mailand (Italien), und 2016 den Master-Abschluss in Robotik an der ETH Zürich, Zürich (Schweiz). Seit 2016 ist er bei der maxon motor ag, Sachseln (Schweiz), beschäftigt. Seine Forschungsinteressen umfassen Modellierung und Steuerung von Elektromotoren.



Marko Tanaskovic wurde 1986 in Valjevo (Serbien) geboren. 2009 erwarb er einen Abschluss zum B.Sc. mit Auszeichnung an der Universität von Belgrad (Serbien), 2011 einen Abschluss zum M.Sc. mit Auszeichnung an der ETH Zürich und 2015 einen Ph.D. an der ETH Zürich, alle in der Fachrichtung Elektrotechnik. Im Jahr 2011 hat er für die ABB Schweiz (Unternehmensforschung) im Bereich der Modellierung elektronischer Komponenten gearbeitet. Seit 2015 ist er bei der maxon motor ag als Entwicklungsingenieur für Motorsteuerungen beschäftigt. Seine Forschungsinteressen umfassen adaptive und lernende Steuerungskonzepte, MPC- (Model Predictive Control) und sensorlose Motorsteuerungen. Er war mehrere Jahre lang Empfänger eines Stipendiums der serbischen Regierung für die besten serbischen Studenten im Ausland.



Chen Zhao wurde 1979 in Liaoning (China) geboren. Er erwarb 2001 einen Abschluss zum B.Sc. an der University of Shanghai for Science and Technology (China) sowie 2006 bzw. 2010 das Diplom und den Ph.D. in Maschinenbau an der Technischen Universität München (Deutschland). Er hat zwei Jahre bei der Woodward Switzerland AG verbracht, in denen er an der Entwicklung von Konvertersystemen der Megawatt-Klasse mitgewirkt hat. Seit 2011 arbeitet er als Projektmanager bei der maxon motor ag in der Schweiz. Seine Forschungsinteressen umfassen Steuerung, Modellierung und Simulation von elektrischen Antriebssystemen, Robotik und elektromagnetische Systeme.



Patrik Gnos wurde 1969 in der Schweiz geboren. Er erwarb 1994 sein Diplom in Elektrotechnik an der Hochschule Luzern. Seit 1994 arbeitet er für die maxon motor ag, einem Schweizer Unternehmen zur Entwicklung und Fertigung von Hochpräzisions-Antriebssystemen. Im Jahr 2013 wurde er Leiter der Abteilung Corporate Center Motion Control und 2019 Mitglied der Geschäftsleitung.