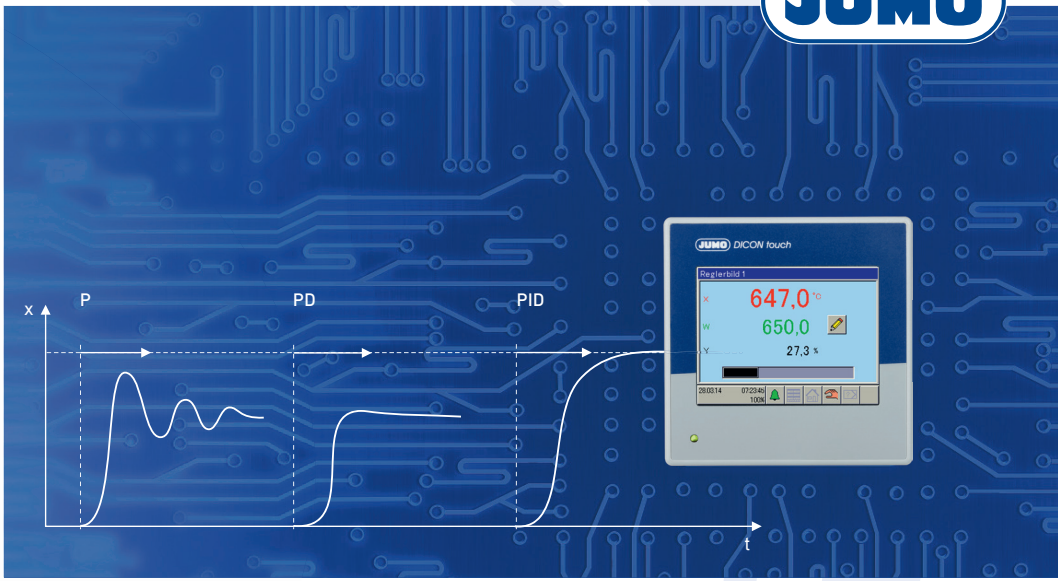


Regelungstechnik

Grundlagen und Tipps für den Praktiker

Manfred Schleicher

Regelungstechnik

Grundlagen und Tipps für den Praktiker

Manfred Schleicher

JUMO GmbH & Co. KG
Moritz-Juchheim-Straße 1
36039 Fulda, Germany
Telefon: +49 661 6003-0
Telefax: +49 661 6003-500
E-Mail: mail@jumo.net
Internet: www.jumo.net

Nachdruck mit Quellennachweis gestattet!
Teilenummer: 00314836
Buchnummer: FAS 525
Druckdatum: 2022
ISBN: 978-3-935742-00-9

Vorwort

Die Regelungstechnik gehört zu den elementaren Bestandteilen moderner Automatisierungstechnologien und ist ein zentraler Baustein der Industrie. Dennoch hat diese oft den Ruf, extrem theorielastig und mathematisch orientiert zu sein. Das vorliegende Fachbuch konzentriert sich deshalb sehr stark auf praxisrelevante Aspekte der Regelungstechnik.

Es soll kein wissenschaftliches Lehrwerk sein, sondern zeigt anwenderbezogen und bewusst befreit von unnötigem theoretischen Beiwerk, wie Regelstrecken definiert, Regelparameter ermittelt und Regler optimiert werden können. Das Fachbuch basiert auf der mehr als 20-jährigen Erfahrung des Autors als Dozent für Mess- und Regeltechnik. Dabei fließen immer wieder praktische Tipps und Tricks aus konkreten Inbetriebnahme-Situationen in die Darstellungen ein.

Trotz seiner Allgemeingültigkeit steht dabei der Einsatz von JUMO-Geräten im Mittelpunkt des Fachbuches. Das Unternehmen verfügt hier über jahrzehntelange Erfahrungen in der Entwicklung und Produktion von regelungstechnischen Geräten. Das umfangreiche Produktportfolio reicht von Einkanalreglern bis hin zu kompletten Automatisierungslösungen. Die Geräte sind rund um den Globus in einer Vielzahl von Anwendungen zu finden.

Das Fachbuch „Regelungstechnik – Grundlagen und Tipps für den Praktiker“ erfreut sich seit Jahren großer Beliebtheit bei Anwendern aus den verschiedensten Branchen und bei Studenten dieses Fachgebiets.

JUMO bietet Praxisseminare zur Regelungstechnik mit hohem Praxisanteil an (http://seminare.jumo.info).

Wir wünschen Ihnen an dieser Stelle viel Freude beim Lesen des Fachbuchs und hoffen, dass Sie einen Mehrwert daraus ziehen können. Ihre Wünsche und Anregungen nehmen wir für weitere Auflagen gerne entgegen.

Fulda, im Januar 2022

Manfred Schleicher

Bemerkung:

Dieses Fachbuch wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Für mögliche Irrtümer übernehmen wir keine Gewähr. Maßgebend sind in jedem Fall die Betriebsanleitungen zu den entsprechenden Geräten.

1 Grundbegriffe und Übersicht 11

1.1 Der geschlossene Regelkreis 11

1.2 Steuern – der Handbetrieb 12

1.3 Das Regelverhalten 12

1.4 Erfassung des Istwertes 13
1.4.1 Die Abtastzeit 13
1.4.2 Universaleingänge von JUMO-Kompaktreglern 13
1.4.3 Anschluss von Sensoren für die Flüssigkeitsanalyse 16

1.5 Ausgangsarten von JUMO-Kompaktreglern 16
1.5.1 Stetiger Ausgang 16
1.5.2 Binärausgänge 17

1.6 Überblick Reglerarten 19

2 Die Regelstrecke 21

2.1 Allgemeines zur Regelstrecke 21

2.2 Strecken mit und ohne Ausgleich 22
2.2.1 Strecken mit Ausgleich 22
2.2.2 Strecken ohne Ausgleich 23

2.3 Strecken(anteile) mit Proportionalverhalten, Totzeit und Verzögerung 24
2.3.1 Strecken mit Proportionalverhalten 24
2.3.2 Strecken mit Totzeit 25
2.3.3 Strecken mit Verzögerungen 27

2.4 Aufnahme der Sprungantwort für Regelstrecken 30

3 Regleranteile PID und die Regelparamter 33

3.1 P-Regler 33
3.1.1 Der Proportionalbereich 34

3.2 I-Regler 39

3.3 PI-Regler 41

3.4 PD-Regler 44
3.4.1 Der praktische D-Anteil – das DT_1-Element 47

3.5 PID-Regler 49
3.5.1 Blockstruktur des PID-Reglers 50

4 Optimierung von Reglern und Auswahl der Reglerstruktur 51

4.1 Allgemeine Information 51

4.2 Führungs-/Störverhalten 51

4.3 Die Optimierungsverfahren 52
4.3.1 Die Schwingungsmethode nach Ziegler und Nichols 52
4.3.2 Verfahren nach der Streckensprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick 53
4.3.3 Verfahren nach der Anstiegsgeschwindigkeit 56
4.3.4 Empirische Methode zur Ermittlung der Regelparameter 57

4.4 Die Selbstoptimierung in JUMO-Kompaktreglern 58
4.4.1 Verfahren nach der Schwingungsmethode 58
4.4.2 Verfahren nach der Sprungantwort 59
4.4.3 Weitere Informationen zu den Optimierungsverfahren 61

4.5 Manuelle Nachoptimierung eines PID-Reglers 62

4.6 Auswahlhilfe hinsichtlich der Reglerstruktur für unterschiedliche Regelgrößen 64

5 Regler mit Binärausgängen 65

5.1 Zweipunktregler 65
5.1.1 Zweipunktregler mit Impulslängenausgang 66
5.1.2 Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang 67
5.1.3 Minimale Einschaltdauer bei Zweipunktregler mit Impulslängenausgang bzw. Impulsfrequenzausgang 68
5.1.4 Sonderfall unstetiger Zweipunktregler 69

5.2 Dreipunktregler 72
5.2.1 Kontaktabstand 73

5.3 Regler zur Ansteuerung von Motorstellgliedern 75
5.3.1 Stellungsregler 76
5.3.2 Dreipunkt-Schrittregler 77
5.3.3 Weitere Informationen zum Stellungs- und Dreipunkt-Schrittregler 79

6 Spezielle Reglerschaltungen 81

6.1 Grundlast 81

6.2 Zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern 82

6.3 Split-Range-Betrieb 84

6.4 Konstanthalten von Störgrößen 85

6.5 Störgrößenaufschaltung 86

6.5.1 Additive Störgrößenaufschaltung 86

6.5.2 Multiplikative Störgrößenaufschaltung 88

6.6 Kaskadenregelung 90

6.6.1 Gründe für die Einführung der Kaskadenregelung 91

6.6.2 Reglerstrukturen und Optimierung von Führungs- und Folgeregler 93

6.7 Verhältnisregelung 93

7 Die Reglerfunktion und weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern 95

7.1 Einrichtung der Reglerfunktion 95

7.2 Rampenfunktion 96

7.3 Programmgeberfunktion 97

7.4 Grenzwertüberwachung 98

7.5 Binärfunktionen 100

7.6 Startup und Diagnosefunktion 101

7.7 Registrierung 102

7.8 Mathematik- und Logikfunktion 103

8 Verwendete Abkürzungen 105

1 Grundbegriffe und Übersicht

1.1 Der geschlossene Regelkreis

Der geschlossene Regelkreis besteht aus der Regelstrecke, dem Regler und dem Stellglied:

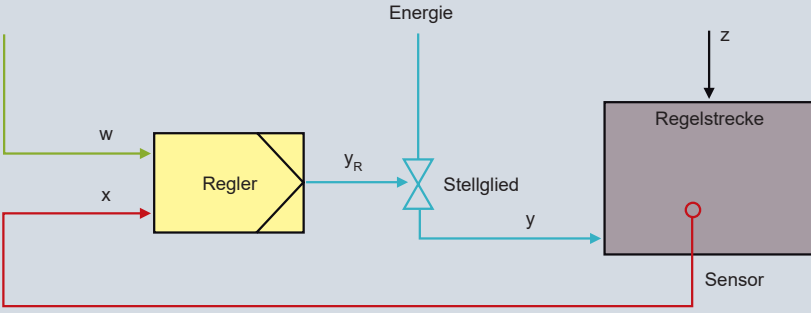


Abbildung 1: Der geschlossene Regelkreis

Die Regelstrecke ist der Anlagenteil, in welchem die **Regelgröße (x)** konstant gehalten wird. Als Beispiel dient ein gasbetriebener Ofen (Abbildung 1). Bei der Regelgröße bzw. dem Istwert handelt es sich um die Temperatur im Ofeninneren. Zur Messung der Temperatur finden in industriellen Prozessen in der Regel Widerstandsthermometer bzw. Thermoelemente Verwendung. Die elektrischen Thermometer können direkt an den Regler angeschlossen werden und der Regler ermittelt aus dem gemessenen Widerstand bzw. der Spannung die Temperatur. Der Istwert wird durch den **Stellgrad (y)** beeinflusst. Im Beispiel handelt es sich bei dem Stellgrad um den Gasfluss.

Stellglied

Die direkte Beeinflussung des Stellgrades durch den Regler ist meist nicht möglich, es findet ein Stellglied Verwendung. Die Ansteuerung des Stellgliedes erfolgt durch den Reglerstellgrad, dieser liegt im Normalfall zwischen 0 und 100 %. Im Beispiel (Abbildung 1) findet ein Proportionalventil als Stellglied Verwendung. Bei einem Reglerstellgrad von 100 % gelangt die maximale Menge an Gas in die Regelstrecke. Entsprechend wird bei 50 % Reglerstellgrad etwa die halbe Gasmenge in die Strecke geführt. Der Reglerstellgrad y_R gibt in etwa den Prozentsatz der maximal möglichen Leistung an und stellt für den Regelungstechniker im Vergleich zum Stellgrad y die wichtigere Größe dar.

Regler
Der Regler regelt mit seinem Reglerstellgrad den Istwert auf den am Regler eingestellten **Sollwert (w)**. Die Differenz zwischen Soll- und Istwert (w − x) wird als **Regelabweichung e** bezeichnet. Ändert sich eine der **Störgrößen z**, wird die Regelgröße in unerwünschter Weise beeinflusst.

Weitere Informationen zu Störgrößen befinden sich in Kapitel 2.

Abbildung 2 zeigt das Reglerbild eines JUMO DICON touch mit Istwert, Sollwert und Reglerstellgrad.

Abbildung 2: Reglerbild JUMO DICON touch

1.2 Steuern – der Handbetrieb

Im sogenannten Automatikbetrieb regelt der Regler in der beschriebenen Weise den Istwert auf den Sollwert. Moderne Kompaktregler ermöglichen zusätzlich die manuelle Ansteuerung des Stellgliedes: Im Handbetrieb wird manuell ein definierter Reglerstellgrad vorgegeben. Aus dem Reglerstellgrad ergibt sich eine durch das Stellglied bereitgestellte Leistung und, letztlich anlagenbedingt, ein bestimmter Istwert. Im Handbetrieb wird das Stellglied – und somit auch der Istwert – gesteuert, die Regelung ist außer Betrieb gesetzt.

1.3 Das Regelverhalten

Kompaktregler arbeiten in den meisten Anwendungen als PID-Regler. Die Intensität der Anteile wird an die jeweilige Regelstrecke angepasst. Dies geschieht über die Dimensionierung der Regelparameter X_p (Proportionalbereich), T_n (Nachstellzeit) und T_v (Vorhaltezeit).

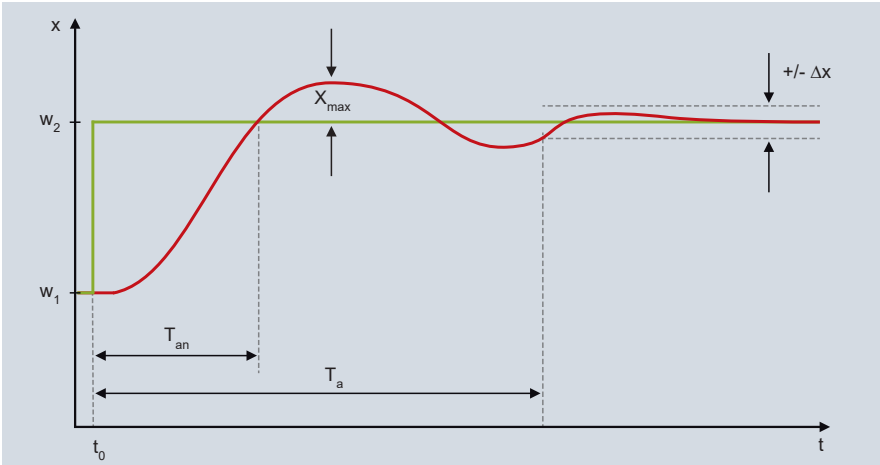


Abbildung 3: Kriterien für die Regelgüte

Abbildung 3 zeigt das mögliche Regelverhalten nach einer sprungförmigen Sollwertänderung. Als Maß für die Regelgüte können folgende Größen herangezogen werden: Die Anregelzeit **(T_{an})** bezeichnet die Zeit, in welcher der Istwert nach der Sprungvorgabe zum ersten Mal den Sollwert erreicht. Um den Sollwert herum kann ein Band definiert werden **(+/- Δx)**, dessen Dimensionierung von den Anforderungen an die Regelung abhängt. Die Zeit, ab welcher sich der Istwert dauerhaft in diesem Band befindet, wird als Ausregelzeit **(T_a)** bezeichnet.

Kommt es nach der Vorgabe eines neuen Sollwertes zum Überschwingen, bezeichnet man den maximalen Abstand des Istwertes vom Sollwert als Überschwingweite **(X_{max})**.

Die Regelgüte ist umso höher, je kleiner die vorliegenden Werte für T_{an}, T_a und X_{max} sind.

1.4 Erfassung des Istwertes

1.4.1 Die Abtastzeit

Moderne Kompaktregler arbeiten auf Basis von Mikroprozessoren, welche Rechenzeit benötigen. Der Istwert wird über den Sensor erfasst, intern verarbeitet und der Stellgrad ausgegeben. Nach dem Aktualisieren des Ausgangs wird das Eingangssignal erneut eingelesen. Die Zeit zwischen zwei Einlesevorgängen des Eingangssignals wird als Abtastzeit bezeichnet.

Typische Abtastzeiten von JUMO-Reglern liegen im Bereich von 50 bis 250 ms. Für die meisten Regelungen in der Prozesstechnik sind bereits 250 ms ausreichend. Sehr schnelle Vorgänge (z. B. das Regeln eines Pressendrucks) erfordern eine geringere Abtastzeit.

1.4.2 Universaleingänge von JUMO-Kompaktreglern

JUMO-Kompaktregler verfügen in den meisten Fällen über universelle Analogeingänge. An diese Eingänge wird unter anderem der Sensor für die Istwerterfassung angeschlossen.

In der Mess- und Regeltechnik dienen die sogenannten **Einheitssignale** zur Signalübertragung. Primär findet hier das Stromsignal 4 bis 20 mA Verwendung, weiterhin existieren die Signale 0 bis 20 mA, 2 bis 10 V und 0 bis 10 V. Die Universaleingänge können Einheitssignale auswerten, wie in Abbildung 4 für einen Druckmessumformer gezeigt.

Abbildung 4: Beispielhafte Signalübertragung über Einheitssignal 4 bis 20 mA

Der dargestellte Druckmessumformer misst einen Relativdruck von 0 bis 10 bar und gibt diesen über ein Analogsignal 4 bis 20 mA aus. Der universelle Eingang des Reglers ist auf 4 bis 20 mA eingestellt und auf 0 bis 10 bar skaliert. Der Druckmesswert steht im Regler zur Verfügung und alle Einstellungen beziehen sich auf die skalierte Einheit (bar). Das Netzteil stellt die Spannungsversorgung für den Druckmessumformer bereit.

Sehr verbreitet sind JUMO-Kompaktregler im Bereich von Temperaturregelungen, die Geräte ermöglichen den direkten Anschluss von **Widerstandsthermometern**:

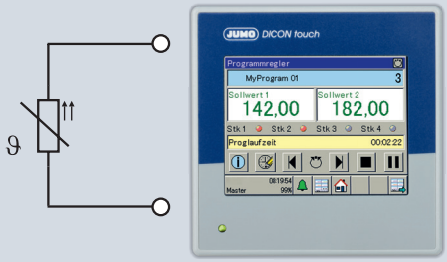


Abbildung 5: Widerstandsthermometer am Kompaktregler Typ JUMO DICON touch

Der universelle Eingang des Reglers ist auf Widerstandsthermometer (Zweileiteranschluss) einzustellen und die jeweilige Linearisierung (Pt100, Pt1000 etc.) ist anzugeben. Mithilfe der Linearisierung ermittelt der Regler aus dem gemessenen Widerstandswert die vorliegende Temperatur am Widerstandsthermometer.

Der Standard in der Industrie ist der Dreileiteranschluss, in vielen Fällen können Widerstandsthermometer auch in Vierleitertechnik angeschlossen werden.

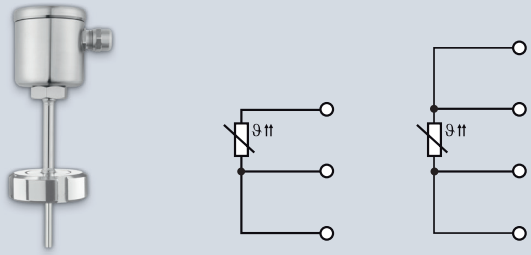


Abbildung 6: Widerstandthermometer für die Lebensmittelindustrie und schematische Darstellung der Drei- und Vierleiter-Anschlusstechnik

Der Hauptgrund für den Einsatz von Thermoelementen ist eine relativ hohe Temperatur (typisch größer als 600 °C). Der Universaleingang in JUMO-Kompaktreglern bietet auch die Anschlussmöglichkeit für diese Art der Thermometer, siehe Abbildung 7.

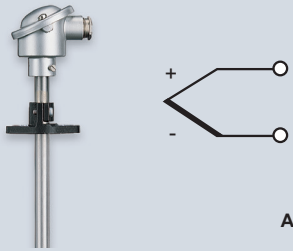


Abbildung 7: Einstecktherмoelement und Symbolik

Der universelle Eingang des Reglers ist auf „Thermoelement“ einzustellen und die jeweilige Linearisierung [beispielsweise NiCr-Ni (Typ K)] anzugeben. Aus der gemessenen Thermospannung ermittelt der Regler mithilfe der Linearisierung die vorliegende Temperatur am Thermoelement.

Die Rückmeldung der Position von Stellgliedern wie Ventilen, Klappen etc. kann über Widerstandspotenziometer geschehen. Die Elemente sind in dem Stellglied mit eingebaut und der Schleifer wird in Abhängigkeit von der Position verfahren:

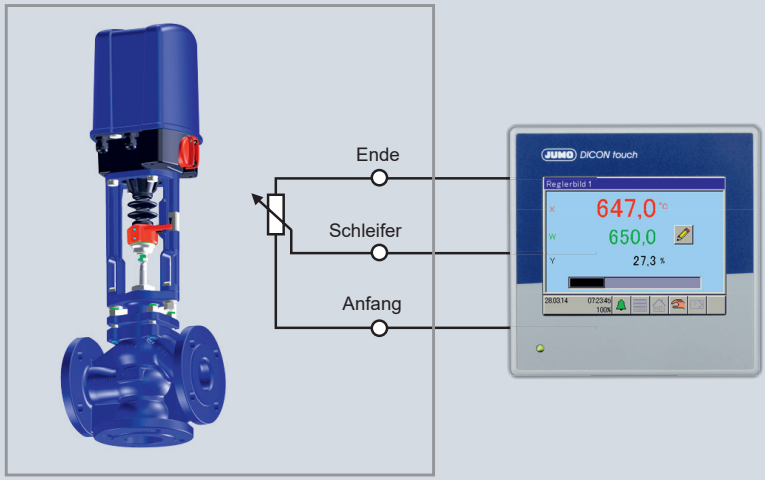


Abbildung 8: Stellantrieb der Firma ARI-Armaturen mit Anschluss der Stellgradrückmeldung an den Kompaktregler JUMO DICON touch

Der universelle Eingang des Reglers ist auf „Widerstandspotenziometer“ einzustellen und die Anzeigewerte sind für „Schleifer = Position Anfang“ und „Schleifer = Position Ende“ anzugeben, üblicherweise 0 bis 100 (%).

1.4.3 Anschluss von Sensoren für die Flüssigkeitsanalyse

JUMO verfügt über jahrzehntelange Erfahrung in der Produktion von Sensoren für die Flüssigkeitsanalyse. Sensoren für pH-Wert, Redox-Potenzial, konduktive und induktive Leitfähigkeit etc. können direkt an JUMO-Messumformer und -Regelgeräte der Analysenmesstechnik angeschlossen werden.

