

Einleitung

Bei vielen regelungstechnischen Anwendungen wird gefordert, dass die Regelgröße einer periodischen Führungsgröße folgt oder dass der Einfluss einer periodischen Störgröße kompensiert wird. Oft werden auch beide Forderungen gleichzeitig gestellt.

Die Regelung eines in diesem Sinn periodischen Prozesses erfordert einen Regler, der stationäre Genauigkeit bei periodischen Führungs- und Störgrößen leistet, damit die Regelgröße im eingeschwungenen Zustand exakt der periodischen Führungsgröße entspricht, auch unter Einfluss einer periodischen Störgröße.

Gegenstand der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur digitalen Regelung periodischer Prozesse entworfen und in zwei industriellen Anwendungen erfolgreich zur Lösung von Regelungsproblemen eingesetzt.

Das Verfahren erhielt den Namen *ZyklusRegler*.

Der *ZyklusRegler* leistet stationäre Führungsgenauigkeit bei periodischen Sollwertverläufen und kompensiert periodische Störgrößen vollständig. Er ist sowohl zur Regelung stabiler als auch instabiler Regelstrecken geeignet. Die Parametrierung des Reglers ist gemäß einer einfachen, allgemeingültigen Vorschrift durchzuführen, wobei nur wenige Kenntnisse über das Verhalten der Regelstrecke einfließen müssen. Es wird kein mathematisches Modell der Regelstrecke benötigt. Das Verfahren erfordert für seine Verwendung kein vertieftes Wissen aus der Regelungstheorie. So erfordert die Parametrierung des *ZyklusRegler* nur wenig mehr Aufwand als die Parametrierung eines PID-Reglers.

Motivation

Die Notwendigkeit, ein digitales Verfahren zur Regelung periodischer Prozesse zu entwerfen, resultierte aus der regelungstechnischen Problemstellung, die es bei einer industriellen Anwendung zu lösen galt. Am elektrohydraulischen System eines Gleitlagerprüfstands [3] musste die Regelung der hydraulischen Kraft, mit der die Gleitlager zur Untersu-

chung ihres Verschleißverhaltens zu belasten sind, realisiert werden. Dabei sollten die Führungsgrößen periodisch und hochdynamisch verlaufen. Zusätzlich war der Einfluss periodischer Störungen zu kompensieren. Die Regelung sollte mit wenig Aufwand an das elektrohydraulische System anzupassen sein. Der Entwurf und die Auslegung des Reglers sollten keine Modellbildung des elektrohydraulischen Systems erfordern. Damit könnten auch Anwender mit geringen Kenntnissen der System- und Regelungstheorie die Kraftregelung am Prüfstand erfolgreich parametrieren und in Betrieb nehmen.

Der *ZykloRegler* sollte außerdem in einer zweiten industriellen Anwendung der Lösung eines Regelungsproblems dienen. Hier bestand die Aufgabe in der Leerlauf- und Laufruheregelung eines Dieselmotors mit Direkteinspritzung. Um die mittlere Kurbelwellendrehzahl stationär genau auf ihrem konstanten Sollwert halten zu können, müssen periodische Störanteile, die überwiegend aus Fertigungstoleranzen des Einspritzsystems resultieren, kompensiert werden. Die Kompensation der Störanteile wird in aktuellen Motorsteuerungssystemen mit einer zusätzlichen, dem Leerlaufregler überlagerten Funktion, oft als Laufruheregelung oder Zylindergleichstellung bezeichnet, realisiert. Der *ZykloRegler* sollte diese Kombination aus Leerlaufregler und zusätzlicher Funktion zur Laufruheregelung ersetzen.

Einordnung des Regelungsverfahrens

Als sich der *ZykloRegler* bereits erfolgreich im Einsatz befand, wurde – zur Einordnung und gegebenenfalls zum Vergleich – nach alternativen Verfahren gesucht, die sich ebenso zur Lösung der in den beiden industriellen Anwendungen vorliegenden Regelungsprobleme eignen würden.

Zur Regelung periodischer Führungsgrößen oder zur Kompensation periodischer Störungen wird häufig das als *Repetitive Control* bezeichnete und umfassend in [4] dargestellte Verfahren eingesetzt. *Repetitive Control* kann nach zwei verschiedenen Prinzipien ausgeführt werden. Die Ausführungen, bei denen auch die periodischen Stellgrößenanteile im geschlossenen Regelkreis erzeugt werden, basieren auf dem sogenannten Inneren-Modell-Prinzip [11, 8]. Ein anderes Prinzip ist die Verwendung eines externen Modells periodischer Stör- und Führungsgrößen [4]. Dabei

werden die periodischen Stellgrößenanteile außerhalb des geschlossenen Regelkreises erzeugt.

Da sich der *ZykloRegler* im geschlossenen Regelkreis befindet, wurden die Ausführungen von *Repetitive Control* zum Vergleich in Betracht gezogen, die dem Inneren-Modell-Prinzip gerecht werden, das nachfolgend kurz erläutert wird.

Allgemein kann ein Regler die Forderung der stationären Genauigkeit nur für bestimmte Signale erfüllen. Dabei sind die Polstellen der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises entscheidend.

