

# Versuch 5 – Analyse von Zweipunkt-Regelungen

Raphael Frey

*FHNW – Hochschule für Technik  
Studiengang EIT  
Grundlagenlabor 4*

20. Mai 2016

In diesem Versuch werden schaltende Regler betrachtet. Dies sind Regler, welche lediglich eine diskrete, endliche Anzahl Ausgangswerte kennen (üblicherweise zwei oder drei). Beispiele dafür sind Bimetallschalter in Bügeleisen mit Stellungen **ein** und **aus** oder Klimaanlage mit den Zuständen **kühlen**, **heizen** und **ausgeschaltet**. Es gibt sowohl simple Implementationen (z.B. der erwähnte Bimetallschalter) wie auch kompliziertere Ausführungen, welche auf Halbleitertechnologie beruhen.

Die grosse Stärke von schaltenden Reglern ist ihr geringer Energieverbrauch im Vergleich den schaltbaren Leistungen. Es können problemlos Leistungen von mehreren Kilowatt geschaltet werden bei vernachlässigbarem Energieverbrauch des Schalters selbst, womit beinahe 100% Effizienz erreicht werden (beim Schalten; natürlich macht dies keine Aussage über die Effizienz des restlichen Systems).

Sämtliche schaltenden Regler weisen eine Hysterese auf: Es existiert keine singuläre Schwelle, welche jeweils einen Schaltvorgang auslöst. Die Schaltvorgänge in die verschiedenen Richtungen haben jeweils eine unterschiedliche Auslöseschwelle. Dies verhindert ein Oszillieren des Reglers um eine Schaltschwelle. Je enger die Hysterese ist, um so höher ist die Schaltfrequenz des Reglers.

Mit einer geeigneten Rückführung können mit schaltenden Reglern auch PD- und PID-Regler nachgebildet werden. Dabei wird zusätzliche zum Ausgang des Gesamtsystems noch der Reglerausgang selbst auf den Reglereingang zurückgeführt (zur Erinnerung: In einem normalen linearen Regelkreis wird lediglich der Ausgang des gesamten Systems auf den Reglereingang zurückgeführt, nicht aber der Ausgang des Reglers selbst). Das Feedback orientiert sich dabei ungefähr an der Umkehrfunktion des PD- bzw. PID-Reglers (ist aber nicht unbedingt die exakte reziproke Funktion). Andere Regler als PD- und PID-Regler haben Übertragungsfunktionen, deren Umkehrungen nicht realisierbar sind, daher ist die Emulation von kontinuierlichen Reglern nur bei diesen zwei Reglern möglich.

Genau dies wird in diesem Versuch getan: Ausgangspunkt ist eine PT4-Strecke, welche mit einem Schaltregler und geeigneter Rückführung zur Emulation eines PD- und PID-Reglers geregelt werden soll.

Vorbereitend wird der Frequenzgang und die Schrittantwort der Strecke bestimmt. Es handelt sich um eine eher langsame Strecke mit einer Anstiegszeit  $T_g$  von ungefähr 20 Sekunden und Tiefpasscharakteristik.

In den folgenden Versuchen ist als Eingangssignal jeweils ein Schritt mit variierendem Ausschlag benutzt worden, sofern nicht anders angemerkt.

Es wird zuerst der (emulierte) PD-Regler untersucht. Der hier betrachtete Regler (ein Relais) erzeugt an seinem Ausgang einen Wert von 2, die Strecke selbst hat eine Verstärkung von 5. Somit kann am Ausgang des Schaltkreises maximal ein Wert von 10 erzeugt werden.

Liegt das Eingangssignal schön in der Mitte zwischen null und zehn, ergibt sich ein passables Ausgangsverhalten; wie von Kombinationen aus Reglern und Strecken ohne einen Integrator zu erwarten bleibt jedoch eine Abweichung zwischen Sollwert und Istwert.

Verschiebt man den Zielwert gegen die obere bzw. untere Grenze des am Ausgang erzeugbaren Bereichs, ergeben sich eher unerwünschte Verhalten: Ist der Sollwert tief, überschwingt der Ausgang zuerst sehr stark auf beinahe das Doppelte des Zielwerts, um sich anschliessend mit einem bleibenden Fehler unter dem Sollwert zu stabilisieren. Setzt man den Zielwert zu hoch an (z.B.

9), erreicht der Ausgang den Sollwert gar nie und stabilisiert sich im Dauerbetrieb ebenfalls unter dem Sollwert.