Abbildung 9: Sensoren für die Flüssigkeitsanalyse

1.5 Ausgangsarten von JUMO-Kompaktreglern

Je nach vorliegender Regelstrecke, erforderlicher Regelgüte und der Verfügbarkeit erfolgt die Auswahl des geeigneten Stellgliedes. Das Stellglied wiederum benötigt ein bestimmtes Steuersignal vom Regler. JUMO-Regler bieten hinsichtlich der Ausgänge folgende Möglichkeiten:

1.5.1 Stetiger Ausgang

Stetige Stellglieder verändern den Stellgrad stetig in Abhängigkeit vom Reglerstellgrad. Beispiele sind:

- Frequenzumrichter zur Steuerung der Drehzahl eines Asynchronmotors
- Proportionalventile für die Durchflusssteuerung
- Thyristorleistungssteller zur Steuerung der elektrischen Leistung

Die Ansteuerung der Stellglieder geschieht über Einheitssignale (Kapitel 1.4.2) durch einen stetigen Ausgang.

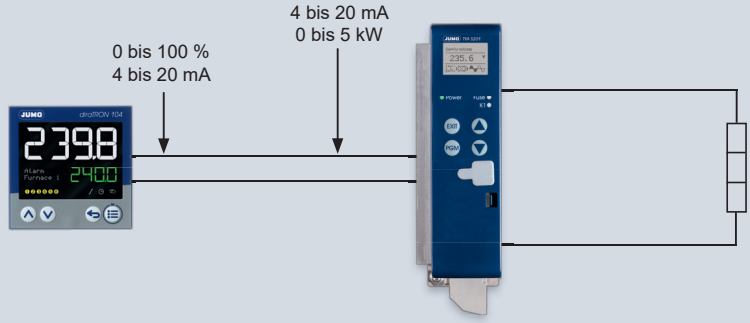


Abbildung 10: Kompaktregler JUMO diraTRON 104, Thyristorleistungssteller JUMO TYA 201 und Heizelement

Der Regler (Abbildung 10) gibt den Reglerstellgrad als 4-bis-20-mA-Signal aus. Der Thyristorleistungssteller verändert proportional zum Stromsignal die Leistung für das Heizelement.

1.5.2 Binärausgänge

JUMO-Kompaktregler sind hervorragend für die Regelung der unterschiedlichsten physikalischen Größen geeignet. Besonders verbreitet sind die Komponenten im Bereich der Temperaturregelung. Zur Regelung dieser Größe finden häufig binäre Ausgänge Verwendung. Zum Einsatz kann diese Ausgangsart überall da kommen, wo die Regelstrecke durch ihre Trägheit die stoßweise zugeführte Energie glättet.

Der Klassiker unter den binären Ausgangsarten ist der Relaisausausgang. Angeboten wird er als Schließer- oder Wechselkontakt. Der mechanische Ausgang kommt zur Ansteuerung mit geringer Schalthäufigkeit zum Einsatz (Leistungsschütze, Magnetventile etc.).

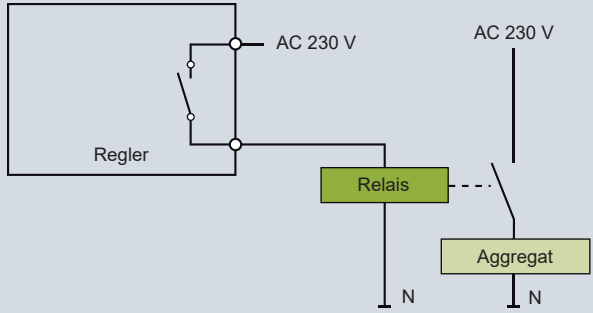


Abbildung 11: Schließerkontakt für die Ansteuerung eines Relais

Die Verwendung von Relaisausgängen erfordert die Berücksichtigung der Kontaktlebensdauer. Beispielhaft ist der technischen Spezifikation eines Kompaktreglers hinsichtlich des Schaltkontaktes folgende Information zu entnehmen: *Kontaktlebensdauer 350 000 Schaltungen bei Nennlast oder 750 000 Schaltungen bei 1 A*. Die erforderliche Schalthäufigkeit ist umso größer, je schneller das zeitliche Verhalten eines Prozesses ist.

Bei höherer Schalthäufigkeit und Schaltung einer Wechselspannung(!) kommen **Halbleiterrelais** bzw. **Triacs** zum Einsatz, siehe Abbildung 12.

Die Elemente bestehen aus zwei antiparallel geschalteten Thyristoren und schalten Wechselspannung quasi verschleißfrei.

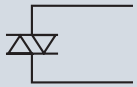


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Halbleiterrelais bzw. Triacs

Digitalausgänge (beispielsweise 0 oder 12 V) finden bei der Ansteuerung von Stellgliedern mit einer Gleichspannung und geringem Strombedarf Verwendung. Typischer Anwendungsfall ist die Ansteuerung von Thyristorleistungsschaltern für die Versorgung von Heizelementen mit elektrischer Energie:

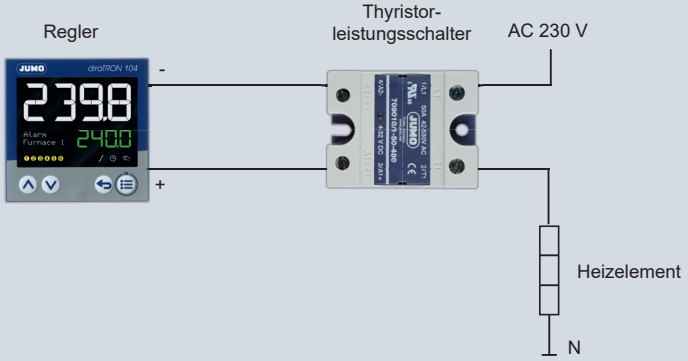


Abbildung 13: Ansteuerung eines Thyristorleistungsschalters über den Logikausgang eines Reglers

Für die Zudosierung von beispielsweise Säuren, Laugen oder Chlor finden Dosierpumpen Verwendung. Die Stellglieder verfügen häufig über einen Impulseingang, dessen Ansteuerung generell mit einem Relaisausgang möglich ist. Aufgrund der meist hohen Schalthäufigkeit kommen sogenannte PhotoMOS®-Relais zum Einsatz, siehe Abbildung 14.

PhotoMOS®-Relais ermöglichen die verschleiß- und potenzialfreie Schaltung von Gleich- und Wechselspannungen (Potenzialtrennung zwischen Regler und Dosierpumpen).

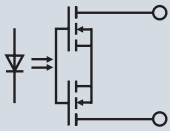


Abbildung 14: Symbolische Darstellung eines PhotoMOS®-Relais

1.6 Überblick Reglerarten

Mit JUMO-Reglern können die folgenden Reglerarten realisiert werden:

Stetige Regler steuern über einen stetigen Ausgang stetige Stellglieder an. Die Regler verändern proportional zu dem jeweiligen Stellgrad ihr Ausgangssignal (meist 4 bis 20 mA).

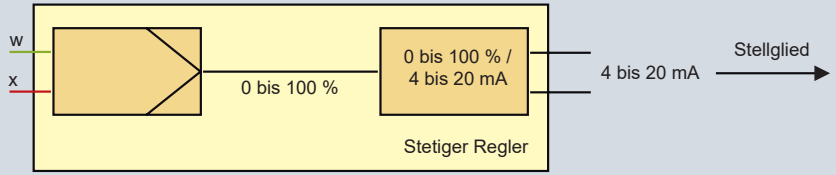


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines stetigen Reglers

Zweipunktregler verfügen über einen binären Ausgang zur Ansteuerung des Stellgliedes. Neben einem Relaisausgang sind die in Kapitel 1.5.2 beschriebenen Binärausgänge möglich. Die Regler variieren die relative Einschaltdauer proportional zum berechneten Stellgrad.

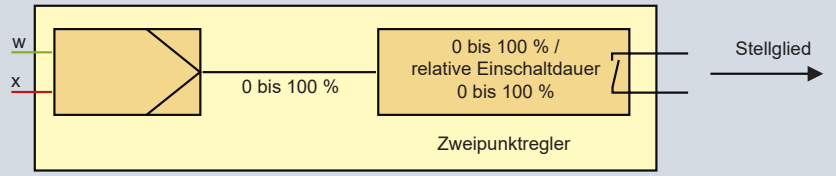


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Zweipunktreglers

Zur Ansteuerung von Dosierpumpen können die Regler aus dem Bereich der Analysenmesstechnik weiterhin mit einem Impulsfrequenzausgang betrieben werden: Der Binärausgang wird mit einer proportional zum Stellgrad steigenden Frequenz angesteuert.

Dreipunktregler ermöglichen die Beeinflussung der Regelgröße in zwei unterschiedliche Richtungen. Beispiele sind Heizen und Kühlen, Be- und Entfeuchten oder die Neutralisation mit Lauge und Säure. Die Regler berechnen einen Stellgrad im Bereich von -100 bis +100 %. Bei positivem Stellgrad wird proportional zu diesem die relative Einschaltdauer für das Stellglied 1 erhöht. Arbeiten die Regler mit einem negativen Stellgrad, wird entsprechend die relative Einschaltdauer von Stellglied 2 erhöht:

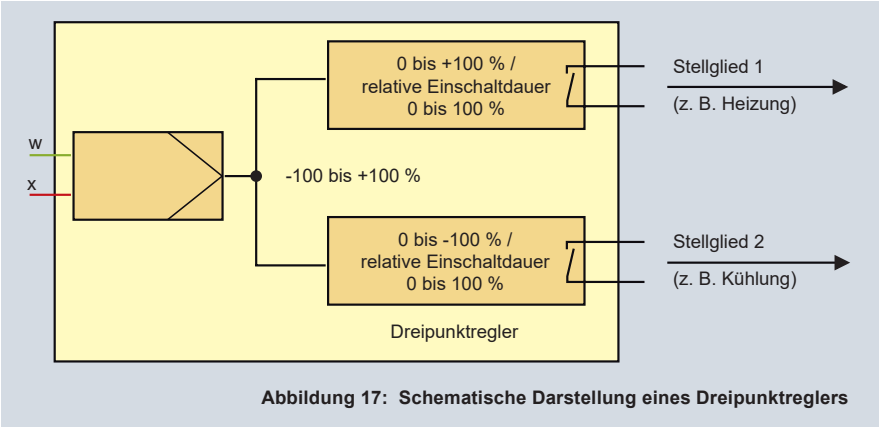


Abbildung 17: Schematische Darstellung eines Dreipunktreglers

Auch für die Dreipunktregler sind alle in Kapitel 1.5.2 beschriebenen Binärausgänge möglich. Bei Verwendung von JUMO-Reglern aus dem Bereich der Analysenmesstechnik können beide Ausgänge als Impulsfrequenzausgänge betrieben werden.

Statt mit Binärausgängen kann die Stellgradausgabe auch mit stetigen Ausgängen erfolgen.

Dreipunkt-Schritt- und **Stellungsregler** sind für die Ansteuerung von Motorstellgliedern geeignet. Die beiden Ausgänge der Regler steuern über den Stellmotor ein Stellglied auf und zu. Der Stellungsregler benötigt eine Rückmeldung über die Position des Stellgliedes. Der Dreipunkt-Schrittregler kommt ohne diese Stellgradrückmeldung aus.

2 Die Regelstrecke

2.1 Allgemeines zur Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der Anlagenteil, in dem die Regelgröße auf den Sollwert geregelt wird. Ordnet man das Stellglied der Regelstrecke zu, beginnt die Regelstrecke an dem Ort, an dem der Regler seinen Stellgrad aufschaltet. Die Regelstrecke endet an der Stelle, an welcher der Istwert erfasst wird – am Sensor. Auf die Regelstrecke wirken Störgrößen, deren Änderungen sich auf die Regelgröße auswirken.

Abbildung 18 zeigt als Beispiel für eine Regelstrecke einen gasbetriebenen Ofen:

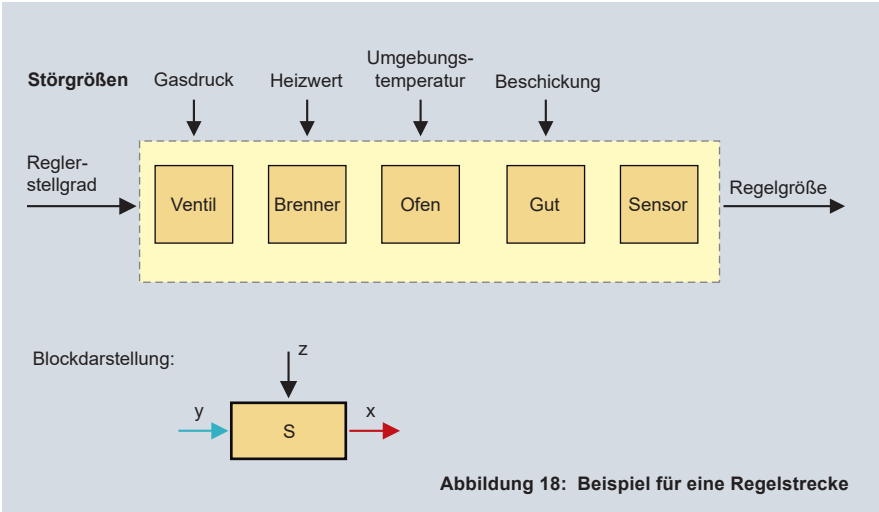


Abbildung 18: Beispiel für eine Regelstrecke

Der Reglerstellgrad ist am Ventil aufgeschaltet. Geregelt werden soll die Temperatur des Ofengutes. Ein Temperatursensor befindet sich im Gut und somit am Ende der Regelstrecke.

In der Regelstrecke befinden sich Zeitglieder bzw. Energiespeicher, diese verlangsamen das Ausbreiten der Energie: Ändert sich der Reglerstellgrad, verfährt das Ventil relativ schnell in die neue Position. Zügig stellt sich ein neuer Gasfluss für den Brenner ein. Das Ofeninnere erwärmt sich langsam und mit großer Verzögerung wird die Temperatur des Ofengutes ansteigen.

Veränderungen von Störgrößen nehmen Einfluss auf den Istwert. Eine der Störgrößen im System ist der Gasversorgungsdruck. Befindet sich das System in einem ausgeregelten Zustand, ergeben sich bei einer Veränderung des Gasdruckes dynamische Regelabweichungen. Der Regler wirkt durch eine Stellgradänderung entgegen und kompensiert den Einfluss der Störgröße.

2.2 Strecken mit und ohne Ausgleich

2.2.1 Strecken mit Ausgleich

Die Regelstrecke in Abbildung 18 ist eine Strecke mit Ausgleich. Es besteht ein proportionales Verhältnis zwischen dem vorgegebenen Stellgrad und dem sich einstellenden Istwert. Abbildung 19 zeigt den Istwertverlauf für eine Strecke mit Ausgleich nach sprungförmigen Stellgraderhöhungen:

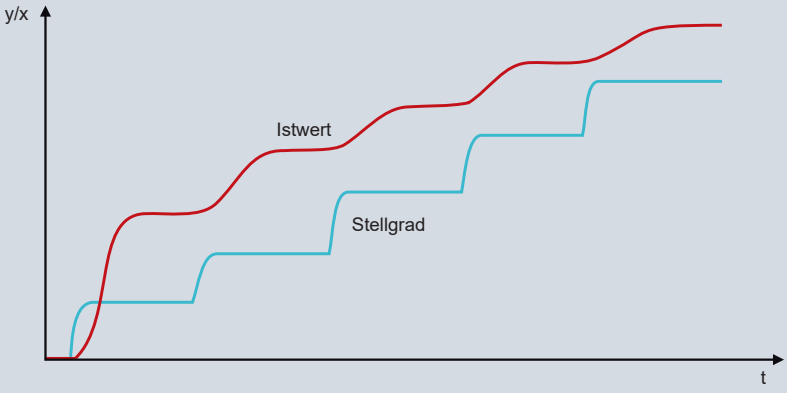


Abbildung 19: Istwertverlauf für eine nichtlineare Regelstrecke mit Ausgleich bei stufenweiser Erhöhung des Stellgrades

Im Beispiel wird der Stellgrad sprungförmig um die immer gleiche Sprunghöhe vergrößert, die sich daraus ergebende Istwertänderung wird immer geringer. Die Regelstrecke mit Ausgleich zeigt nichtlineares Verhalten.

Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke beschreibt das Verhältnis zwischen Istwertänderung und Stellgradänderung. Nichtlineare Regelstrecken verändern den Übertragungsbeiwert je nach Arbeitspunkt. Diese Tatsache kann für unterschiedliche Sollwerte eine Änderung der Regelparameter erfordern.

2.2.2 Strecken ohne Ausgleich

Strecken ohne Ausgleich reagieren auf einen Stellgradsprung mit einer kontinuierlichen Veränderung des Istwertes. Die Steilheit des Istwertes ist abhängig von den Streckeneigenschaften und verhält sich proportional zum vorgegebenen Stellgrad.

Abbildung 20 zeigt das Verhalten einer Strecke ohne Ausgleich, die beispielhaft betrachtete Strecke weist keine Verzögerungen oder Totzeitglieder auf:

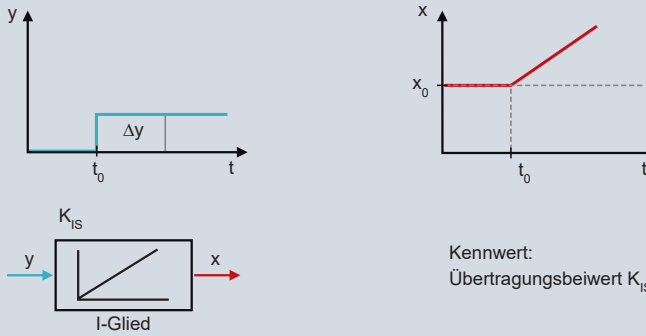


Abbildung 20: Strecke ohne Ausgleich – Sprungantwort und Blocksymbol

Beträgt der Stellgrad für die Strecke 0 % (Abbildung 20), bleibt der Istwert unverändert. Mit einer sprungförmigen Stellgraderhöhung verändert sich der Istwert rampenförmig, bis er in die Begrenzung gelangt. Die Rampensteilheit ist proportional zu dem vorgegebenen Stellgrad. Die Bezeichnung I-Glied resultiert aus dem integrierenden Verhalten.

Für die Vorgabe eines Stellgradsprungs gilt:

$$\Delta x = K_{IS} \times \Delta y \times t \qquad (1)$$

K_{IS}: Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich

Für einen nicht konstanten Stellgrad gilt:

$$\Delta x = K_{IS} \int_{t_0}^{t} y \times dt \qquad (2)$$

Beispiele für Strecken ohne Ausgleich sind:

- Niveauregelungen (Abbildung 21)
- Linearantriebe zur Positionierung von Werkstücken

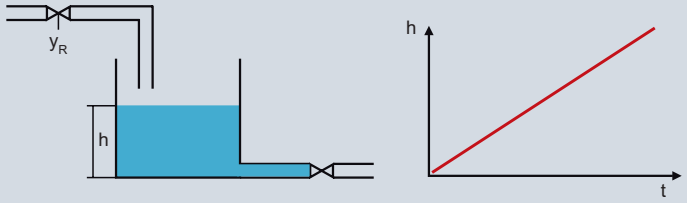


Abbildung 21: Niveauregelstrecke

Abbildung 21 zeigt das klassische Beispiel für eine Strecke ohne Ausgleich: In einem Flüssigkeitsbehälter erfolgt über ein Zulaufventil und die entsprechende Sensorik eine Niveauregelung. Der Behälter verfügt zudem über ein Ablaufventil, dieses ist für die Betrachtung geschlossen. Mit dem Öffnen des Zulaufventils steigt der Füllstand gleichmäßig an.

Das Niveau steigt umso schneller, je weiter das Ventil geöffnet ist. Der Pegel steigt bis zum Überlauf des Behälters, eine Selbststabilisierung ist nicht vorhanden.

Im Gegensatz zu einer Strecke mit Ausgleich stellt sich hier nach einer Stellgradänderung kein Gleichgewichtszustand ein (Ausnahme Ablauf = Zulauf).

2.3 Strecken(anteile) mit Proportionalverhalten, Totzeit und Verzögerung

Alle folgenden Betrachtungen gelten für Strecken mit Ausgleich.

2.3.1 Strecken mit Proportionalverhalten

Proportionale Regelstrecken verstärken den vorgegebenen Stellgrad ohne Zeitverzug mit dem Übertragungsbeiwert K_S:

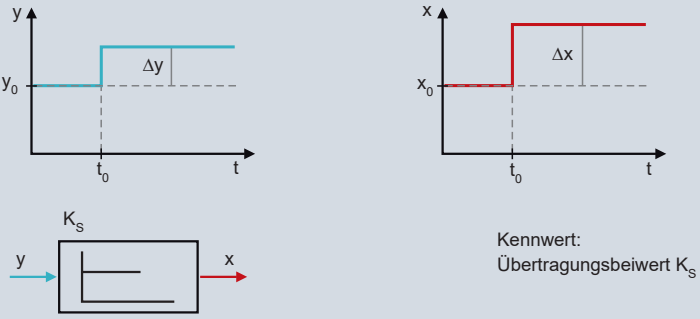


Abbildung 22: P-Regelstrecke – Sprungantwort und Blocksymbol

Mit der sprungförmigen Erhöhung des Stellgrades steigt der Istwert proportional an. Für den Zusammenhang der Regelgrößenänderung Δx in Bezug auf eine Stellgradänderung Δy gilt der bereits beschriebene Zusammenhang:

$$\Delta x = K_s \times \Delta y \qquad (3)$$

Das beschriebene proportionale Verhalten liegt in der Regel in Kombination mit den folgenden Zeitgliedern vor.