Wenn sämtliche Polstellen einer in den Frequenzbereich transformierten Führungs- oder Störgröße auch Polstellen des offenen Regelkreises darstellen, so wird die Führungsgröße stationär genau eingeregelt beziehungsweise der Einfluss der Störgröße vollständig kompensiert. Der offene Regelkreis muss also ein Modell der Führungs- und Störgrößen enthalten, damit der Regelfehler im stationären Zustand Null ist. Dieser Zusammenhang wird in der Literatur als Inneres-Modell-Prinzip geführt. Das Innere-Modell-Prinzip gilt gleichermaßen für kontinuierliche und für diskrete Systeme.

Wie in [4] erörtert wird, benötigt *Repetitive Control* in den Ausführungen, die dem Inneren-Modell-Prinzip gerecht werden, zur Reglerauslegung eines digitalen Reglers eine Übertragungsfunktion der Regelstrecke. Dies erfordert die Modellbildung der Regelstrecke, was in vielen Fällen sehr aufwendig ist¹. Zudem muss eine instabile Regelstrecke zunächst mit einem zusätzlichen Regler stabilisiert werden.

Der *ZykloRegler* wird dem Inneren-Modell-Prinzip gerecht, so dass die Regelabweichung bei periodischen Führungs- und Störgrößen stationär exakt Null ist. Er kann damit als eine weitere Ausführung von *Repetitive Control* betrachtet werden. Im Vergleich besitzt er einen wesentlichen Vorteil darin, dass er sehr einfach zu parametrieren ist, ohne dass eine Übertragungsfunktion der Regelstrecke benötigt wird. Außerdem lässt er sich direkt zur Regelung instabiler Systeme einsetzen, wodurch mit

¹Es gibt modifizierte *Repetitive Control* - Verfahren, die kein Modell der Regelstrecke benötigen [4]. Diese Regler leisten jedoch dem Inneren-Modell-Prinzip entsprechend nur noch annähernd stationäre Genauigkeit bei periodischen Führungs- und Störgrößen.

dem *ZykloRegler* ein schnelleres Einschwingverhalten des geschlossenen Regelkreises erreicht werden kann als mit *Repetitive Control*.

Der *ZykloRegler* stellt für jede Anwendung, in der *Repetitive Control* als Regelungsverfahren zum Einsatz kommt, eine einfach zu realisierende Alternative dar. Umgekehrt wäre bei den in dieser Arbeit realisierten Anwendungen *Repetitive Control* als Alternative zum *ZykloRegler* nur unter vergleichsweise stark erhöhtem Aufwand einsetzbar, da die Auslegung der Regler jeweils ein Modell der Regelstrecke erfordern würde.

Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert.

Der erste Teil enthält drei Kapitel, die sich mit der Entwicklung, der Darstellung und der Systemtheorie des Regelungsverfahrens *ZykloRegler* befassen.

In Kapitel 1 werden schrittweise zwei Übertragungselemente des *ZykloRegler* entwickelt, mit denen die stabile, stationär genaue Regelung periodischer Führungsgrößen realisiert wird. Dabei bietet das Kapitel einen anschaulichen Zugang zur Regelung periodischer Prozesse.

In Kapitel 2 wird die Struktur des *ZykloRegler* dargestellt. Es werden die Übertragungsfunktion des Reglers sowie allgemeingültige Kriterien zur Parametrierung genannt. An einem Simulationsbeispiel wird das Verhalten des Reglers demonstriert.

In Kapitel 3 wird der *ZykloRegler* systemtheoretisch analysiert. Es wird gezeigt, dass der Regler die geforderte stationäre Genauigkeit bei periodischen Führungs- und Störsignalen leistet. Außerdem wird ermittelt, unter welchen Bedingungen die zur stationären Genauigkeit benötigten grenzstabilen Polstellen des offenen Regelkreises beim Schließen des Regelkreises in das Innere des Einheitskreises der z -Ebene überführt werden, was eine notwendige Bedingung für die Stabilität des geschlossenen Regelkreises ist. Daraus resultiert eine Vorschrift für die Parametrierung des Reglers.

Im zweiten Teil der Arbeit wird gezeigt, wie der *ZykloRegler* in zwei technischen Anwendungen zur Lösung regelungstechnischer Probleme erfolgreich eingesetzt wurde.

In Kapitel 4 wird der Einsatz des *ZykloRegler* am Gleitlagerprüf-

stand dargestellt. Hier galt es, zur außermotorischen Erprobung der Verschleißsicherheit von Motorengleitlagern hochdynamische, periodische Belastungsprofile stationär genau und stabil zu führen.

In Kapitel 5 wird dargestellt, wie der *ZykloRegler* zur gleichzeitigen Leerlauf- und Laufruheregung eines Dieselmotors mit Direkteinspritzung verwendet wurde.

Anmerkungen

Zum Verständnis der theoretischen Ausführungen in dieser Arbeit werden Grundkenntnisse aus der Systemtheorie und der Regelungstechnik benötigt, wie sie beispielsweise in [7, 11, 16, 12, 17, 9, 10] vermittelt werden.

Da es zu den meisten Themen eine Fülle an Literaturquellen gibt, werden in dieser Arbeit Literaturverweise überwiegend stellvertretend für das jeweilige Themengebiet gegeben, was einem übersichtlichen Literaturverzeichnis dient.