Im stabilen Betrieb ist die Hysterese sehr gut zu beobachten: Der Regler schaltet sich periodisch mit der Schaltfrequenz ein und aus; es ergibt sich ein PWM-Verhalten mit entsprechendem Rippel am Ausgang. Ist die Hysterese sehr langsam, ergibt sich ein tieffrequenter Rippel mit grosser Amplitude am Ausgang. Erhöht man die Schaltfrequenz (bzw. verringert man die Breite  $x_H$  der Hysterese), reduziert sich die Amplitude des Rippels bei einer Zunahme der Frequenz.

Der emulierte PID-Regler unterscheidet sich durch die Rückführung vom emulierten PD-Regler; diese ist nun noch um das einem Integrator entsprechende Glied ergänzt. Der verbleibende Fehler auf dem Ausgang ist somit im Durchschnitt null, der Ausgang oszilliert mit der Schaltfrequenz um den Sollwert.

Beim PID-Regler werden vor allem das Verhalten der Schaltfrequenz in Abhängigkeit des Verhältnisses  $\frac{w}{y_E}$  zwischen Sollwert und erreichbarem Ausgangswert und der Breite  $x_H$  der Hysterese betrachtet.

Variiert man das Verhältnis  $\frac{w}{y_E}$  zwischen null und eins, ergibt sich ungefähr eine umgekehrte parabolische Beziehung: Die Schaltfrequenz  $f_S$  ist maximal in der Mitte zwischen 0 und  $y_E$ , und reduziert sich beim Annähern an die obere respektive untere Grenze. Es ergibt sich ein Arbeitsbereich, innerhalb dessen der Regelkreis optimal funktioniert. Dieser Arbeitsbereich umfasst ungefähr den Mittelwert zwischen null und  $y_E \pm 30\%$ , also etwa 70% dieses Bereichs, zentriert um den Mittelwert des erzeugbaren Ausgangssignals.

Variiert man statt des Verhältnisses  $\frac{w}{y_E}$  die Breite  $x_E$  der Hysterese, zeigt sich eine Beziehung mit  $e^{-x}$ -Charakter: Je schmaler die Hysterese, um so höher die Schaltfrequenz  $f_S$ . Der eingehende Schritt ist bei diesem Versuch auf die Mitte zwischen null und  $y_E$  eingestellt (also die Mitte des Arbeitsbereichs).

Gibt man statt eines Schrittes ein anderes Signal auf den Eingang, kann man weitere interessante Beobachtungen machen. Ein Sinus am Eingang überfordert den Regler vollkommen. Dies ist leicht nachvollziehbar, wenn man bedenkt, dass ein hier verwendete Schaltregler (ein Relais) keine negativen Ausgangswerte liefern kann; somit liegen die negativen Bereiche einer harmonischen Schwingung ausserhalb seines erreichbaren Wertebereichs.

Letztlich ist noch das Verhalten des Regelkreises ohne Rückführung des Reglerausgangs auf den Reglereingang betrachtet worden. Es stellt sich heraus, dass diese zusätzliche Rückführung essentiell ist. Ohne sie wird das System unbrauchbar. Es verbleibt ein sehr grosser Rippel auf dem Ausgang, der Regler kann den Ausgang überhaupt nicht stabilisieren.

Zusammenfassend stechen für mich folgende Punkte heraus:

- Schaltregler können kostengünstig enorm hohe Wirkungsgrade erzielen (deshalb zum Beispiel auch die Verwendung in modernen Schaltnetzteilen in PCs).
- Es wird immer ein Rippel auf dem Ausgangssignal verbleiben. Eine engere Hysterese erhöht die Schaltfrequenz und reduziert die Amplitude des Rippels, kann diesen aber nie ganz zum Verschwinden bringen.
- Nicht alle Eingangssignale eignen sich für Schaltregler; insbesondere Signale mit negativen Anteilen können von einem Regelkreis, der auf einem Schaltregler aufbaut, nicht sinnvoll verarbeitet werden. Entweder muss ein anderer Reglertyp zum Einsatz kommen, oder der Eingang muss zuerst gleichgerichtet werden (ebenfalls siehe PC-Netzteile).
- Auf Schaltreglern basierende Regelkreise haben einen Arbeitsbereich, in dem sie optimal funktionieren, und ausserhalb dessen ihr Verhalten unerwünschte Charakteristiken aufweist (z.B. grosser Rippel, starkes Überspringen, Schaltfrequenz zu klein).
- Die Schaltfrequenz hängt sowohl vom Verhältnis des Sollwerts zum maximal erzeugbaren Ausgang wie auch von der Breite der Hysterese ab.
- Eine Rückführung des *Reglerausgangs* (zusätzlich zum *Systemausgang*) auf den Reglereingang ist notwendig. Hängt man dieses Feedback ab und führt nur noch den Systemausgang auf den Reglereingang zurück, funktioniert der Regelkreis nicht mehr.