2.3.2 Strecken mit Totzeit

P-Strecken treten häufig in Kombination mit Totzeitelementen auf. Diese sogenannten PT_t-Strecken sind durch den Übertragungsbeiwert und die Totzeit definiert:

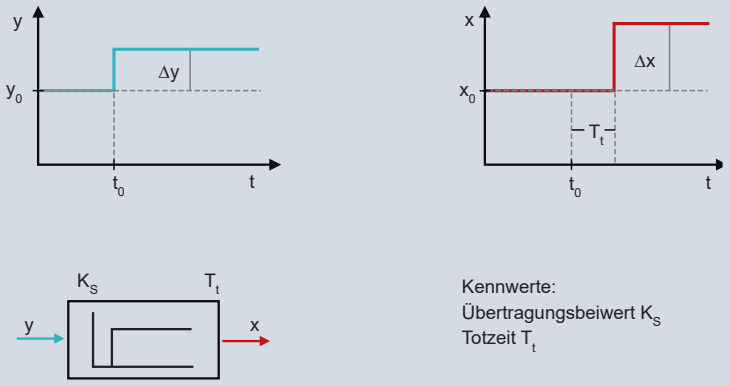


Abbildung 23: PT_t-Strecke - Sprungantwort und Blocksymbol

Die Strecke verhält sich wie eine P-Regelstrecke, jedoch verändert sich der Istwert bei einem Stellgradsprung erst nach Verstreichen der Totzeit. Für den Zusammenhang zwischen Istwert- und Stellgradänderung ergibt sich:

$$\Delta x = K_s \times \Delta y, \text{ jedoch verzögert um die Totzeit } T_t \qquad (4)$$

Ein Beispiel für eine PT_t-Strecke ist ein Förderband, an dem eine konstante Schüttgutmenge ausgeregelt werden soll:

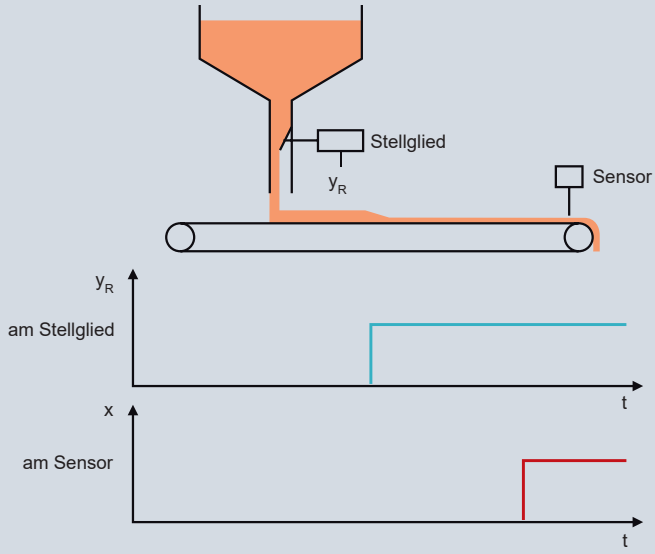


Abbildung 24: Regelung der Schüttgutmenge an einem Förderband

Ein Regler steuert mit seinem Stellgrad eine Klappe. Wird der Stellgrad am Regler sprungförmig erhöht, öffnet die Klappe ohne Zeitverzug (Annahme). Eine bestimmte Menge (Schüttgut/Zeiteinheit) fällt auf das Förderband. Das Förderband benötigt jedoch die sogenannte Totzeit, bis es das Schüttgut zum Sensor transportiert hat.

Zahlenbeispiel zur Ermittlung der Kenngrößen:
Mit einer Stellgradvorgabe von 50 % ergibt sich eine Regelgröße von 100 t/h. Nach einer sprungförmigen Stellgraderhöhung auf 75 % ergibt sich nach 10 s sprungförmig eine Schüttgutmenge von 150 t/h.

Berechnung des Übertragungsbeiwertes:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{150\,\frac{t}{h} - 100\,\frac{t}{h}}{75\,\% - 50\,\%} = \frac{50\,\frac{t}{h}}{25\,\%} = 2\,\frac{t}{h \times \%} \qquad (5)$$

Der Übertragungsbeiwert von 2 $\frac{t}{h \times \%}$ bedeutet, dass bei einer Stellgraderhöhung von 1 % die Schüttgutmenge um 2 $\frac{t}{h}$ ansteigt. Neben dem Übertragungsbeiwert definiert die Totzeit von 10 s die Strecke.

Je größer die vorliegende Totzeit ist, umso schwerer fällt die Optimierung des eingesetzten Reglers. Wo es möglich ist, sollten Totzeiten bereits durch die Projektierung minimiert werden.

2.3.3 Strecken mit Verzögerungen

Bei Strecken mit Verzögerungen stellt sich der neue Istwert nach einer Stellgradänderung verzögert ein. Die Verzögerung ergibt sich aus dem erforderlichen Laden von Energiespeichern. Der Vorgang ist vergleichbar mit dem Laden von Kondensatoren.

Mathematisch lassen sich die Strecken durch eine Gleichung beschreiben, die für jeden Energiespeicher einen Term (ein Exponentialglied) besitzt. Wegen dieses Zusammenhanges werden derartige Strecken als Strecken 1., 2., 3. ... Ordnung bezeichnet.

Regelstrecken mit einer Verzögerung bzw. einem Energiespeicher ändern die Regelgröße nach einem Stellgradsprung ohne Zeitverzug. Direkt nach der Sprungvorgabe geschieht die Änderung mit der größten Geschwindigkeit. Der Istwert strebt folgend immer langsamer dem Endwert zu (Abbildung 25).

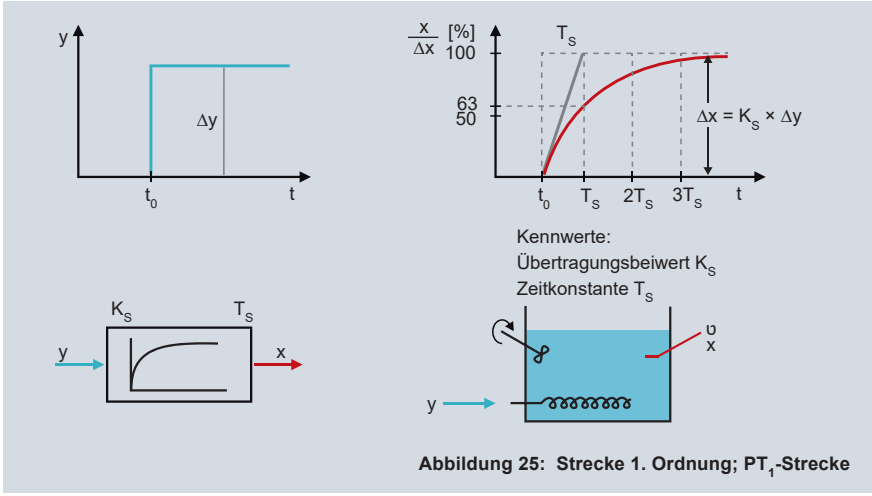


Abbildung 25: Strecke 1. Ordnung; PT_1-Strecke

Abbildung 25 zeigt rechts unten ein Beispiel für eine Strecke 1. Ordnung:

Die Beheizung eines Wasserbades geschieht elektrisch über eine Heizwendel. Die Heizwendel ist nicht in der Lage, Energie zu speichern, und wird nach Aufschaltung des Stellgrades in Form von elektrischer Leistung sofort erwärmt. Die Wärmeenergie gelangt ohne Zeitverzug in das Wasser, dessen Temperatur sofort ansteigt. Der verwendete Sensor besitzt eine sehr geringe Masse und misst ohne Zeitverzug die Temperatur des Wassers. In dem System ist nur das Wasser in der Lage, Energie zu speichern.

Mit sprungförmiger Erhöhung des Stellgrades verändert sich die Wassertemperatur nach folgender Gleichung:

$$\Delta x = K_s \times \Delta y \times \left(1 - e^{\frac{-t}{T_s}}\right) \qquad (6)$$

Die Kenngrößen für die Strecke 1. Ordnung sind der Übertragungsbeiwert K_S und die Streckenzeitkonstante T_S. Die beiden Größen können aus der Streckensprungantwort ermittelt werden. Hierzu wird beispielhaft die Wendel mit einer elektrischen Leistung von 5 kW beaufschlagt und der Istwert (die Wassertemperatur) wird aufgezeichnet.

Folgende Abbildung zeigt den Istwertverlauf nach der Stellgradsprungvorgabe:

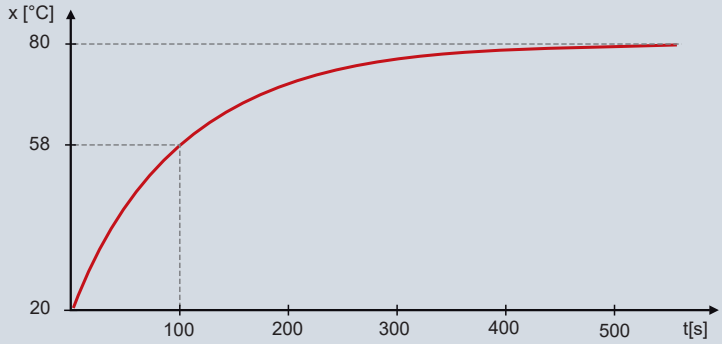


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der Sprungantwort einer Strecke 1. Ordnung

Der Istwert beträgt 20 °C und läuft nach Sprungvorgabe auf einen Endwert von 80 °C, die Istwertänderung beträgt somit 60 K.

Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ergibt sich zu:

$$K_s = \frac{\text{Regelgrößenänderung}}{\text{Stellgradänderung}} = \frac{60\ \text{K}}{5\ \text{kW}} = 12\ \frac{\text{K}}{\text{kW}} \qquad (7)$$

Die Regelstrecke verstärkt den Stellgrad mit dem Übertragungsbeiwert. Bei Annahme eines linearen Verhaltens ergibt sich nach einer Leistungserhöhung von 1 kW eine Temperaturerhöhung von 12 K.

Die **Streckenzeitkonstante T_S** entspricht der Zeit, nach welcher der Istwert um 63 % der Gesamtänderung angestiegen ist.

$$20\ °C + 60\ K \times 63\ \% \approx 58\ °C \qquad (8)$$

Im Beispiel ergeben sich 58 °C nach Verstreichen von 100 s.

Mit den beiden Kenngrößen der Strecke 1. Ordnung (K_S und T_S) lautet die Formel für die Streckensprungantwort wie folgt:

$$x = 12\ \frac{K}{kW} \times 5\ kW \times \left(1 - e^{\frac{-t}{100\ s}}\right) + 20\ °C \qquad (9)$$

Beziehungsweise:

$$x = 60\ K \times \left(1 - e^{\frac{-t}{100\ s}}\right) + 20\ °C \qquad (10)$$

Strecken mit zwei Verzögerungen

Strecken mit zwei Verzögerungen (2. Ordnung) beinhalten zwei Energiespeicher.

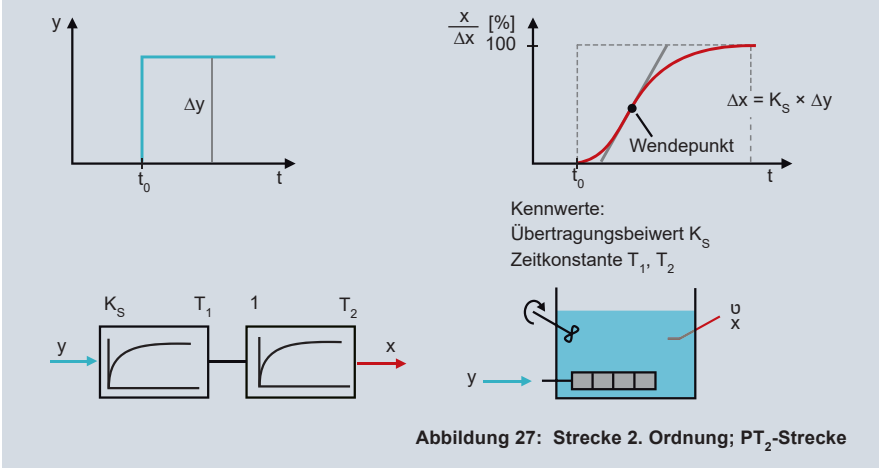


Abbildung 27: Strecke 2. Ordnung; PT_2-Strecke

Für die Beheizung des Wasserbades findet ein Heizstab mit einer relativ großen Masse Verwendung. Der Heizstab bildet den zweiten Energiespeicher. Bei sprungförmiger Erhöhung der Heizleistung wird diese zu Beginn für die Erwärmung des Heizstabes verwendet. Erst wenn die Temperatur des Heizstabes merklich höher als die des Wassers ist, kommt ein nen-

nenswerter Energiefluss zustande. Der Istwert steigt nach dem Stellgradsprung verzögert an (Abbildung 27) und hat in der Folge einen immer steileren Verlauf. Nach einiger Zeit wird die Steigung des Istwertes immer flacher und dieser gelangt schließlich auf seinen Endwert. An den Bereich mit der größten Steilheit wurde in Abbildung 27 die Tangente angelegt.

Die PT_2-Strecke ist durch die beiden Zeitkonstanten und den Übertragungsbeiwert definiert. Die Sprungantwort ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$\Delta x = K_S \times \Delta y \times \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{\frac{-t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{\frac{-t}{T_2}}\right) \quad \text{Gleichung gilt für T1} \neq \text{T2} \qquad (11)$$

Die Ermittlung der beiden Streckenzeitkonstanten aus der Sprungantwort ist nicht praktikabel. Das zeitliche Verhalten von Strecken 2. und höherer Ordnung wird in der Praxis durch Ersatzgrößen charakterisiert.

Strecken höherer Ordnung
Regelstrecken bestehen in der Praxis meist aus mehr als zwei Energiespeichern. Die Sprungantwort solcher Strecken hat jedoch den gleichen Charakter wie die der zuvor behandelten Strecken 2. Ordnung.

2.4 Aufnahme der Sprungantwort für Regelstrecken

Regelstrecken bestehen meist aus mehreren Elementen mit Verzögerungen und Totzeit:

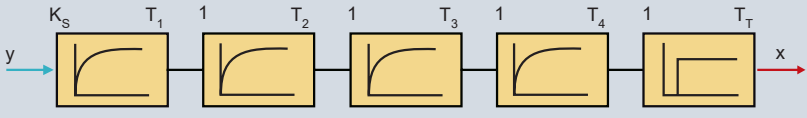


Abbildung 28: Blockstruktur einer Regelstrecke mit mehreren Verzögerungen und Totzeit

Die Blockstruktur in Abbildung 28 zeigt vier Energiespeicher und ein Totzeitelement. Bei einer realen Strecke sind dem Praktiker die Ordnung der Strecke und deren Zeitkonstanten nicht bekannt. Weiterhin besteht keine Kenntnis darüber, wie viele Totzeitglieder vorhanden sind.

Strecken ab 2. Ordnung (inklusive Totzeitgliedern) werden durch Ersatzgrößen charakterisiert. Aufgrund der Ersatzgrößen und Faustformeln können später günstige Regelparameter ermittelt werden. Die Ersatzgrößen sind der bereits bekannte Übertragungsbeiwert (K_S), die Verzugszeit (T_u) und die Ausgleichszeit (T_g).

Die Ermittlung der Kenngrößen erfolgt durch die Aufnahme der Sprungantwort:

Der Regelstrecke wird ein Stellgradsprung aufgeschaltet und der Istwertverlauf wird aufgenommen (siehe Abbildung 29). Die Aufzeichnung wird beendet, wenn der Istwert den Endwert erreicht hat. Auf der Höhe des finalen Istwertes wird eine zur Zeitachse parallele Linie gezeichnet. Durch Anlegen der Tangenten an den Istwert wird der Bereich ermittelt, in dem der Istwert die größte Steilheit aufweist. Die Tangente mit der größten Steilheit wird eingezeichnet

(Wendetangente). Die Zeit vom Stellgradsprung bis zum Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse ist die Verzugszeit (T_u); die Zeit vom Schnittpunkt mit der Zeitachse bis zum Schnittpunkt der Wendetangente mit der Max-Linie entspricht der Ausgleichszeit (T_g). Der Übertragungsbeiwert ergibt sich aus der Änderung des Istwertes, geteilt durch den Stellgradsprung.

Beispiel:
Für einen Industrieofen werden K_S, T_u und T_g ermittelt. Der Ofen hat sich abgekühlt, im Ofeninneren herrschen 20 °C vor. Über den Regler wird im Handbetrieb der Stellgrad sprungförmig von 0 auf 50 % erhöht und der Istwert wird aufgezeichnet. Abbildung 29 zeigt den Istwertverlauf:

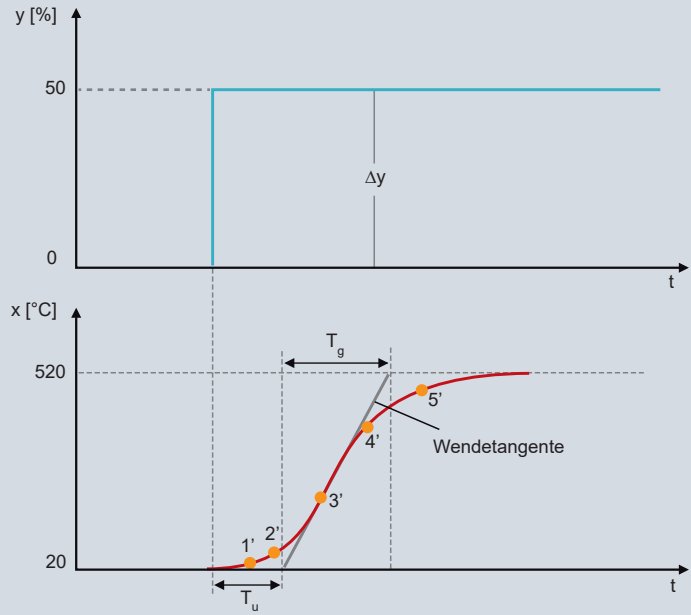


Abbildung 29: Bestimmen von Verzugs- und Ausgleichszeit

In Höhe des maximalen Istwertes (520 °C) wird eine Gerade parallel zur Zeitachse gezogen. Die Streckenverstärkung kann somit bereits bestimmt werden. Zur Bestimmung der Wendetangente werden die Tangenten an gedachte Punkte auf dem Istwertverlauf angelegt (von links nach rechts 1', 2' usw.). Bei 1' beginnend, wird die erste Tangente angelegt, diese verläuft relativ flach. Die Tangenten an den gedachten Punkten 2' und 3' haben einen steileren Verlauf. Die Tangenten an den Punkten 4' und 5' liegen wieder flacher. In der genannten Weise wird der Bereich mit der maximalen Steilheit ermittelt. In Abbildung 29 weist die Tangente am Punkt 3' die maximale Steilheit auf. Mithilfe dieser Wendetangenten werden die genannten Zeiten

bestimmt.

Das Verhältnis T_g/T_u kann als Maß für die Regelbarkeit einer Strecke genutzt werden:

$T_g/T_u > 10$	gut regelbar
$T_g/T_u = 10...3$	noch regelbar
$T_g/T_u < 3$	schwer regelbar

Je mehr Energiespeicher eine Regelstrecke enthält, umso kleiner wird das Verhältnis T_g/T_u und die Regelung wird immer schwieriger. Tatsächlich prägen jedoch die großen Energiespeicher maßgeblich das Verhältnis.

Beispiel:
Eine Strecke höherer Ordnung besteht aus vielen Energiespeichern. Zwei der Energiespeicher verfügen jedoch über relativ große Zeitkonstanten. Das Verhalten der Strecke entspricht somit einer Strecke 2. Ordnung und das Verhältnis T_g/T_u wird relativ groß sein.

Werden die Kenngrößen in die Faustformeln (Kapitel 4.3.2) eingesetzt, ergeben sich in der Regel geeignete Regelparameter für beispielsweise einen PID-Regler.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

Dieses Kapitel erklärt die Regleranteile P, I und D sowie die Regelparameter K_P (X_P), T_n und T_v am Beispiel eines stetigen Reglers (Ausgangssignal 0/2 bis 10 V, 0/4 bis 20 mA).

3.1 P-Regler

Ein P-Regler (Proportionalregler) bildet aus dem Soll- und dem Istwert die Regelabweichung, diese verstärkt er mit dem sogenannten Proportionalbeiwert K_P. Das Ergebnis wird als Stellgrad ausgegeben (Abbildung 30).

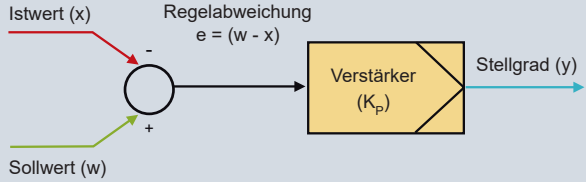


Abbildung 30: Funktionsprinzip eines P-Reglers

Der Proportionalbeiwert wird am Regler durch den Anwender eingestellt.

$$y = K_P \times (w - x) \qquad (12)$$

Der Regler arbeitet mit dem dimensionslosen Zahlenwert der Regelabweichung.

Allgemein verfügt K_P jedoch über die Einheit %, geteilt durch die Einheit der Regelgröße: %/Kelvin, %/bar, %/(U/min) etc.

Beispiele:
Ein P-Regler für eine Temperaturregelstrecke mit einem eingestellten K_P von 10 %/K gibt bei einer Regelabweichung von 5 K einen Stellgrad von 50 % aus.

Ein P-Regler zur Regelung des Druckes mit einem eingestellten K_P von 4 %/bar berechnet bei einer Regelabweichung von 20 bar den Stellgrad zu 80 %.

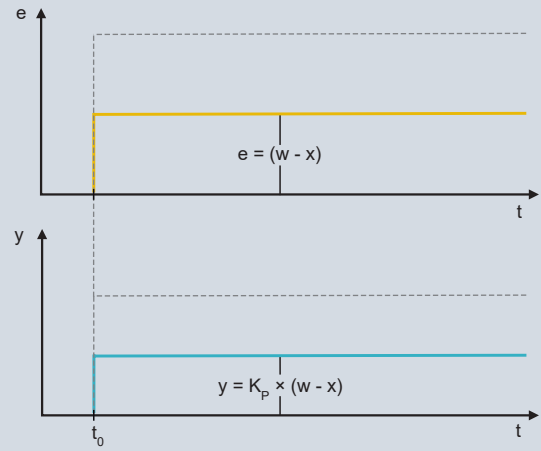


Abbildung 31: Sprungantwort eines P-Reglers

Abbildung 31 zeigt die Sprungantwort eines P-Reglers: Bei dieser wird die Reaktion des Stellgrades auf eine sich sprungförmig ändernde Regelabweichung betrachtet. Der P-Regler verändert sein Ausgangssignal proportional zur Regelabweichung ohne Zeitverzögerung.

In JUMO Reglern wird der P-Anteil über den Proportionalbereich und nicht durch den Proportionalbeiwert definiert. Der Proportionalbereich wird in der Folge erläutert.

3.1.1 Der Proportionalbereich

Ein P-Regler mit einem beispielhaft eingestellten Proportionalbeiwert K_P von 2 %/K verstärkt die Regelabweichung linear, bis diese 50 K beträgt (Abbildung 32).

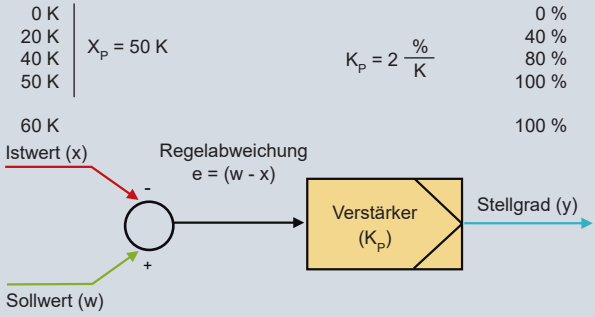


Abbildung 32: Proportionalbeiwert K_P und Proportionalbereich X_P

Die Regelabweichung, bei welcher der Regler mit größer werdender Regelabweichung gerade 100 % ausgibt, wird als Proportionalbereich (X_P) definiert. Der Proportionalbereich liegt bei einem Regler zum Heizen unterhalb des Sollwertes:

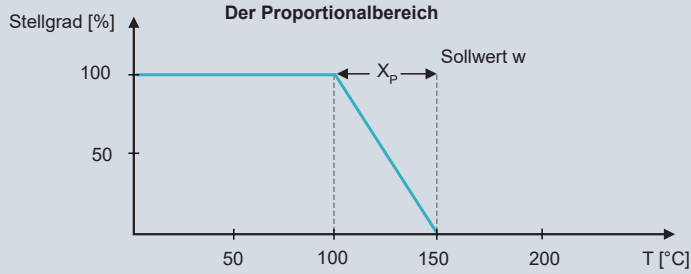


Abbildung 33: Kennlinie eines Proportionalreglers

Die Kennlinie (Abbildung 33) beschreibt das Verhalten eines P-Reglers. Auf der Y-Achse ist der Stellgrad aufgetragen. Auf der X-Achse befindet sich der Sollwert (die Kennlinie berührt hier die X- Achse, im Beispiel bei 150 °C). In Abbildung 34 ist zudem der Istwert eingezeichnet:

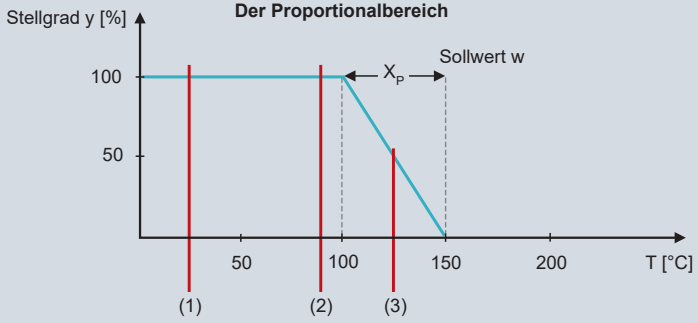


Abbildung 34: Kennlinie eines Proportionalreglers mit eingezeichnetem Istwert

Der Proportionalbereich in Abbildung 34 beträgt 50 K: Bei Regelabweichungen > 50 K beträgt der Stellgrad 100 %. Ist die Regelabweichung kleiner als der Proportionalbereich, wird der Stellgrad proportional zur Regelabweichung verkleinert.

Bei einem Istwert von ca. 25 °C (1) ist aus dem Schnittpunkt mit der Kennlinie ersichtlich,

dass der Regler einen Stellgrad von 100 % ausgibt. Der Istwert steigt aufgrund des hohen Stellgrades an und liegt später bei ca. 90 °C (2). Der Stellgrad beträgt immer noch 100 % und wird ab einem Wert von 100 °C reduziert. Ab 100 °C liegt der Istwert im Proportionalbereich (X_P). Befindet sich der Istwert z. B. in der Mitte des Proportionalbereiches (125 °C), beträgt der Stellgrad noch 50 % (3). Bei einem Istwert größer/gleich 150 °C liegt der Stellgrad bei 0 %.

Bleibende Regelabweichung

Befindet sich der Istwert über dem Sollwert, wird keine Heizleistung mehr ins System geführt. Im Fall eines Ofens wird dieser nicht mehr beheizt. Die Temperatur wird im Beispiel kleiner als 150 °C und der Stellgrad größer. Der Prozess wird sein Gleichgewicht finden (wenn bei einem Istwert von 125 °C ein Stellgrad von 50 % benötigt wird, ist dies hier der Fall).

Der Nachteil des P-Reglers ist die sich einstellende Regelabweichung. Aus diesem Grund findet er selten Verwendung. Der P-Anteil wird meist mit einem I-Anteil und zusätzlich auch häufig mit einem D-Anteil kombiniert.

Die bleibende Regelabweichung lässt sich durch eine Verkleinerung von X_P verringern. Im Beispiel wurde davon ausgegangen, dass der Istwert bei 125 °C stagniert, weil für diese Temperatur ein Stellgrad von 50 % benötigt wird. Wird der Proportionalbereich auf 25 K reduziert, steigt der Stellgrad im ersten Moment auf 100 % und der Istwert gelangt näher an den Sollwert.

Mit kleiner werdendem X_P steigt jedoch die Schwingungsneigung des Istwertes:

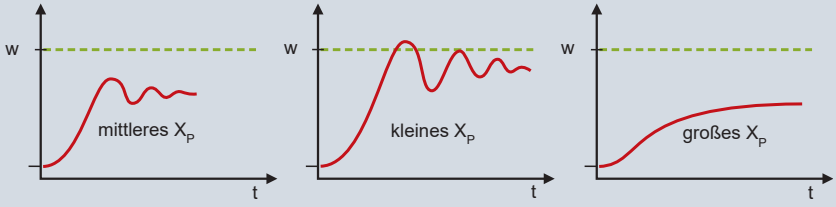


Abbildung 35: Regelverhalten für unterschiedliches X_P

Die großen Schwingungen bei einem kleinen X_P begründen sich damit, dass beim Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich die Leistung extrem schnell abgebaut wird und somit nicht sofort ein Gleichgewichtszustand erreicht werden kann.

Zusammenhang Proportionalbereich und Proportionalbeiwert

$$X_P = \frac{1}{K_P} \times 100\ \% \quad \text{bzw.} \quad K_P = \frac{1}{X_P} \times 100\ \% \qquad (13)$$

Ein X_P von 50 K (Abbildung 33) entspricht somit einem K_P von 2 %/K.

Wirksinn invers und direkt

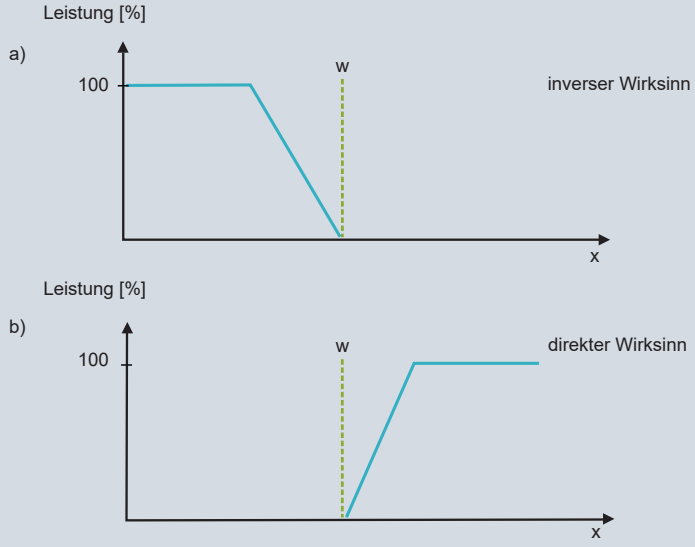


Abbildung 36: Inverser und direkter Wirksinn

Je nachdem, ob das angesteuerte Stellglied den Istwert hin zu größeren oder kleineren Werten beeinflusst, wird am Regler der jeweilige Wirksinn definiert.

Bei inversem Wirksinn a) wird mit steigendem Istwert nach Erreichen des Proportionalbereiches der Stellgrad reduziert. Bei Istwert = Sollwert beträgt die Leistung 0 % (inverser Wirksinn wird benötigt zum Heizen, Befeuchten, zur Druckerhöhung etc.).

Bei Einstellung von direktem Wirksinn b) wird mit steigendem Istwert bei Überschreiten des Sollwertes der Stellgrad, von 0 % ausgehend, erhöht. Liegt der Istwert bei der oberen Grenze des Proportionalbereiches oder darüber, beträgt der Stellgrad 100 % (direkter Wirksinn wird benötigt zum Kühlen, Entfeuchten, Druckmindern etc.).

Stellgradbegrenzung
Allgemein geben Regler mit einem Reglerausgang den Stellgrad im Bereich von 0 bis 100 % aus. Bei überdimensionierten Stellgliedern kann der Stellgrad nach oben begrenzt werden:

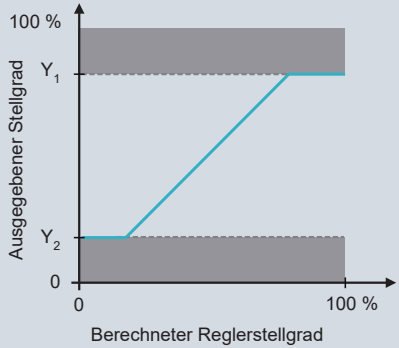


Abbildung 37: Verwendung der oberen Stellgradbegrenzung

Die obere Stellgradgrenze wird in JUMO-Reglern mit dem Parameter Y_1 eingestellt und der Stellgrad auf diesen maximalen Wert begrenzt.

Mit Y_2 wird bei Verwendung eines stetigen Reglers ein minimaler Stellgrad definiert (Abbildung 37). Unabhängig von der Regelabweichung wird mindestens dieser Stellgrad ausgegeben.

Der später beschriebene Dreipunktregler beeinflusst die Regelgröße in zwei Richtungen. Der Gesamtstellgrad beträgt -100 bis +100 %. Der maximal mögliche Stellgrad für den zweiten Reglerausgang kann ebenfalls mit der unteren Stellgradbegrenzung (Y_2) eingeschränkt werden (z. B. auf 50 % mit einer Einstellung von -50 % für Y_2).

3.2 I-Regler

Der I-Regler (integrierender Regler) bildet die Flächen, welche zwischen Regelabweichung und Zeitachse über die Zeit eingeschlossen werden:

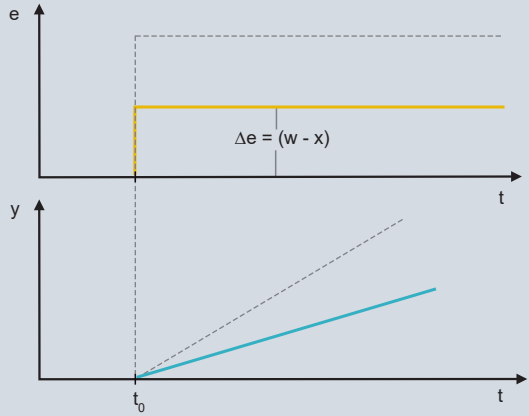


Abbildung 38: Sprungantwort eines I-Reglers

Abbildung 38 zeigt die Sprungantwort eines I-Reglers: Vor dem Sprung ist die Regelabweichung 0, in diesem Fall behält der I-Regler seinen aktuellen Stellgrad. War der Stellgrad zuvor 0 %, verharrt er bei diesem Wert. Wird die Regelabweichung sprungförmig auf einen positiven Wert gesetzt, ermittelt der Regler die erwähnten Flächen und gibt diese mit seinem Stellgrad aus. Anders ausgedrückt: Der Regler erhöht seinen Stellgrad, sobald eine positive Regelabweichung vorhanden ist. Liegt die Regelabweichung konstant vor, wird der Stellgrad in Rampenform bis auf 100 % gefahren. Ist die angebotene Regelabweichung doppelt so groß, baut der Regler den Stellgrad doppelt so schnell auf (siehe gestrichelte Linie in Abbildung 38). Bei einem Istwert größer als der Sollwert (negative Regelabweichung) wird der Stellgrad entsprechend verringert.

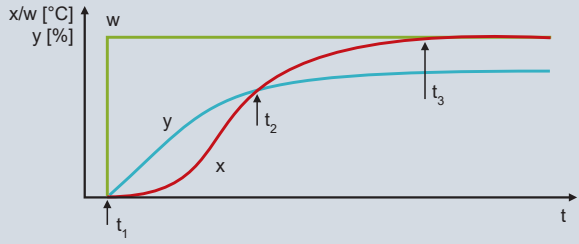


Abbildung 39: Der I-Regler im geschlossenen Regelkreis

Abbildung 39 zeigt Sollwert-, Istwert- und Stellgradverlauf für einen I-Regler im geschlossenen Regelkreis:

- t_1 Eine sprungförmige Sollwertänderung wird vorgenommen, der Stellgrad wird durch den I-Regler sofort vergrößert, eine Änderung des Istwertes erfolgt zeitverzögert.
- t_2 Der Istwert wird immer größer und die Regelabweichung geringer. Der Regler baut seinen Stellgrad immer langsamer auf und der Istwert steigt mit verminderter Geschwindigkeit in Richtung des eingestellten Sollwertes.
- t_3 Der Regler hat ausgeregelt, die Regelabweichung ist 0. Der I-Regler behält den von ihm aufgebauten Stellgrad.

Der I-Regler besitzt allgemein den Vorteil, dass er die Regelabweichung beseitigt. Als nachteilig ist seine Trägheit zu bewerten.

Die Integrierzeit (T_I)
Mit der Integrierzeit wird die Geschwindigkeit des I-Reglers verändert. Für eine gleich bleibende Regelabweichung lautet die Reglergleichung:

$$y = \frac{1}{T_I} \times \Delta e \times t + y_{t_0} \qquad (14)$$

y_{t_0} Stellgrad zu Beginn der Betrachtung

Je kleiner T_I ist, umso schneller baut der I-Regler seinen Stellgrad auf. Aus der Formel geht hervor, dass der Regler nach Verstreichen der Zeit T_I den Stellgrad um die vorliegende Regelabweichung erhöht hat (ohne Betrachtung der Dimension).

Beispiel:
Bei einem eingestellten T_I von 60 s und einer Regelabweichung von 2 K steigt der Stellgrad über 60 s um 2 %. Bei einer sich ändernden Regelabweichung wird der Stellgrad gemäß folgender Gleichung gebildet:

$$y = \frac{1}{T_I} \times \int_{t_0}^{t} e \times dt + y_{t_0} \qquad (15)$$

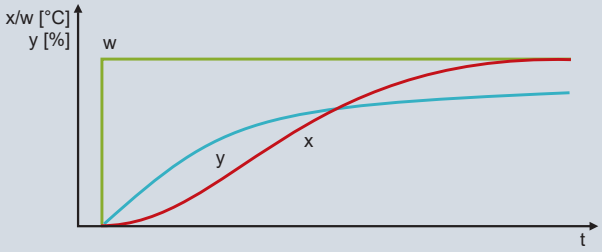


Abbildung 40: I-Regler mit groß eingestelltem T_I

Ein I-Regler mit einer hinsichtlich des Prozesses relativ groß eingestellten Integrierzeit zeigt träges Verhalten (Abbildung 40). Der Regler baut den Stellgrad langsam auf. Der Istwert läuft sehr langsam auf den Sollwert.

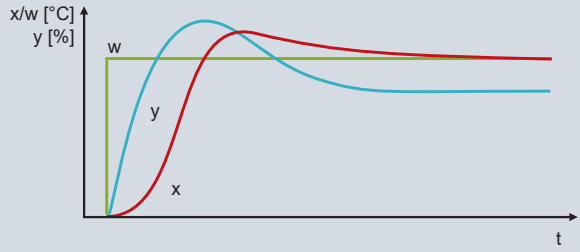


Abbildung 41: I-Regler mit klein eingestelltem T_I

Ein I-Regler mit einer hinsichtlich des Prozesses zu klein eingestellten Integrierzeit (Abbildung 41) baut den Stellgrad zu schnell auf. Gelangt der Istwert in Höhe des Sollwertes, hat der Stellgrad des Reglers einen zu hohen Wert angenommen. Die in den Prozess geführte Leistung ist zu groß und der Istwert steigt über den Sollwert.

Einsatz von I-Reglern
I-Regler finden relativ selten Verwendung: Zum Einsatz kommen sie zum einen bei stark pulsierenden Größen (Druckregelungen). Weiterhin werden sie eingesetzt bei Totzeitregelstrecken und Strecken, die im Verhältnis zur Verzugszeit eine kleine Ausgleichszeit aufweisen ($T_g/T_u < 3$).

3.3 PI-Regler

Der PI-Regler vereint die Vorzüge der jeweiligen Anteile: Schnelligkeit (P) und keine Regelabweichung (I). Tritt bei einem PI-Regler eine Regelabweichung auf, verstärkt der P-Anteil diese und gibt einen relativ großen Stellgrad aus. Der I-Anteil vergrößert während des Auftretens einer positiven Regelabweichung seinen Stellgrad und sorgt dafür, dass die Regelabweichung zu 0 wird.

Bei der Kombination des I-Anteils mit einem P-Anteil spricht man bezüglich des Parameters für das integrierende Verhalten von der Nachstellzeit (T_n). Beim I-Regler wurde diese als Integrierzeit (T_I) bezeichnet. Für den I-Anteil soll bei I-, PI- oder PID-Reglern nur ein Parameter verwendet werden. Aus diesem Grund wird das integrierende Verhalten von JUMO-Reglern mit I-Struktur ebenfalls über den Parameter Nachstellzeit (T_n) definiert.

Abbildung 42 zeigt die Sprungantwort eines PI-Reglers:

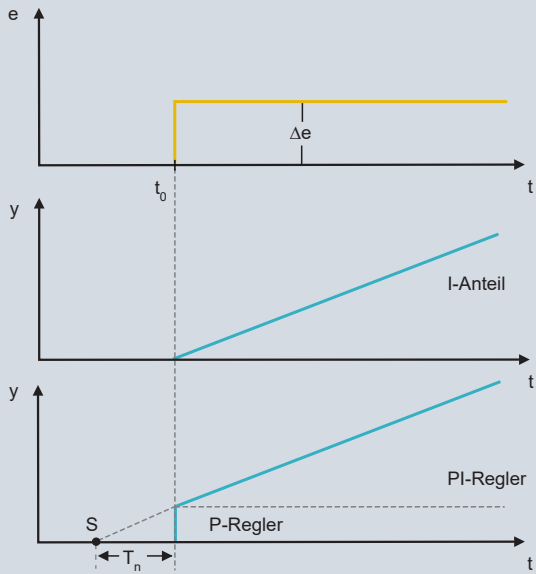


Abbildung 42: Sprungantwort eines PI-Reglers

Beim PI-Regler finden die beiden Regelparameter X_P und T_n Verwendung: Je kleiner das X_P eingestellt ist, umso stärker arbeitet der P-Anteil. Der I-Anteil bildet seinen Stellgrad umso schneller, je kleiner das eingestellte T_n ist.

Aus der Sprungantwort des PI-Reglers (Abbildung 42) kann das am Regler eingestellte T_n ermittelt werden: Die Rampe des Stellgrades wird nach links verlängert. Die Zeit vom Schnittpunkt mit der Zeitachse bis zur Vorgabe des Sprunges ist die Nachstellzeit. Bei einer konstanten Regelabweichung ergibt sich der Stellgrad nach folgender Gleichung:

$$\Delta y = \frac{1}{X_P} \times 100\,\% \times \left(\Delta e + \frac{1}{T_n} \times \Delta e \times t\right) \qquad (16)$$

Oder umgestellt:

$$\Delta y = \underbrace{\frac{100\,\%}{X_P} \times \Delta e}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\frac{100\,\%}{X_P} \times \frac{1}{T_n} \times \Delta e \times t}_{\text{I-Anteil}} \qquad (17)$$

Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass das eingestellte X_P ebenfalls in das integrierende Verhalten mit eingeht: Beispielsweise arbeitet bei Verkleinerung von X_P der I-Anteil schneller.

Eine detaillierte Information zu dieser Thematik erfolgt in Kapitel 3.5.1.

Bei einer nicht konstanten Regelabweichung arbeitet der Regler nach folgender Gleichung:

$$\Delta y = \frac{100\ \%}{X_P} \times \left(e + \frac{1}{T_n} \times \int_{t_0}^{t} e \times dt \right) \qquad (18)$$

Der PI-Regler im geschlossenen Regelkreis

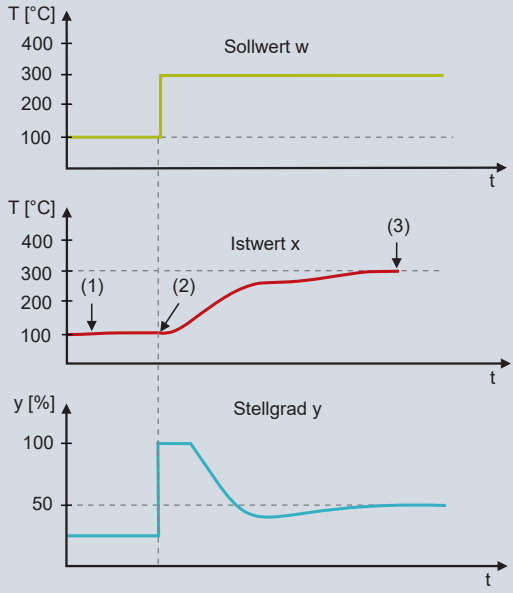


Abbildung 43: PI-Regler im geschlossenen Regelkreis

Abbildung 43 zeigt das Verhalten eines PI-Reglers im geschlossenen Regelkreis: Dargestellt werden Sollwert, Istwert und Stellgrad vor und nach einer Sollwertänderung.

(1) Der Sollwert beträgt 100 °C, der Regler hat ausgeregelt und es wird ein Stellgrad von 25 % ausgegeben. Bei einer Regelabweichung von 0 gibt der P-Anteil keinen Stellgrad aus, das Ausgangssignal wird allein vom I-Anteil geliefert.

(2) Nach der Sollwertänderung auf 300 °C befindet sich der Istwert außerhalb des Proportionalbereiches. Der Stellgrad des P-Reglers beträgt 100 %. Durch diese Änderung wird der durch den I-Anteil anstehende Stellgrad auf 0 % gesetzt. Aufgrund des hohen Stellgrades gelangt der Istwert in den Proportionalbereich. Der P-Anteil wird kleiner 100 % und der I-Anteil baut Stellgrad auf. Als Folge der geringer werdenden Regelabweichung wird der P-Anteil reduziert. Der I-Anteil wird größer und regelt den Istwert auf den Sollwert.

(3) Im ausgeregelten Zustand liefert der I-Anteil erneut den gesamten Stellgrad (im Beispiel 50 %).

3.4 PD-Regler

Der D-Anteil (differenzierender Anteil) reagiert bei Änderung der Regelgröße und wirkt ihr entgegen: Bei einem Regler mit inversem Wirksinn gibt er mit größer werdendem Istwert negativen Stellgrad aus. Entsprechend wird bei kleiner werdendem Istwert ein positiver Stellgrad ausgegeben.

Abbildung 44 zeigt das Verhalten eines PD-Reglers nach Erhöhung des Sollwertes:

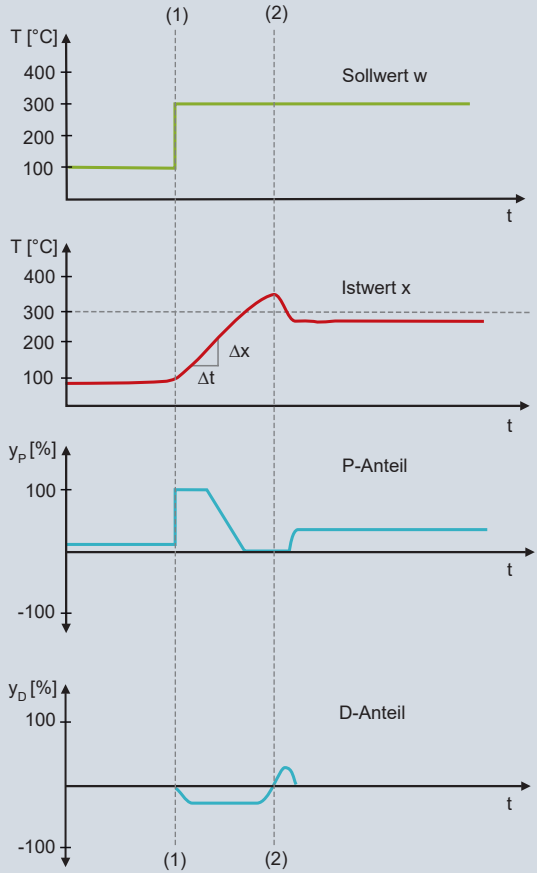


Abbildung 44: Der PD-Regler im geschlossenen Regelkreis

P-Anteil

Zu Beginn liegt ein Sollwert von 100 °C vor, der Istwert liegt etwas unterhalb von 100 °C. Die Regelabweichung resultiert aus dem nicht vorhandenen I-Anteil, es wird lediglich ein zur

Regelabweichung proportionaler Stellgrad ausgegeben. Folgend wird der Sollwert auf 300 °C angehoben (1), die Regelabweichung ist größer als der Proportionalbereich und der P-Anteil gibt einen Stellgrad von 100 % aus. Die Regelabweichung wird geringer und nach Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich wird der ausgegebene Stellgrad reduziert. Gelangt der Istwert über den Sollwert, ist der P-Anteil 0 %. Liegt der Istwert nach einiger Zeit unterhalb des Sollwertes, stellt sich wieder ein P-Anteil größer 0 % ein.

D-Anteil

Zu Beginn stagniert der Istwert und der D-Anteil bildet keinen Stellgrad. Der Istwert steigt an (1) und der D-Anteil gibt proportional zur Steilheit des Istwertes einen negativen Stellgrad aus. Dieser Stellgrad reduziert den Gesamtstellgrad, das Ansteigen des Istwertes wird verlangsamt. Bei einem flacher werdenden Istwertverlauf wird der Stellgrad des D-Anteils immer weiter reduziert. Weist der Istwert keine Steigung auf, beträgt der Stellgrad des D-Anteils 0 % (2). Während des Abfallens des Istwertes „nach (2)“ wirkt der D-Anteil der Istwertbewegung durch einen positiven Stellgrad entgegen.

Die Intensität des D-Anteils beeinflusst der Anwender durch die Vorhaltezeit T_V. Je größer der Parameter dimensioniert ist, umso stärker ist die beschriebene Wirkung.

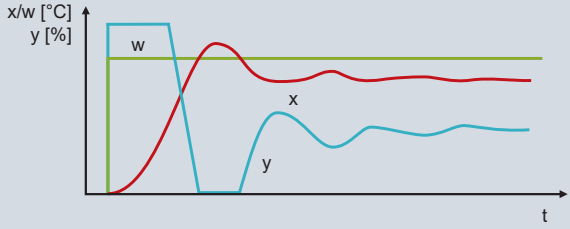


Abbildung 45: PD-Regler mit T_V = 0 s (D-Anteil ist unwirksam), P-Regler

Abbildung 45 zeigt das Regelverhalten eines PD-Reglers mit einer Vorhaltezeit von T_V = 0 s – der Anteil ist unwirksam. Aufgrund des relativ kleinen Proportionalbereiches gelangt der Istwert mit Schwingungsneigung auf den Endwert.

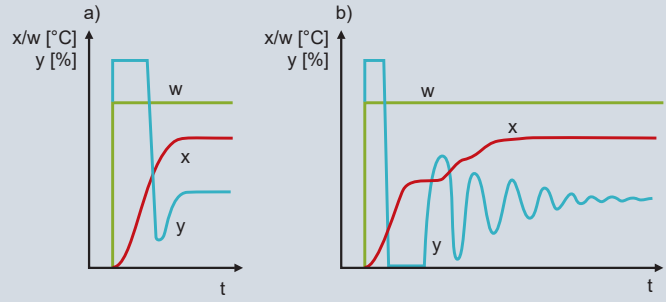


Abbildung 46: PD-Regler mit a) optimal eingestelltem T_V und b) zu groß eingestelltem T_V

Abbildung 46 a) demonstriert das Regelverhalten für ein günstig eingestelltes T_v: Der D-Anteil reduziert bei einer Vergrößerung des Istwertes den Gesamtstellgrad und erhöht diesen bei kleiner werdendem Istwert.

Durch diese Dämpfung kann der Regler mit einem relativ kleinen Proportionalbereich betrieben werden: Die aus der hohen Verstärkung resultierende Schwingungsneigung wird durch den D-Anteil unterdrückt.

Ein zu groß eingestelltes T_v ruft das in Abbildung 46 b) dargestellte Regelverhalten hervor: Nach der Veränderung des Sollwertes gibt der P-Anteil 100 % Stellgrad aus. Aufgrund des steigenden Istwertes und des zu groß eingestellten T_v reduziert der D-Anteil den Gesamtstellgrad bis auf 0 % und der Istwertverlauf wird flacher. Durch die geringere Steigung des Istwertes nimmt der D-Anteil seinen negativen Stellgrad zurück, wodurch der Istwert wieder schneller ansteigt. Durch den schneller ansteigenden Istwert verringert der D-Anteil den Gesamtstellgrad erneut usw.

In einem geschlossenen Regelkreis wird der Istwert durch die Veränderung von Störgrößen beeinflusst und vom Sollwert wegbewegt. Der D-Anteil steuert der Istwertbewegung entgegen (Abbildung 47) und reduziert damit die maximal auftretende Regelabweichung bei Veränderung der Störgrößen.

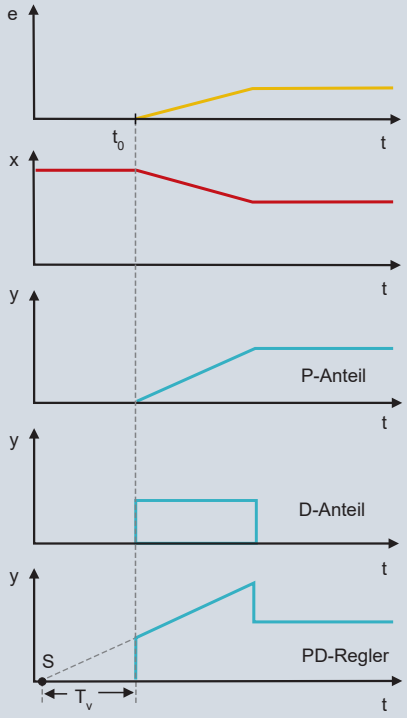


Abbildung 47: Anstiegsantwort eines PD-Reglers

In Abbildung 47 wird der Istwert durch eine sich ändernde Störgröße geringer. Die Regelabweichung wird größer und proportional zu dieser bildet der P-Anteil seinen Stellgrad. Bei kleinen Regelabweichungen ist dieser Stellgrad sehr gering und hat eine entsprechend kleine Wirkung auf den Istwert. Der D-Anteil wirkt ab dem Moment, in dem sich der Istwert verändert. Die Intensität ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit.

Der PD-Regler mit inversem Wirksinn bildet bei konstanter Steilheit des Istwertes den Stellgrad nach folgender Gleichung:

$$y = \frac{1}{X_P} \times 100\ \% \times \left(e - T_V \times \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \qquad (19)$$

Bei sich ändernder Steilheit des Istwertes ergibt sich der Stellgrad wie folgt:

$$y = \frac{1}{X_P} \times 100\ \% \times \left(e - T_V \times \frac{dx}{dt} \right) \qquad (20)$$

$\frac{dx}{dt}$ Steilheit des Istwertes (bei Regelung von Temperaturen, z. B. in K/s)

3.4.1 Der praktische D-Anteil – das DT_1-Element

Grundsätzlich kann auch die Sprungantwort eines PD-Reglers betrachtet werden. Die Änderungsgeschwindigkeit bei einem Sprung ist jedoch unendlich groß. Somit hätte der von einem Sprung abgeleitete Stellgrad des D-Anteils für eine theoretisch unendlich kurze Zeit einen unendlich hohen Wert (Abbildung 48 – „Theorie“).

Sprungförmige Änderungen des Istwertes sind in der Praxis eher die Ausnahme. Aber auch bei sich stetig änderndem Signal ergeben sich durch die Abtastzeit der Regelgeräte sprungförmige Änderungen für den erfassten Wert.

In der Praxis wird das Signal des D-Anteils durch den Einsatz eines T_1-Gliedes gedämpft.

Abbildung 48 zeigt die Sprungantwort des „praktischen D-Anteils“. T_1 ist die Zeitkonstante des T_1-Gliedes. In der Praxis wird die Zeitkonstante automatisch zu $T_V/4$ gewählt und kann nicht durch den Anwender eingestellt werden. Aus der Sprungantwort des „praktischen D-Anteils“ kann aufgrund des Verhältnisses $T_1 = T_V/4$ aus T_1 die Vorhaltezeit T_V bestimmt werden.

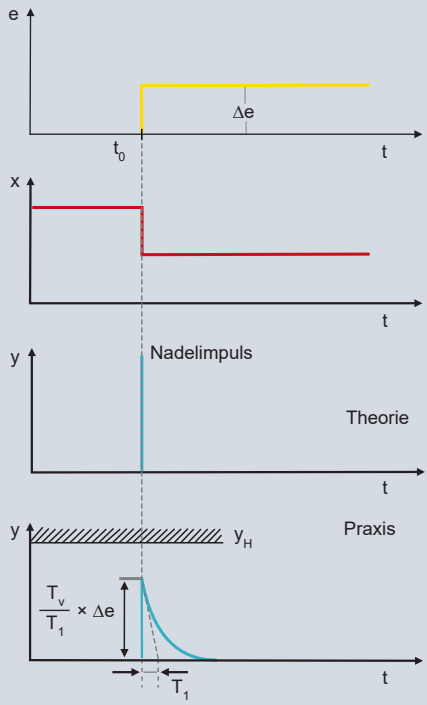


Abbildung 48: Sprungantwort eines DT_1-Elementes

3.5 PID-Regler

Der PID-Regler findet in den meisten Anwendungsfällen Einsatz. Bei diesem Regler sind die Parameter X_P , T_n und T_v einzustellen. Die im Regler eingestellten Parameter sind auch aus der Sprungantwort ersichtlich (Abbildung 49).

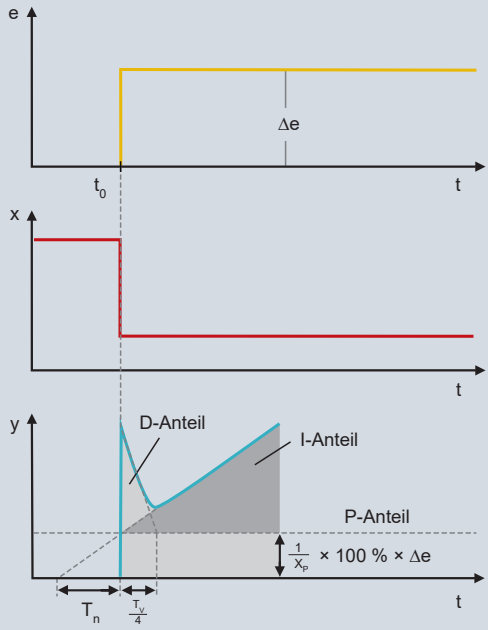


Abbildung 49: Sprungantwort eines PID-Reglers

Der D-Anteil reagiert ausschließlich auf die Änderung des Istwertes, aus diesem Grund resultiert die veränderte Regelabweichung in Abbildung 49 aus einer Istwertänderung.

Bei einer sprungförmigen Verkleinerung des Istwertes gibt der D-Anteil sofort positiven Stellgrad aus und wirkt somit der Bewegung des Istwertes entgegen. Aufgrund der Regelabweichung bildet der P-Anteil proportional zur Regeldifferenz positiven Stellgrad. Zusätzlich erhöht der I-Anteil seinen Stellgrad, die Rampe des I-Anteils ist jedoch erst ersichtlich, wenn der I-Anteil auf Höhe des D-Anteils liegt.

Die Reglergleichung für den PID-Regler lautet:

$$\Delta y = \frac{1}{X_P} \times 100\,\% \times \left(e + \frac{1}{T_n} \times \int e \times dt - T_V \times \frac{dx}{dt} \right) \qquad (21)$$

Eine Veränderung der Regelparameter hat die bereits beschriebenen Auswirkungen:

Größeres X_P entspricht kleinerem P-Anteil
Kleinere Verstärkung: dadurch stabileres, jedoch auch trägeres Verhalten.

Größeres T_n entspricht kleinerem I-Anteil
I-Anteil integriert langsamer auf: dadurch stabileres, jedoch auch trägeres Verhalten.

Größeres T_v entspricht größerem D-Anteil
Wirkt der Änderung des Istwertes stärker entgegen, dadurch stabileres Verhalten; T_v nicht zu groß wählen.

3.5.1 Blockstruktur des PID-Reglers

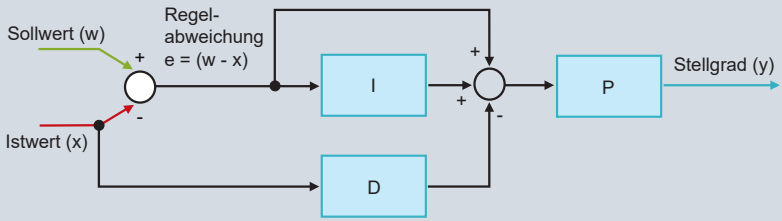


Abbildung 50: Blockstruktur des PID-Reglers

Wie aus der Reglergleichung für einen PID-Regler hervorgeht, beeinflusst der P-Anteil auch das I- und das D-Verhalten. Abbildung 50 zeigt diese Reihenstruktur.

Bei Verdoppelung der Proportionalverstärkung (durch Halbierung von X_P) arbeiten auch die Anteile I und D mit der doppelten Intensität.

Beispiel:
Der in Abbildung 50 gezeigte PID-Regler hat die Einstellung T_n = 10 s und X_P = 100 K (der D-Anteil soll in diesem Beispiel außer Betracht gelassen werden). Die Regelabweichung ist 2.

Dimensionslos betrachtet, hat der P-Anteil eine Verstärkung von 1 ($K_P = 1/X_P \times 100$ %).

Der I-Anteil benötigt gerade die Zeit T_n, um an seinem Ausgang dimensionslos das Eingangssignal abzubilden. Der Stellgrad wird innerhalb von 10 s um 2 % erhöht. Bei Verdopplung des Proportionalbereiches bzw. bei Halbierung der Verstärkung wird auch der I-Anteil auf die Hälfte reduziert.

So wird beispielsweise durch Vergrößerung des Proportionalbereiches die Reaktion des I-Anteils verlangsamt und der D-Anteil wirkt weniger intensiv, die beiden Anteile werden in „die richtige Richtung bewegt“. Für die Nachoptimierung ist somit in vielen Fällen die Veränderung des Proportionalbereiches ausreichend und die Modifikation der anderen Regelparameter nicht notwendig.

Für einen PID-Regler wird mit der Veränderung des Proportionalbereiches ebenfalls das I- und das D-Verhalten beeinflusst.

4 Optimierung von Reglern und Auswahl der Reglerstruktur

4.1 Allgemeine Information

Dieses Kapitel beschreibt unterschiedliche Optimierungsverfahren und die in JUMO-Reglern vorhandene Selbstoptimierung. Gegen Ende des Kapitels wird eine Auswahlhilfe hinsichtlich der Reglerstruktur für unterschiedliche Regelgrößen gegeben.

4.2 Führungs-/Störverhalten

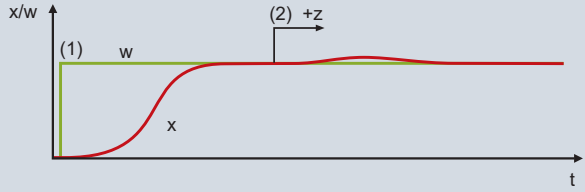


Abbildung 51: Führungs- und Störverhalten eines Regelkreises

Üblicherweise erfolgt die Optimierung eines Reglers auf Führungsverhalten (1), hierzu wird das Regelverhalten bei einer neuen Sollwertvorgabe betrachtet.

Sich verändernde Störgrößen rufen eine zeitweilige Regelabweichung hervor. Das Störverhalten zeigt, wie nach der Störgrößenänderung die Regelabweichung beseitigt wird (2).

Die Regleroptimierung erfolgt üblicherweise auf Führungsverhalten und das Störverhalten wird akzeptiert. Mit der Optimierung auf sich ändernde Sollwerte ergeben sich tendenziell eher große Werte für die Regelparameter (X_P , T_n und T_v). Die weitere Optimierung des Störverhaltens kann durch eine Verkleinerung der Regelparameter erfolgen. Wird mit diesen Parametern jedoch ein neuer Sollwert vorgegeben, ist ein Überschwingen sehr wahrscheinlich.

Parametersätze und Parametersatzumschaltung
In JUMO-Reglern können die Regelparameter mehrfach in unterschiedlichen Parametersätzen abgelegt werden. Im ersten Parametersatz können beispielsweise Parameter für ein günstiges Führungsverhalten, im zweiten Parametersatz solche für ein gutes Störverhalten abgelegt werden. Die Umschaltung zwischen den Parametersätzen kann beispielsweise aufgrund der Regelabweichung erfolgen. Liegt eine große Regelabweichung vor, wird beispielsweise der Parametersatz 1 (gutes Führungsverhalten) aktiviert. Mit Unterschreitung einer definierten Regelabweichung wird auf Parametersatz 2 umgeschaltet (gutes Störverhalten).

4.3 Die Optimierungsverfahren

Für die Optimierung eines Reglers empfiehlt sich folgende Vorgehensweise:

Existieren vergleichbare Anlagen/Regelkreise, können die Regelparameter der in diesen Systemen verwendeten Reglern versuchsweise Einsatz finden. Als Alternative kann die in JUMO-Reglern existente Selbstoptimierung verwendet werden. Die beiden Selbstoptimierungsmethoden sind in Kapitel 4.4 beschrieben.

Führt keine der beschriebenen Möglichkeiten zum Ziel, kann eines der in diesem Kapitel beschriebenen Optimierungsverfahren Verwendung finden.

Das Verhalten von Regelstrecken hängt vom Arbeitspunkt ab. Die Anlage ist vor der Optimierung in einen Betriebszustand zu versetzen, für welchen man später günstige Regelparameter erwartet. So wird beispielsweise ein Ofen vor der Optimierung beladen, für einen Durchlauferhitzer muss eine Abnahme generiert werden. Soweit während der Optimierung ein Sollwert vorgegeben werden muss, liegt dieser im späteren Arbeitsbereich.

4.3.1 Die Schwingungsmethode nach Ziegler und Nichols

Das Verfahren findet für relativ schnelle Regelstrecken Verwendung. Zur Vorbereitung wird P-Struktur parametriert und ein relativ großes X_P eingestellt. Ein Sollwert im späteren Arbeitsbereich wird definiert (Abbildung 52).

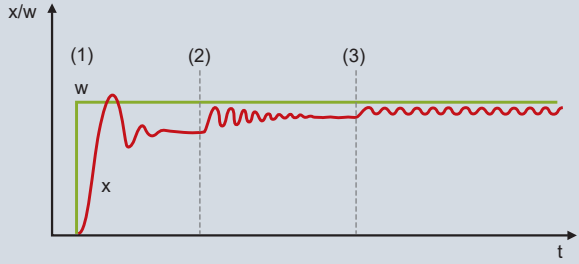


Abbildung 52: Sollwert- und Istwertverlauf bei Anwendung der Schwingungsmethode

Mit dem relativ groß eingestellten Proportionalbereich läuft der Istwert mit geringer Schwingungsneigung auf den Endwert [Abbildung 52 (1)]. Aufgrund der nicht vorhandenen I-Struktur ist eine dauerhafte Regelabweichung vorhanden.

Das X_P wird verkleinert (Abbildung 52 [2]): Der Istwert steigt an und läuft mit größerer Schwingungsneigung auf den Endwert. Der Proportionalbereich wird unter Umständen mehrmals verkleinert, bis der Istwert dauerhaft schwingt (Abbildung 52 [3]). Der für dieses Verhalten erforderliche Proportionalbereich wird als X_{Pk} (kritisches X_P) bezeichnet und ist möglichst genau zu bestimmen (X_P nicht in zu großen Schritten verkleinern).

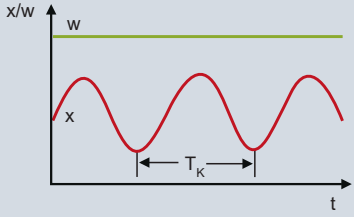


Abbildung 53: Kritische Periodendauer

Aus der Dauerschwingung des Istwertes (Abbildung 53) wird mit der kritischen Periodendauer T_K die zweite Kenngröße für das Verfahren bestimmt. Die kritische Periodendauer T_K (in Sekunden) ergibt sich beispielsweise durch den zeitlichen Abstand zwischen 2 Minimalwerten.

X_{Pk} und T_K werden in die folgende Tabelle für die gewünschte Reglerstruktur eingesetzt:

Reglerstruktur	Regelparameter
P	$X_P = X_{Pk} / 0{,}5$
PI	$X_P = X_{Pk} / 0{,}45$ $T_n = 0{,}83 \times T_K$
PID	$X_P = X_{Pk} / 0{,}6$ $T_n = 0{,}5 \times T_K$ $T_v = 0{,}125 \times T_K$

Tabelle 1: Formeln zur Einstellung nach der Schwingungsmethode

4.3.2 Verfahren nach der Streckensprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick

Mit diesem Verfahren werden die Regelparameter auch für träge Regelstrecken relativ zeitsparend ermittelt. Die Methode wird für Strecken ab 2. Ordnung angewendet und bietet die Besonderheit der Unterscheidung zwischen den Formeln für das Führungs- und Störverhalten.

Für die Faustformeln werden aus der Sprungantwort der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke, die Verzugs- und die Ausgleichszeit ermittelt. Das Kapitel 2.4 beschreibt detailliert die Vorgehensweise.

Reglerstruktur	Führung	Störung
P	$X_P = 3{,}3 \times K_s \times (T_u / T_g) \times 100\ \%$	$X_P = 3{,}3 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100\ \%$
PI	$X_P = 2{,}86 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100\ \%$ $T_n = 1{,}2 \times T_g$	$X_P = 1{,}66 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100\ \%$ $T_n = 4 \times T_u$
PID	$X_P = 1{,}66 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100\ \%$ $T_n = 1 \times T_g$ $T_v = 0{,}5 \times T_u$	**$X_P = 1{,}05 \times K_S \times (T_u / T_g) \times 100\ \%$** **$T_n = 2{,}4 \times T_u$** **$T_v = 0{,}42 \times T_u$**

Tabelle 2: Formeln zur Einstellung nach der Streckensprungantwort

Beispiel:
Für einen Laborofen soll ein Regler mit PID-Struktur eingesetzt werden. Ziel ist ein gutes Störverhalten, typische Sollwerte liegen bei 200 °C.

Im Handbetrieb wird der Stellgrad stufenweise erhöht, bis sich ein etwas unter dem späteren Sollwert liegender Istwert ergibt (die Ausgleichsvorgänge sind jeweils abzuwarten). Beispielhaft wird mit einem Stellgrad von 60 % eine Temperatur von 180 °C erreicht. Von 60 % ausgehend, wird der Stellgrad sprungförmig auf 80 % erhöht und der Istwert aufgezeichnet.

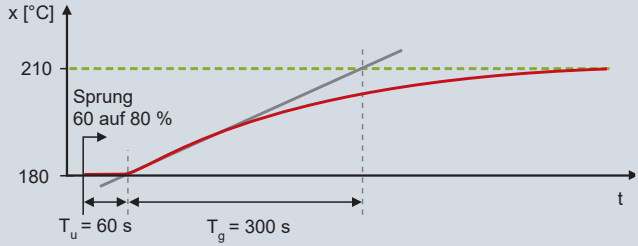


Abbildung 54: Sprungantwort des Laborofens

Aus der Sprungantwort (Abbildung 54) wird mithilfe der Wendetangente ermittelt: Verzugszeit T_u = 60 s, Ausgleichszeit T_g = 300 s.

Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ergibt sich aus der Veränderung des Istwertes, dividiert durch den Stellgradsprung:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{210\ °C - 180\ °C}{80\ \% - 60\ \%} = \frac{30\ K}{20\ \%} = 1{,}5\ K / \% \qquad (22)$$

Mithilfe der Faustformeln ergeben sich folgende Parameter für das Störverhalten:

$$X_P = 1{,}05 \times K_S \times \frac{T_u}{T_g} \times 100\,\% = 1{,}05 \times 1{,}5\ \frac{K}{\%} \times \frac{60\ s}{300\ s} \times 100\,\% = 31{,}5\ K \qquad (23)$$

$$T_n = 2{,}4 \times T_u = 2{,}4 \times 60\ s = 144\ s \qquad (24)$$

$$T_V = 0{,}42 \times T_u = 0{,}42 \times 60\ s \approx 25\ s \qquad (25)$$

Der Stellgradsprung ist im Bereich des späteren Arbeitspunktes durchzuführen. Die Sprunghöhe ist weiterhin so groß zu wählen, dass der Istwertverlauf ausgewertet werden kann.

Nach der Vorgabe des Stellgradsprunges wird der Endwert des Istwertes abgewartet, eine Zeit sparende Alternative bietet das Verfahren nach der Anstiegsgeschwindigkeit:

4.3.3 Verfahren nach der Anstiegsgeschwindigkeit

Hinsichtlich der Sprungvorgabe erfolgt die Vorgehensweise wie bei dem Verfahren nach der Streckensprungantwort: Vor dem Sprung wird ein Stellgrad vorgegeben, mit welchem der Istwert etwas unterhalb des später verwendeten Sollwertes liegt.

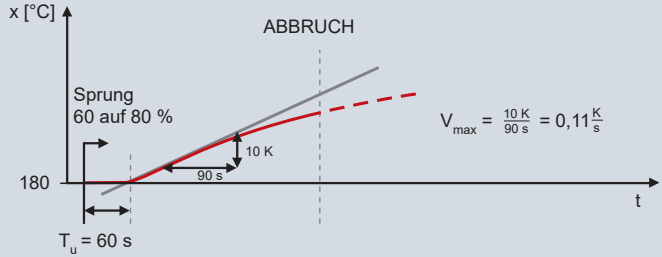


Abbildung 55: Istwertverlauf beim Verfahren nach der Anstiegsgeschwindigkeit

Die Sprungvorgabe erfolgt erneut für den Laborofen aus Kapitel 4.3.2, der spätere Arbeitspunkt liegt ebenfalls bei 200 °C. Durch die Vorgabe eines Stellgrades von 60 % im Handbetrieb ergibt sich ein Istwert von 180 °C. Der Stellgrad wird sprungförmig auf 80 % erhöht.

Nach Vorgabe des Sprunges steigt der Istwert nach einiger Zeit an. Die Aufzeichnung erfolgt, bis der Istwert seine maximale Steilheit aufweist. Auch bei diesem Verfahren wird die Wendetangente eingezeichnet und die Verzugszeit ermittelt. Die zweite Kenngröße ist die maximale Anstiegsgeschwindigkeit, diese entspricht der Steigung der Wendetangente. Durch ein Steigungsdreieck an der Wendetangente wird die maximale Anstiegsgeschwindigkeit bestimmt:

$$V_{max} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (26)$$

Die ermittelten Werte V_{max} (0,11 K/s) und T_u (60 s) werden in folgende Formeln eingesetzt:

Reglerstruktur	Regelparameter	
P	$X_P = V_{max} \times T_u \times y_H / \Delta y$	y_H = maximaler Stellbereich (meist 100 %)
PI	$X_P = 1{,}2 \times V_{max} \times T_u \times y_H / \Delta y$ $T_n = 3{,}3 \times T_u$	Δy = vorgegebener Stellgradsprung (im Beispiel 20 %)
PD	$X_P = 0{,}83 \times V_{max} \times T_u \times y_H / \Delta y$ $T_v = 0{,}25 \times T_u$	
PID	$X_P = 0{,}83 \times V_{max} \times T_u \times y_H / \Delta y$ $T_n = 2 \times T_u$ $T_v = 0{,}5 \times T_u$	

Tabelle 3: Formeln zur Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit

Für einen PID-Regler ergeben sich die Werte mit den Formeln wie folgt:

$$X_P = 0{,}83 \times V_{max} \times T_u \times \frac{y_H}{\Delta y} = 0{,}83 \times 0{,}11 \frac{K}{S} \times 60\ s \times \frac{100\ \%}{20\ \%} \approx 27{,}4\ K \quad (27)$$

$$T_n = 2 \times T_u = 2 \times 60\ s = 120\ s \quad (28)$$

$$T_V = 0{,}5 \times T_u = 0{,}5 \times 60\ s = 30\ s \quad (29)$$

4.3.4 Empirische Methode zur Ermittlung der Regelparameter

Mit diesem Verfahren werden nacheinander günstige Einstellungen für die Anteile P, D und I ermittelt. Vom Ursprungszustand aus (Stellgrad 0 %) gibt man immer wieder den typischen Sollwert vor; daher ist das Verfahren nur für relativ schnelle Regelstrecken anwendbar (z. B. schnelle Temperaturregelstrecken und Regelgrößen wie Drehzahl oder Durchfluss).

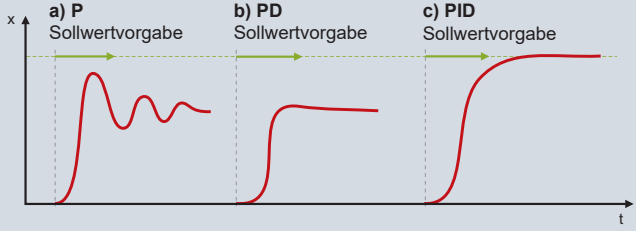


Abbildung 56: Einstellung eines PID-Reglers nach der empirischen Methode

Für den Regler wird P-Struktur aktiviert. Der Proportionalbereich wird relativ groß eingestellt (die Dimensionierung hängt von der Regelstrecke ab) und der Sollwert im späteren Arbeitsbereich vorgegeben. Der Istwert wird träge auf den Endwert laufen und es ergibt sich eine relativ große Regelabweichung. In der Folge wird der Sollwert mit einem immer kleiner werdenden Proportionalbereich X_P vorgegeben. Ziel ist ein X_P, bei dem der Istwert nach zwei bis drei Vollschwingungen seinen stabilen Endwert erreicht (Abbildung 56a).

Für ein gedämpftes Anfahren erfolgt die Strukturumschaltung von P auf PD. Beginnend mit einer kleinen Einstellung für die Vorhaltezeit, erfolgt die Sollwertvorgabe mit immer größer werdendem T_V. Erreicht der Istwert seinen Endwert mit einer möglichst kleinen Schwingung, liegt ein günstiges T_V vor (Abbildung 56b).

Hinweis: Sobald der Regler beim Anfahren den Stellgrad auch nur einmal auf 0 % setzt, ist das T_v zu groß eingestellt.

Mit der Umschaltung auf PID-Struktur wird der I-Anteil aktiviert. Die Nachstellzeit T_n ist in der Regel mit dem vierfachen Wert des zuvor ermittelten T_v günstig eingestellt. Abbildung 56c) zeigt das Verhalten für eine Einstellung $T_n = 4 \times T_v$.

Für einige Strecken können nicht alle Anteile aktiviert werden. Ergibt sich bei P-Struktur bereits für große Einstellungen von X_P ein unruhiges Verhalten, können weder P- noch D-Struktur Verwendung finden. Zum Einsatz kommt der I-Regler.

War die Optimierung des P-Reglers erfolgreich, macht aber die Einführung des D-Anteils den Regelkreis instabil, findet PI-Struktur Verwendung.

4.4 Die Selbstoptimierung in JUMO-Kompaktreglern

Die Selbstoptimierung findet für viele Anwendungen günstige Regelparameter (X_P, T_n und T_v). Wie bei den vorherigen Optimierungsverfahren sind für die Anlage die später vorliegenden Betriebsbedingungen herzustellen (beispielsweise ist ein Ofen zu bestücken oder für einen Durchlauferhitzer eine Abnahme zu generieren).

Das Standardverfahren ist das nach der Schwingungsmethode.

4.4.1 Verfahren nach der Schwingungsmethode

Während der Selbstoptimierung berechnet der Regler eine Schaltgerade. Wird diese vom Istwert erreicht, erfolgt eine Stellgradänderung von 100 % auf 0 % (bzw. umgekehrt). Aus dem Istwertverlauf berechnet der Regler die Regelparameter:

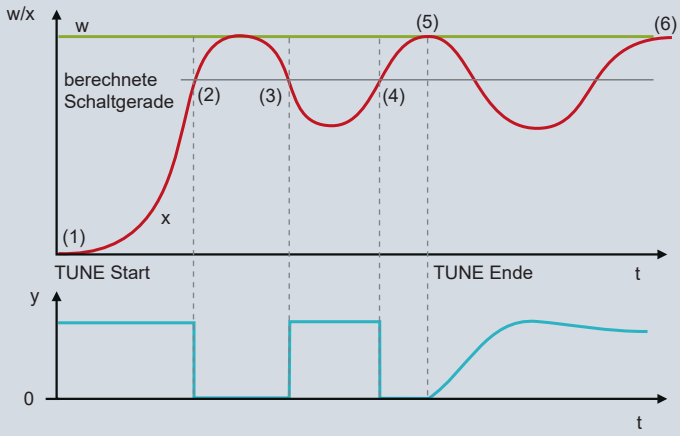


Abbildung 57: Sollwert-, Istwert- und Stellgradverlauf während der Selbstoptimierung nach der Schwingungsmethode

Die Selbstoptimierung wird im Beispiel (Abbildung 57) nach der Vorgabe des Sollwertes gestartet (1). Der Regler setzt sein Ausgangssignal auf 100 % und der Istwert steigt an. Wäh-

rend des Anfahrens berechnet der Regler die erwähnte Schaltgerade. Wird diese vom Istwert erreicht, setzt der Regler sein Ausgangssignal auf 0 % (2). Bei Strecken mit Verzögerungen steigt der Istwert auch mit einem Ausgangssignal von 0 % weiter an. Der Istwert gelangt im Idealfall bis zum Sollwert, bevor er seine Richtung umkehrt. Der Istwert fällt ab und mit erneutem Erreichen der Schaltgeraden (3) wird die Leistung wieder auf 100 % gesetzt. Aufgrund der vorhandenen Verzögerungen kehrt der Istwert ebenfalls erst nach einiger Zeit seine Richtung um. Nach dem Ausschalten des Reglerausgangs (4) erreicht der Istwert ein zweites Mal sein Maximum (5). In diesem Moment hat der Regler seine Regelparameter ermittelt und regelt mit diesen auf den eingestellten Sollwert (6).

Das Verfahren kann generell bei einem beliebigen Istwert gestartet werden.

Wie aus Abbildung 57 ersichtlich, gibt der Regler im Wechsel 0 und 100 % Stellgrad aus. Bei einer Optimierung während des Anfahrens wird weiterhin der maximale Stellgrad für eine längere Zeit aufgeschaltet. Durch dieses Verhalten kann es im Einzelfall zu einer Schädigung des zu behandelnden Gutes oder sogar der Anlage kommen. Beispiele sind kunststoffverarbeitende Maschinen oder große Industrieöfen. Weiterhin ist das Verfahren nach der Schwingungsmethode nur schwer für langsam abkühlende Regelstrecken anwendbar. Diese Strecken können kaum zum Schwingen angeregt werden.

In den beschriebenen Anwendungsfällen findet das alternative Verfahren nach der Sprungantwort Verwendung:

4.4.2 Verfahren nach der Sprungantwort

Bei Anwendung dieser Methode gibt der Regler mit dem Start der Selbstoptimierung einen Ruhestellgrad aus (werksseitig 0 %) und wartet auf die Stabilisierung des Istwertes (Abbildung 58), danach erhöht der Regler den Stellgrad sprungförmig und der Istwert steigt mit immer größerer Steilheit an. Erreicht der Istwert seine maximale Steilheit, sind die Regelparameter ermittelt und die Selbstoptimierung ist beendet:

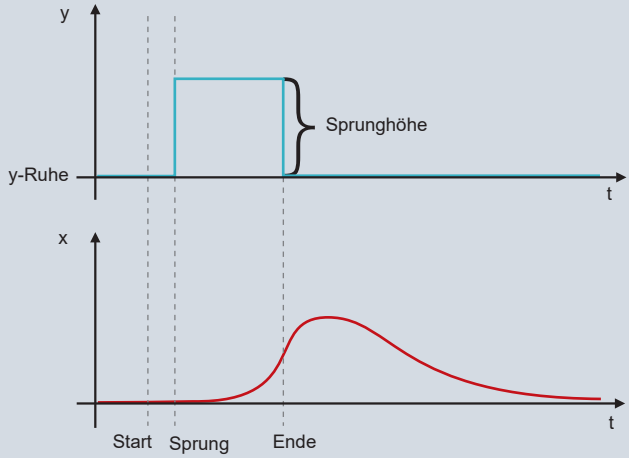


Abbildung 58: Istwert- und Stellgradverlauf während der Selbstoptimierung nach der Sprungantwort

Nach Ende der Selbstoptimierung wird durch den Anwender der Sollwert eingestellt und auf diesen mit den gefundenen Parametern geregelt.

Tipps zur Anwendung des Verfahrens: Vor der Durchführung der Selbstoptimierung ist für den Regler ein Proportionalbereich > 0 einzustellen. Weiterhin greift der Regler für die Berechnung der Zeit vom Start der Selbstoptimierung bis zur Sprungvorgabe auf die Nachstellzeit zurück. Scheint die Zeit bis zur Sprungvorgabe bei einer relativ schnellen Regelstrecke zu lang, kann die Selbstoptimierung unterbrochen, eine kleinere Nachstellzeit eingestellt (beispielsweise 40 s) und die Selbstoptimierung neu gestartet werden.

Bei Verwendung von Zwei- und Dreipunktreglern muss vor der Selbstoptimierung die sogenannte Schaltperiodendauer (Summe aus Ein- und Ausschaltzeit) so klein eingestellt werden, dass sich mit konstantem Stellgrad trotz der stoßweise zugeführten Energie keine Schwingung des Istwertes ergibt.

Regelstrecken verändern je nach Arbeitspunkt ihr Verhalten. Der Stellgradsprung wird deshalb im Bereich des späteren Arbeitspunktes durchgeführt:

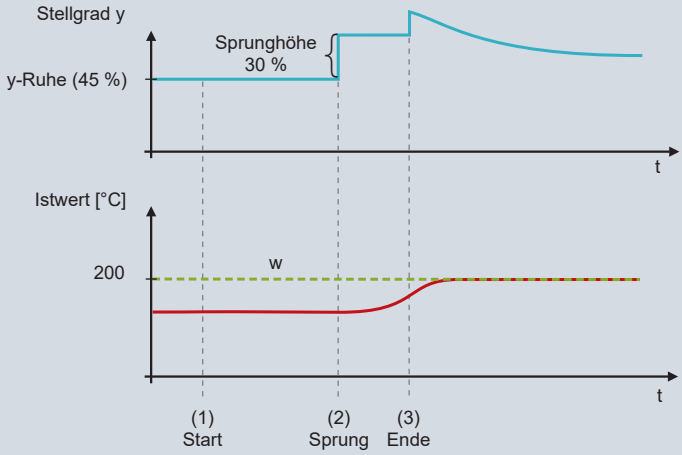


Abbildung 59: Durchführung des Stellgradsprunges im Bereich des Arbeitspunktes

Beispielhaft ist in einer Anwendung der typische Arbeitspunkt 200 °C. Für die Verwendung des Verfahrens muss der Stellgrad für den Arbeitspunkt in etwa bekannt sein. Im Beispiel werden die genannten 200 °C mit ca. 60 % Stellgrad erreicht, die Ermittlung des Stellgrades kann beispielsweise im Handbetrieb erfolgen. Der Ruhestellgrad wird so definiert, dass mit diesem der Istwert unterhalb des späteren Arbeitspunktes liegt. Mit Start der Selbstoptimierung (1) wird der Ruhestellgrad (im Beispiel wurde dieser mit 45 % definiert) ausgegeben. Sobald der Istwert stabil verläuft, wird der Stellgrad um den Stellgradsprung (beispielhaft 30 %) erhöht (2). Der Istwert steigt an, mit Erreichen der größten Steilheit (3) sind die Regelparameter ermittelt und der Regler regelt mit ihnen auf den eingestellten Sollwert.

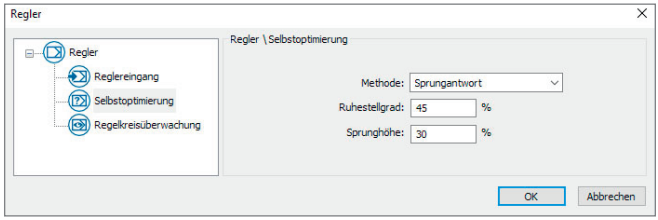


Abbildung 60: Einstellungen für die Selbstoptimierung im Konfigurationsprogramm eines JUMO-Reglers

Für die Anwendung des Verfahrens wird unter „Methode“ (Abbildung 60) „Sprungantwort“ eingestellt, werksseitig ist die Einstellung „Schwingung“. Der Ruhestellgrad und die Sprunghöhe werden im gleichen Menü parametriert.

4.4.3 Weitere Informationen zur Selbstoptimierung

Beide Verfahren können nur für Strecken mit Ausgleich Verwendung finden.

Die Schwingungsmethode kann für alle konfigurierbaren Regler angewendet werden (stetige, Zweipunkt-, Dreipunkt-, Dreipunkt-Schritt- und Stellungsregler).

Bei der Sprungantwortmethode gilt entsprechendes, jedoch findet sie beim Dreipunkt-Schrittregler nur für einen Ruhestellgrad von 0 % und für eine Sprunghöhe von 100 % Anwendung. Begründet ist dies mit der Tatsache, dass der Dreipunkt-Schrittregler keine Kenntnis bezüglich der tatsächlichen Stellgliedposition besitzt, siehe Kapitel 5.3.2.

Bei beiden Verfahren wird die Struktur nach der Selbstoptimierung automatisch auf PID gesetzt und die Parameter X_P , T_n und T_v werden ermittelt. Es existieren zwei Ausnahmen:

Für diverse Regelstrecken ergibt sich aus der Verwendung des D-Anteils ein instabiles Verhalten. Beispiele sind Druck- und Durchflussregelstrecken. In den genannten Fällen wird vor Verwendung der Selbstoptimierung die Struktur PI eingestellt. Die Optimierung erfolgt dann für einen PI-Regler, es findet keine Strukturumschaltung durch die Selbstoptimierung statt.

Wird während der Selbstoptimierung eine Strecke 1. Ordnung erkannt, erfolgt die Umschaltung auf PI-Struktur.

Zusätzlich zu den Regelparametern für das PID-Verhalten berechnet der Regler im Fall von Zwei- und Dreipunktreglern die Schaltperiodendauer der binären Ausgänge (Summe aus Ein- und Ausschaltzeit).

Für die erfolgreiche Ermittlung der Schaltperiodendauer muss die Art des Ausgangs eingestellt werden:

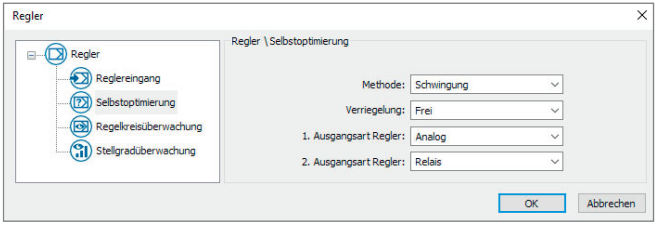


Abbildung 61: Art der Ausgänge für die Selbstoptimierung

Im Fall eines stetigen Reglers ist für den Reglerausgang 1 „Analog“ einzustellen.

Für einen Zweipunktregler sind unter „Reglerausgang 1“ die Einstellungen „Relais“ bzw. „Halbleiter + Logik“ möglich.

Für einen Dreipunktregler ist die Ausgangsart für Reglerausgang 1 und Reglerausgang 2 einzustellen. Infrage kommen „Relais“ bzw. „Halbleiter + Logik“, aber auch „Analog“.

Unterscheidung der Einstellung „Relais“ und „Halbleiter + Logik“
Mit der Einstellung „Relais“ berechnet die Selbstoptimierung die Schaltperiodendauer nur so kurz wie nötig. Das Relais bzw. die nachgeschaltete Mechanik wird so weit als möglich geschont.

Mit der Einstellung „Halbleiter + Logik“ wird die Schaltperiodendauer so klein wie möglich berechnet (der Ausgang wird sehr häufig schalten).

4.5 Manuelle Nachoptimierung eines PID-Reglers

Die Anwendung eines der in diesem Kapitel vorgestellten Optimierungsverfahren wird sehr wahrscheinlich ein stabiles, aber nicht optimales Regelverhalten herbeiführen.

Durch eine manuelle Nachoptimierung wird das Regelergebnis weiter verbessert. Kann das Verhalten eines PID-Reglers einer der Kurven 62b bis 62e zugeordnet werden, finden sich in diesem Kapitel Hinweise für eine weitere Optimierung.

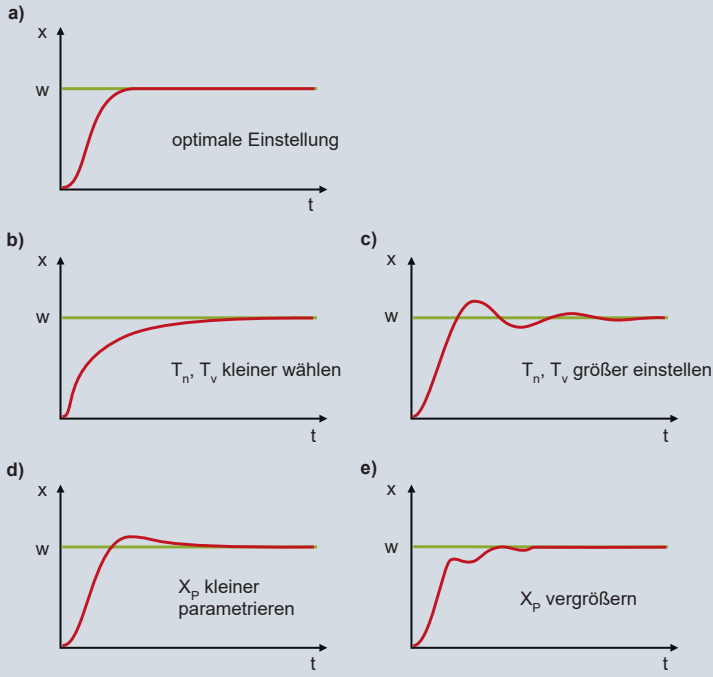


Abbildung 62: Hinweise zur Nachoptimierung eines PID-Reglers

a) Das Diagramm zeigt ein optimales Verhalten für einen PID-Regler.

b) Nach Vorgabe des Sollwertes steigt der Istwert bis zum Erreichen des Proportionalbereiches steil an. Gelangt der Istwert in den Proportionalbereich, wird der P-Anteil reduziert und der I-Anteil sorgt für das Ausregeln auf den Sollwert. Die Vergrößerung des I-Anteils geschieht aufgrund des relativ groß eingestellten T_n träge und die Regelabweichung wird langsam beseitigt. Für das schnellere Integrieren ist T_n kleiner einzustellen, entsprechend dem Verhältnis T_v/T_n = 1/4 wird T_v ebenfalls verkleinert.

c) Mit dem Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich erhöht der I-Anteil den Stellgrad. Die Vergrößerung hält an, bis der Istwert den Sollwert erreicht. Im dargestellten Fall baut der I-Anteil bis zur Beseitigung der Regelabweichung zu viel Stellgrad auf, der Istwert gelangt über den Sollwert. Mit Vorliegen einer negativen Regelabweichung wird der Stellgrad zu schnell reduziert, der Istwert gelangt unter den Sollwert usw. Die symmetrische Schwingung des Istwertes um den Sollwert lässt auf ein zu klein eingestelltes T_n schließen. T_n muss vergrößert und T_v ebenfalls entsprechend dem Verhältnis T_v / T_n = 1/4 erhöht werden.

d) Der I-Anteil wird vom Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich bis zur Beseitigung der Regelabweichung gebildet. Aufgrund des groß eingestellten X_P beginnt der I-Anteil bereits bei einer großen Regelabweichung mit der Bildung des Stellgrades. Durch die zu Beginn große Regelabweichung bildet der I-Anteil seinen Stellgrad relativ schnell. Mit der Beseitigung der Regelabweichung steht ein zu großer I-Anteil an, der Istwert gelangt über den Sollwert. Mit einer kleineren Einstellung für X_P beginnt der I-Anteil erst bei kleineren Regelabweichungen entsprechend langsamer mit dem Aufbau seines Stellgrades. Das dargestellte einmalige Überschwingen wird unwahrscheinlicher.

e) Mit einem zu klein eingestellten X_P wird der Stellgrad des P-Anteils kurz vorm Erreichen des Sollwertes reduziert. Mit Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich wird der P-Anteil sehr stark verkleinert und der Istwert fällt ab. Aufgrund der größeren Regelabweichung wird der Stellgrad größer und der Istwert steigt an. Im Proportionalbereich führen kleine Istwertänderungen zu großen Änderungen des Stellgrades, dies resultiert in einer hohen Schwingungsneigung. Eine Beruhigung erfolgt durch die Vergrößerung des Proportionalbereiches.

4.6 Auswahlhilfe hinsichtlich der Reglerstruktur für unterschiedliche Regelgrößen

Für die meisten Anwendungen weist die PID-Struktur das beste Regelverhalten auf. Es existieren jedoch einige Regelgrößen, die das Deaktivieren bestimmter Anteile erfordern:

Strecken mit einem kleinen Verhältnis T_g/T_u werden durch Verwendung des D-Anteils instabil, empfehlenswert ist PI-Struktur.

Bei einem sehr kleinen Verhältnis T_g/T_u führt selbst der P-Anteil zu Instabilitäten, Verwendung findet der I-Regler. Das extremste Beispiel ist eine Regelstrecke mit ausschließlich Totzeit mit einem Verhältnis von $T_g/T_u = 0$.

Störend ist der D-Anteil allgemein bei pulsierenden Regelgrößen, da dieser kontinuierlich der Änderung des Istwertes entgegenwirkt.

Strecken ohne Ausgleich erfordern die Verwendung von P- oder PD-Struktur. Unter Berücksichtigung von Störgrößen kann gegebenenfalls PID-Struktur zum Einsatz kommen.

Regelgröße	Empfohlene Reglerstruktur
Temperatur	PID
Druck	I
pH-Wert	Durchlaufregelung PID, Standbecken P oder PD
Drehzahl	PI
Durchfluss	I
Niveau	P oder PD (unter Umständen PID)
Förderung (Schüttgut)	I
Positionierung	P bzw. PD

Tabelle 4: Auswahl der Reglerstruktur hinsichtlich verbreiteter Regelgrößen

5 Regler mit Binärausgängen

Dieses Kapitel behandelt Zweipunkt-, Dreipunkt-, Dreipunkt-Schritt- und Stellungsregler. Mit Ausnahme eines Sonderfalles für den Dreipunktregler verfügen diese Regler ausschließlich über binäre Ausgänge. Die Ausgänge können als Relais-, Logik-, Halbleiter- oder PhotoMOS®-Ausgänge ausgeführt sein.

Die Regler kommen für die Ansteuerung von binären Stellgliedern wie Relais, Thyristorleistungsschaltern, Magnetventilen usw. zum Einsatz.

5.1 Zweipunktregler

Ein Zweipunktregler liefert zwei Zustände: 1 und 0 bzw. ein und aus. Er ermöglicht die Ansteuerung eines binären Stellgliedes in trägeren Prozessen.

Der Regler ist vorstellbar als eine Kombination aus einem stetigen Regler und einer nachgeschalteten Schaltstufe. Die Schaltstufe realisiert eine Pulsweiten- bzw. Pulsfrequenzmodulation:

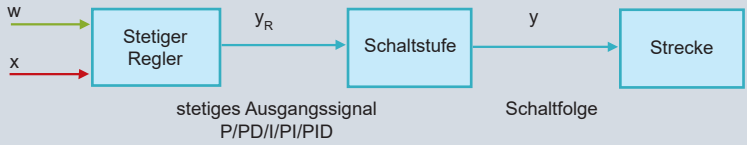


Abbildung 63: Zweipunktregler als stetiger Regler mit nachgeschalteter Schaltstufe

5.1.1 Zweipunktregler mit Impulslängenausgang

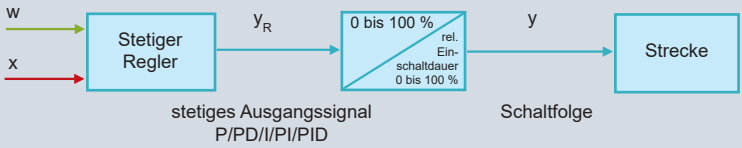


Abbildung 64: Zweipunktregler mit Impulslängenausgang

Der Zweipunktregler mit Impulslängenausgang variiert die relative Einschaltdauer des Ausgangs proportional zum stetigen Reglerstellgrad y_R:

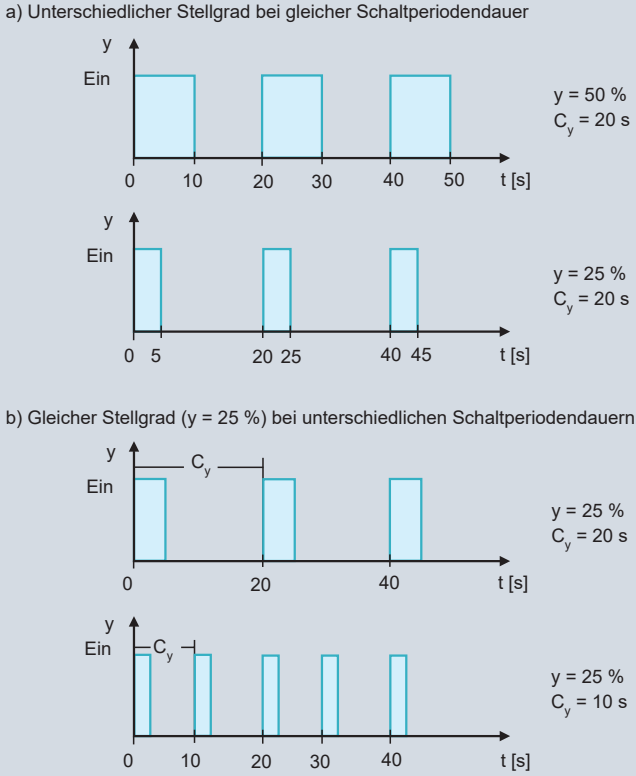


Abbildung 65: Zweipunktregler mit Impulslängenausgang

Abbildung 65a zeigt das Ausgangssignal des Reglers bei einem Stellgrad von 50 % bzw. 25 %. Der Regler aktiviert entsprechend für 50 % bzw. 25 % der Zeit seinen Ausgang, der Stellgrad entspricht der relativen Einschaltdauer.

Für den Impulslängenausgang wird die sogenannte Schaltperiodendauer C_y definiert. Innerhalb der Schaltperiodendauer schaltet der Ausgang einmal ein und aus, im Beispiel beträgt C_y 20 s.

Bei einer für den Prozess zu groß eingestellten Schaltperiodendauer ergeben sich auch bei unverändertem Stellgrad Istwertschwankungen. In Abbildung 65b liegt ein gleicher Stellgrad (25 %) bei unterschiedlichen Schaltperiodendauern vor. Im zweiten Fall ist eine kleinere Schaltperiodendauer eingestellt (10 s). Die Energie wird feiner dosiert, dies führt zu kleineren Schwankungen des Istwertes. Die Schaltperiodendauer muss so gering eingestellt werden, dass keine Schwankungen des Istwertes vorliegen bzw. diese akzeptabel sind.

Bei Ansteuerung einer Mechanik sollte die Schaltperiodendauer C_y nur so klein wie nötig eingestellt werden. Ein kleines C_y geht auf Kosten der Lebensdauer von bspw. Relais und Schützen. Bei elektronischen Ausgängen (Logik-, Halbleiter- oder PhotoMOS®-Ausgang) kann das C_y so klein wie möglich eingestellt werden, um damit die höchste Regelgüte zu erreichen.

5.1.2 Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang

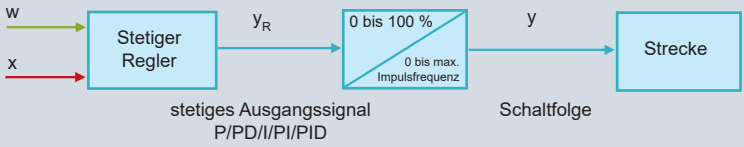


Abbildung 66: Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang

Der Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang variiert proportional zum stetigen Reglerstellgrad y_R die Impulsfrequenz des Ausgangs. Für die Schaltstufe wird am Regler die maximale Impulsfrequenz definiert. Proportional zum Reglerstellgrad (0 bis 100 %) wird die Frequenz am Binärausgang (0 bis maximale Impulsfrequenz) variiert. Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang kommen bei der Ansteuerung von Dosierpumpen zum Einsatz.

5.1.3 Minimale Einschaltdauer bei Zweipunktregler mit Impulslängenausgang bzw. Impulsfrequenzausgang

Einige – mit Impulslängenausgang angesteuerte – Stellglieder müssen für eine Mindestzeit aktiviert bzw. deaktiviert werden. Viele JUMO-Regler ermöglichen deshalb nicht nur die Parametrierung der Schaltperiodendauer (C_y), sondern auch die Einstellung einer Mindesteinbzw. Mindestausschaltdauer (T_k).

Abbildung 67 zeigt den Status des Binärausgangs für einen Zweipunktregler mit Impulslängenausgang. Die minimale Einschaltdauer beträgt 20 s und die Schaltperiodendauer 100 s.

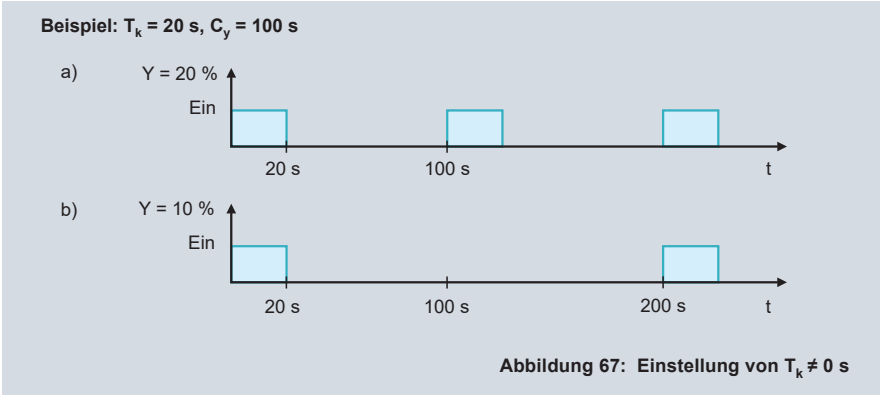


Abbildung 67: Einstellung von $T_k \neq 0$ s

In Abbildung 67a gibt der Regler einen Stellgrad von 20 % aus: Er schließt für 20 s den Ausgang und öffnet ihn für 80 s (bei diesem Stellgrad wird die Schaltperiodendauer von 100 s eingehalten).

In Abbildung 67b gibt der Regler einen Stellgrad von 10 % aus: Auch hier wird der Ausgang für 20 s aktiviert. Für 10 % der Maximalleistung muss der Ausgang die neunfache Zeit deaktiviert werden. Bei dem angegebenen Stellgrad verlängert der Regler die tatsächliche Schaltperiodendauer auf 200 s.

Erfordert eine Dosierpumpe (Ansteuerung mit Impulsfrequenzausgang) eine Mindestansteuerzeit, wird diese ebenfalls unter T_k eingestellt.

5.1.4 Sonderfall unstetiger Zweipunktregler

Wird ein Zweipunktregler mit einem Proportionalbereich (X_P) von 0 betrieben, zeigt dieser unstetiges Verhalten. Mit der Einstellung findet die Schaltdifferenz X_{Sd} Verwendung und der Stellgrad beträgt ausschließlich 0 bzw. 100 %:

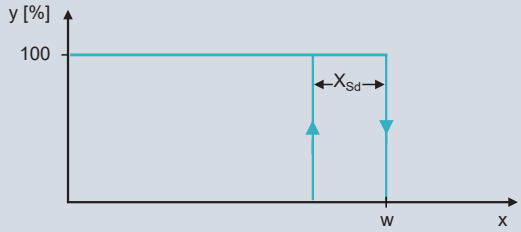


Abbildung 68: Kennlinie eines unstetigen Zweipunktreglers

Der Regler gibt 100 % Stellgrad aus, bis mit steigendem Istwert der Sollwert erreicht wird. Liegt der Istwert über dem Sollwert, beträgt der Stellgrad 0 %. Fällt der Istwert auf den Sollwert, reduziert um die Schaltdifferenz X_{Sd}, beträgt der Stellgrad erneut 100 %.

Mit 100 % Stellgrad schließt der Regler mit Impulslängenausgang den Binärausgang dauerhaft, der Regler mit Impulsfrequenzausgang schaltet den Ausgang mit der Maximalfrequenz. Bei 0 % bleiben die Ausgänge beider Regler abgeschaltet.

Das unstetige Verhalten mit der entsprechenden Berücksichtigung der Schaltdifferenz wird durch die Einstellung von Proportionalbereich = 0 erreicht.

Unstetige Zweipunktregler wie Thermostate und Druckschalter sind günstig in der Beschaffung und erfüllen in vielen Anwendungen ihre Regelaufgabe. Die Komponenten sind den Reglern mit Impulslängenausgang zuzuordnen, wobei der Stellgrad 0 oder 100 % beträgt. Mit den Regeleinrichtungen fällt die Schwankungsbreite des Istwertes bei einigen Regelstrecken höher als die Schaltdifferenz aus – dies gilt für Strecken höherer Ordnung. Der Sachverhalt wird in der Folge für thermische Anlagen dargestellt:

Abbildung 69 zeigt das Verhalten für eine **Regelstrecke 1. Ordnung**. Als Beispiel dient das über eine Heizwendel betriebene Wasserbad aus Kapitel 2.3.3.

Mit dem Einschalten der erkalteten Anlage wird sofort die Heizung aktiviert. Durch das Vorhandensein von nur einem Energiespeicher (die Heizwendel kann keine Energie speichern) steigt die Temperatur sofort an. Mit Erreichen des Sollwertes wird die Leistung auf 0 % zurückgenommen und der Istwert gelangt nicht über den Sollwert. Theoretisch sinkt der Istwert sofort ab und erreicht nach einiger Zeit den unteren Schaltpunkt (Sollwert-Schaltdifferenz). Die Heizung schaltet erneut ein und der Istwert steigt wieder an. Bei einer Strecke 1. Ordnung verläuft der Istwert in dem Band der Schaltdifferenz. Die Schalthäufigkeit ist umso größer, je kleiner die Schaltdifferenz und umso schneller die Regelstrecke ist.

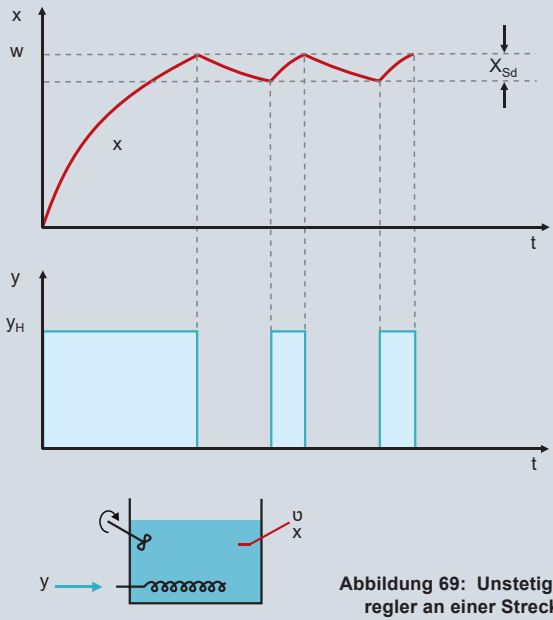


Abbildung 69: Unstetiger Zweipunktregler an einer Strecke 1. Ordnung

Abbildung 70 zeigt das Verhalten für eine **Regelstrecke 2. Ordnung**. Im Gegensatz zur Heizwendel kommt ein Heizstab mit Speichervermögen zum Einsatz.

Mit dem Einschalten der erkalteten Anlage schaltet die Heizung ebenfalls sofort ein. Da ein zweiter Energiespeicher vorhanden ist, steigt die Regelgröße erst nach einiger Zeit an (der Heizstab muss erst aufgewärmt werden). Mit Erreichen des Sollwertes wird die Leistung auf 0 % zurückgenommen. Wegen der vorhandenen Verzugszeit T_u gelangt der Istwert über den Sollwert (im Moment des Abschaltens ist der Heizstab wärmer als das Wasser – Wärmeenergie wird abgegeben). Nach einiger Zeit fällt der Istwert ab und der untere Schaltpunkt wird erreicht. Die Heizung schaltet ein, bis zu einer nennenswerten Erhöhung der Heizstabtemperatur wird die Wassertemperatur jedoch weiter abfallen. Danach steigt der Istwert wieder an.

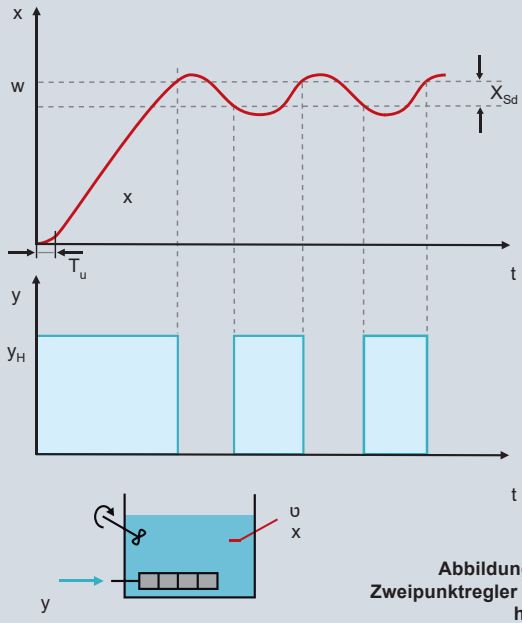


Abbildung 70: Unstetiger Zweipunktregler an einer Strecke höherer Ordnung

Bei einer Strecke höherer Ordnung fallen die Schwankungen des Istwertes größer als die Schaltdifferenz aus. So liegt beispielsweise bei einem Thermostaten die Schaltdifferenz bei 5 K, der Istwert schwankt jedoch möglicherweise über einen Bereich von 10 K.

Fazit unstetige und stetigähnliche Regler:
Unstetige Regelungen sind sinnvoll, wenn die resultierenden Schwankungen des Istwertes nicht stören.

Die unstetigen Regelungen werden durch kostengünstige Komponenten wie Thermostate und Druckschalter aufgebaut.

Werden die Zweipunktregler mit Kompaktreglern realisiert, erfolgt deren Betrieb in der Regel stetigähnlich: Das stetigähnliche Verhalten wird durch die Einstellung eines Proportionalbereiches von größer 0 erreicht. Der Ausgang taktet dann mit der eingestellten Schaltperiodendauer und die relative Einschaltdauer entspricht dem Stellgrad.

Abbildung 71: Aufbauthermostat heatTHERM-AT als Regler

Das Regelergebnis der stetigähnlichen Regler mit angesteuertem binären Stellglied entspricht bei relativ trägen Regelstrecken und einer ausreichend klein eingestellten Schaltperiodendauer dem von stetigen Reglern und analogem Stellglied.

5.2 Dreipunktregler

Ein Dreipunktregler beeinflusst den Istwert in zwei Richtungen. Typisch ist beispielsweise Heizen/Kühlen, Be-/Entfeuchten oder pH-Wert-Anhebung/-Absenkung. Generell ist ein Dreipunktregler als Kombination von zwei stetigen Reglern mit nachgeschalteten Schaltstufen vorstellbar.

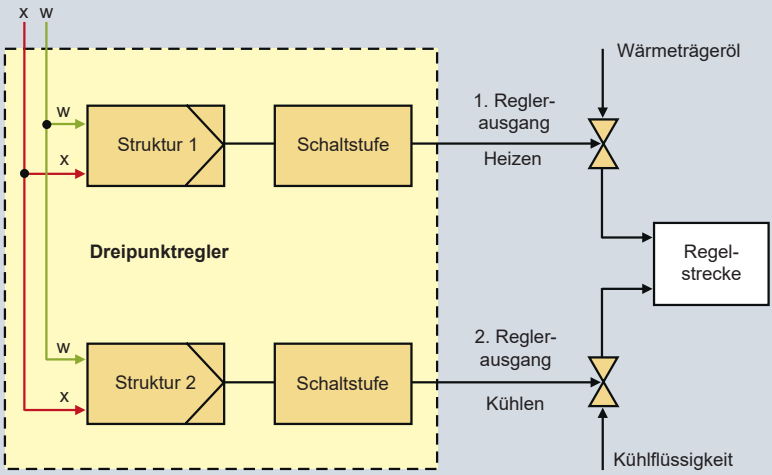


Abbildung 72: Aufbau eines Dreipunktreglers

Statt von zwei Reglern spricht man beim Dreipunktregler von zwei Reglerstrukturen. So gibt beispielsweise bei einem thermischen Prozess Struktur 1 positiven Stellgrad im Bereich von 0 bis 100 % aus. Der Stellgrad wird einer Schaltstufe (Impulslängen- oder Impulsfrequenzausgang) aufgeschaltet oder direkt mit einem stetigen Ausgang ausgegeben.

Struktur 2 gibt bei Kühlbedarf entsprechend Stellgrad von 0 bis -100 % aus. Hinsichtlich der Ausgabe bestehen die gleichen Möglichkeiten wie bei Struktur 1.

Die Ausgänge der beiden Strukturen werden 1. und 2. Reglerausgang genannt.

Beide Strukturen sind unabhängig voneinander einstellbar (P, PD, I, PI oder PID). Durch einen Index wird gekennzeichnet, zu welcher Struktur die Regelparameter gehören: Struktur 1 (X_{P1}, T_{n1}, T_{v1} etc.) bzw. Struktur 2 (X_{P2}, T_{n2}, T_{v2} etc.).

5.2.1 Kontaktabstand

Beim Dreipunktregler kann es ungewünscht zu einem abwechselnden Schalten des 1. und 2. Reglerausganges kommen (z. B. Heizen und Kühlen). Möglicherweise besteht in einer Anwendung generell Heizbedarf, der Istwert schwankt jedoch um den Sollwert. Das wechselhafte Ansteuern der Ausgänge für Heizen und Kühlen führt zu einem uneffektiven Betrieb der Anlage. Für Abhilfe sorgt hier der Kontaktabstand (X_{Sh}):

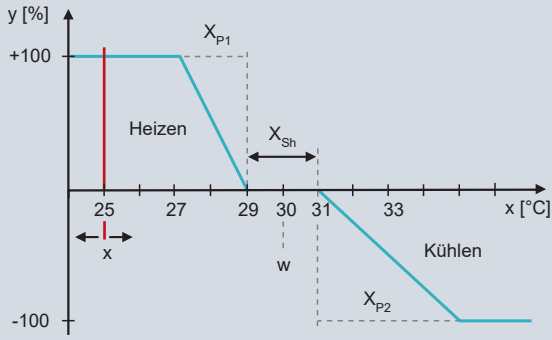


Abbildung 73: Dreipunktregler mit Kontaktabstand und P-Verhalten für Struktur 1 und 2

Abbildung 73 zeigt das Diagramm für einen Dreipunktregler. Für beide Strukturen liegt P-Verhalten vor. X_{P1} beträgt 2 K, X_{P2} liegt bei 4 K. Der Kontaktabstand ist auf 2 K eingestellt.

Beim Anheizen (Istwert liegt beispielsweise bei 25 °C) beträgt der Stellgrad 100 % und der 1. Reglerausgang gibt die maximal mögliche Leistung aus. Ab einem Istwert von 27 °C wird der Stellgrad reduziert, bis dieser bei 29 °C letztlich 0 % beträgt. Bei Strecken höherer Ordnung wird der Istwert möglicherweise über 29 °C gelangen und der Istwert befindet sich im sogenannten Kontaktabstand (X_{Sh}). Im Bereich des Kontaktabstandes ist keiner der beiden Reglerausgänge aktiv. Der Kontaktabstand „schiebt“ die Proportionalbereiche der beiden Reglerstrukturen auseinander. Ohne Kontaktabstand würde der Istwert bei Überschreiten des Sollwertes sofort in den Proportionalbereich X_{P2} gelangen und es würde gekühlt.

Stationär ergibt sich für P-Struktur eine bleibende Regelabweichung: Der Istwert befindet sich letztlich im Proportionalbereich X_{P1}. Nach einer Umschaltung der Struktur von P auf PI integriert der hinzukommende I-Anteil die bestehende Regelabweichung auf und regelt den Istwert auf den Sollwert. Entsprechendes gilt bei Kühlbedarf.

Fazit:
Ein angemessen eingestellter Kontaktabstand verhindert das ungewünschte wechselnde Ansteuern der beiden Aktoren für beispielsweise Heizen und Kühlen. Eine größere Dimensionierung des Parameters verlangsamt das Regelverhalten, hat aber keinen Einfluss auf die Regelgenauigkeit.

Wirksinn
Hinsichtlich des Wirksinns betrachtet man den Gesamtstellgrad des Reglers. Mit steigendem Istwert reduziert der Regler aus Abbildung 73 den Stellgrad von 100 % (Reglerausgang 1 wird zu 100 % angesteuert) auf -100 % (Reglerausgang 2 wird zu 100 % angesteuert). Der Wirksinn ist invers.

Weiterhin arbeiten beide Strukturen mit der Einstellung X_{P1} bzw. X_{P2} = 0 unstetig:

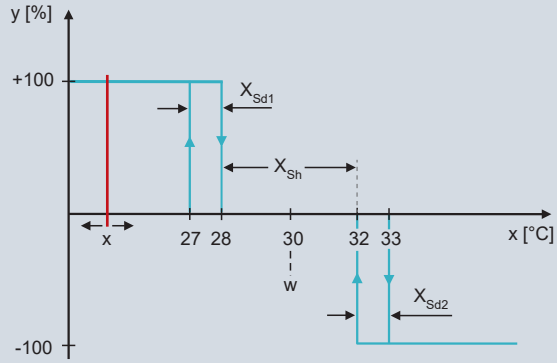


Abbildung 74: Dreipunktregler mit $X_{P1} = X_{P2} = 0$, $X_{Sd1} = X_{Sd2} = 1$ und $X_{Sh} = 4$

5.3 Regler zur Ansteuerung von Motorstellgliedern

Motorstellglieder bestehen aus Stellmotor und Stellglied. Bei den Stellgliedern handelt es sich häufig um Ventile (Gas, Wasser) oder Klappen (Luft etc.). Über zwei Zuleitungen wird der Motor auf Links- oder Rechtslauf geschaltet und damit das Stellglied auf- bzw. zugesteuert.

Die Spannungsversorgung wird üblicherweise über zwei Relaisschließerkontakte auf die genannten Zuleitungen geschaltet:

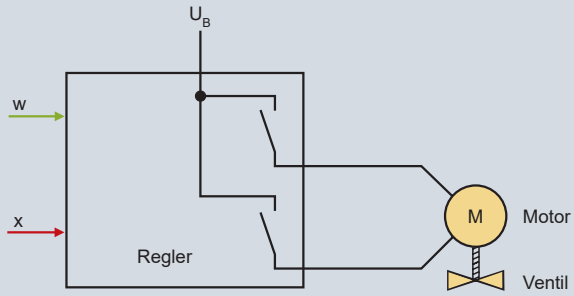


Abbildung 75: Ansteuerung eines Motorstellgliedes über zwei Relaisschließerkontakte

Abbildung 76: Motorstellglied bzw. Stellantrieb der Firma ARI-Armaturen

Für die Ansteuerung von Motorstellgliedern kommen Stellungs- und Dreipunkt-Schrittregler zum Einsatz.

5.3.1 Stellungsregler

Die vollständige Bezeichnung des Stellungsreglers lautet „stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler“:

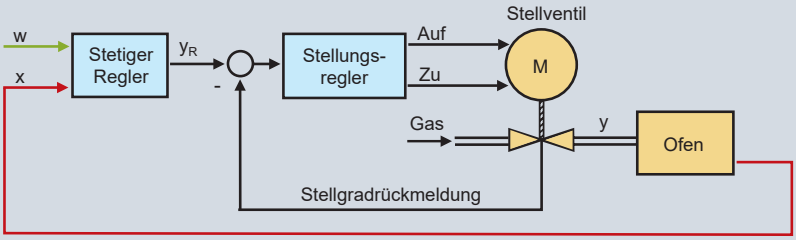


Abbildung 77: Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler im Regelkreis

Aufgrund der Regelparameter und des Soll- bzw. des Istwertes liefert der stetige Regler (Abbildung 77) einen Stellgrad im Bereich von 0 bis 100 %. Der unterlagerte Stellungsregler regelt proportional zum Stellgrad die Position des Stellgliedes aus. Für die Positionierung muss die Stellgradrückmeldung an den Regler erfolgen. Dies geschieht beispielsweise über das in den Stellgliedern befindliche Widerstandspotenziometer.

Üblicherweise nimmt der 2. Analogeingang des Reglers die Stellgradrückmeldung auf. Der Istwert (in Abbildung 77 die Ofentemperatur) wird dem Regler über Analogeingang 1 zugeführt.

Eine Optimierung des unterlagerten Stellungsreglers ist nicht notwendig, es muss lediglich die Stellgliedlaufzeit (TT) am Regler eingestellt werden. Innerhalb der Stellgliedlaufzeit verfährt das Stellglied vom vollständig geöffneten in den geschlossenen Zustand (und umgekehrt). Typische Werte für TT sind 30 oder 60 Sekunden.

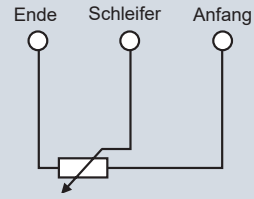


Abbildung 78: Prinzip Widerstandspotenziometer

5.3.2 Dreipunkt-Schrittregler

Im Vergleich zum Stellungsregler verzichtet der Dreipunkt-Schrittregler auf die Stellgradrückmeldung. Der Regler kann keine definierte Position anfahren, sondern fährt das Stellglied nur weiter auf und zu:

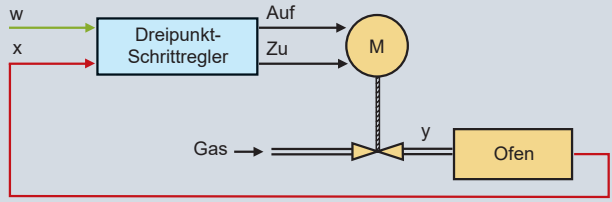


Abbildung 79: Der Dreipunkt-Schrittregler mit Motorstellglied im geschlossenen Regelkreis

Aufgrund der nicht vorhandenen Stellgradrückmeldung kann auch im Handbetrieb kein definierter Stellgrad angefahren werden, es geschieht nur ein manuelles Auf- und Zufahren. Weiterhin sind nur Reglerstrukturen mit I-Anteil möglich (PI und PID).

Beispiel:
Für einen Dreipunkt-Schrittregler mit PI-Struktur (X_P = 25 K, T_n = 120 s) und einer Stellgliedlaufzeit (TT) von 60 s beträgt Istwert = Sollwert = 0 °C. Nach der Erhöhung des Sollwertes beträgt die Regelabweichung 10 K (Abbildung 80).

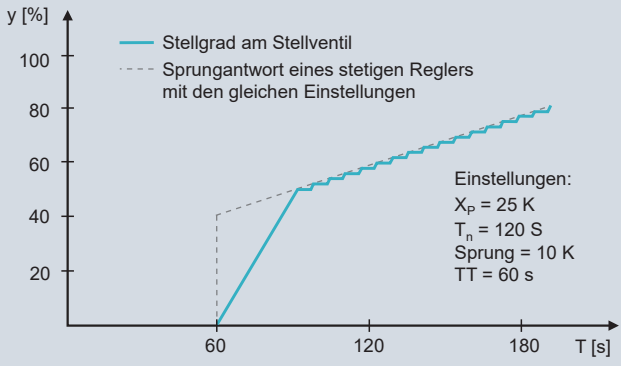


Abbildung 80: Sprungantwort des Systems Dreipunkt-Schrittregler und Stellventil

Durch das eingestellte X_P von 25 K und die plötzlich auftretende Regelabweichung von 10 K ergibt sich nach dem Sprung ein P-Anteil von 40 %. Der Dreipunkt-Schrittregler steuert das Relais für 24 s an und schafft damit eine Stellgradvergrößerung um 40 %:

$$\frac{40\ \%}{100\ \%} \times \text{Stellgliedlaufzeit} = 24\ \text{s} \qquad (30)$$

Aufgrund der Regelabweichung von 10 K und der Dimensionierung von X_P = 25 K und T_n = 120 s wird der I-Anteil mit einer Geschwindigkeit von 1 % pro 3 s erhöht.

Die genannte Stellgraderhöhung am Stellglied mit der Laufzeit von 60 s geschieht durch eine getaktete Ansteuerung des Relais.

Solange die Regelabweichung vorliegt, taktet der Regler das Stellglied immer weiter auf. Beim Dreipunkt-Schrittregler kann es vorkommen, dass das Stellglied bereits offen ist, der Regler aber weiterhin aufsteuert (beispielsweise wenn die Gaszufuhr abgeschaltet ist). Dieser Sachverhalt erfordert Endschalter in den Stellgliedern.

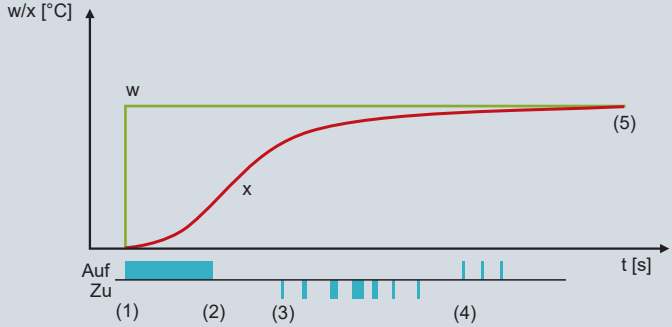


Abbildung 81: Führungsverhalten eines Dreipunkt-Schrittreglers

Abbildung 81 zeigt Sollwert, Istwert und die beiden Reglerausgänge des Dreipunkt-Schrittreglers: Ein neuer Sollwert wird vorgegeben (1). Der Istwert liegt außerhalb des Proportionalbereiches und der Regler steuert mit dem ersten Reglerausgang das Ventil mindestens für die Stellgliedlaufzeit auf – bis (2). Gelangt der Istwert in den Proportionalbereich, wird der P-Anteil geringer und der I-Anteil gleichzeitig größer. Ab (3) überwiegt die Abnahme des P-Anteils, das Stellglied wird geschlossen. Ab (4) überwiegt die Zunahme des I-Anteils und der Gesamtstellgrad nimmt zu. Ab (5) ist ausgeregelt, es erfolgt keine weitere Ansteuerung der Reglerausgänge und das Ventil verharrt in seiner Position.

Der Handbetrieb

Dem Dreipunkt-Schrittregler ist die tatsächliche Position des Stellgliedes nicht bekannt, er kann das Stellglied nicht auf einen im Handbetrieb definierten Stellgrad fahren. Nach Aktivierung des Handbetriebs wird das Stellglied manuell verfahren (Tippbetrieb).

5.3.3 Weitere Informationen zum Stellungs- und Dreipunkt-Schrittregler

Kontaktabstand
Die Regler steuern ihre Ausgänge immer minimal für die Abtastrate an, diese liegt bei JUMO-Reglern zwischen 50 und 250 ms. Mit dieser Eigenschaft begründet, können nicht beliebig feine Stellgradänderungen herbeigeführt werden.

Beispielhaft ergibt sich für eine Stellgliedlaufzeit von 60 s und für eine Ansteuerung über 250 ms eine Stellgradänderung von theoretisch ca. 0,4 %. Aus der Stellgradänderung ergibt sich eine Istwertänderung von möglicherweise einigen Kelvin. Der Istwert wird um den Sollwert herum schwanken und das Stellglied wird auf- und zugesteuert. Der Parameter Kontaktabstand (X_{Sh}) definiert ein Band um den Sollwert, in dem keine Ansteuerung der Reglerausgänge erfolgt. Die Regelgenauigkeit wird sich auf einen Bereich von w ± 1/2 X_{Sh} einstellen.

Praktische Einstellung für den Kontaktabstand
Wird das Stellglied nach der Regleroptimierung im Bereich des Sollwertes wechselnd auf- und zugefahren, ist eine Einstellung für den Kontaktabstand von größer 0 erforderlich. Der Parameter wird solange vergrößert, bis nach dem Ausregeln kein wechselndes Auf- und Zufahren mehr erfolgt. Das Stellglied wird somit nicht unnötig beansprucht. Besonders wichtig ist die richtige Dimensionierung des Kontaktabstandes bei Stellgliedern, die nicht für den Dauerbetrieb ausgelegt sind.

Vergleich Stellungsregler – Dreipunkt-Schrittregler

Der **Stellungsregler** fährt den vom Stetigen Regler geforderten Stellgrad im Automatikbetrieb oder Handbetrieb an. Hieraus ergeben sich eine etwas höhere Regelgüte sowie Vorteile im Servicefall.

Aufgrund einer – von der Stellgradrückmeldung unabhängigen – Regelung bietet der **Dreipunkt-Schrittregler** eine höhere Betriebssicherheit. Die Regelung kann mit einem Dreipunkt-Schrittregler kostengünstiger aufgebaut werden (kein Potenziometer für das Motorstellglied und keine Verdrahtung notwendig) und ist für viele Applikationen ausreichend.

6 Spezielle Reglerschaltungen

Dieses Buch hat bisher nur einschleifige Regelkreise betrachtet: Ein Regler steuert aufgrund seiner Regelparameter und des vorliegenden Ist- und Sollwertes ein Stellglied an.

Abweichende Reglerschaltungen können folgende Ziele verfolgen:

- kostenoptimierter Aufbau
- einfachere Regelbarkeit
- ressourcen- und kostenoptimierter Betrieb
- keine Beeinflussung durch Störgrößen
- Reduzierung des Störgrößeneinflusses
- Begrenzung des Energieflusses

6.1 Grundlast

Beim Betrieb von Anlagen mit Grundlastvorgabe wird der Anlage grundsätzlich ein Teil der Leistung aufgeschaltet. Der Regler steuert nur einen Teil der Gesamtleistung.

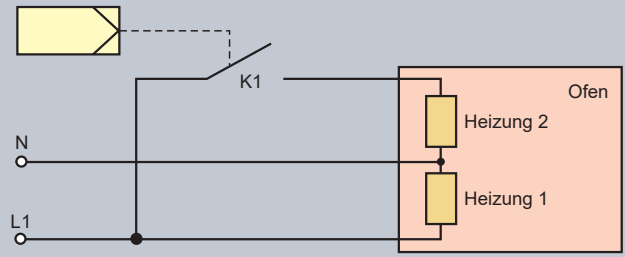


Abbildung 82: Grundlastvorgabe

Im Beispiel (Abbildung 82) wird Heizung 1 kontinuierlich eingeschaltet, der Regler steuert nur Heizung 2. Die Grundlastvorgabe ermöglicht eine kleinere Dimensionierung des Stellgliedes. Des Weiteren ist bei der Verwendung von Zweipunktreglern für eine elektrische Beheizung die wechselnde Netzbelastung geringer. Sollte für den Regler eine Störung vorliegen, wird der Prozess weiterhin mit der Grundlast betrieben, es ergibt sich eine höhere Prozesssicherheit.

6.2 Zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern

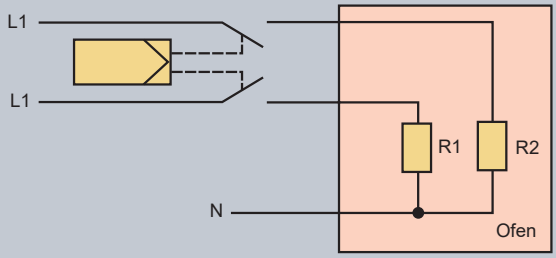


Abbildung 83: Zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern

Das Beispiel (Abbildung 83) zeigt die zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern: Für den schematisch dargestellten Ofen werden zum Anheizen Heizung 1 und 2 verwendet. Gelangt die Ofentemperatur in die Nähe des definierten Sollwertes, wird Heizung 1 abgeschaltet und mit Heizung 2 auf den Sollwert geregelt. Für Stellglied 1 ist in der Regel nur eine unstetige Ansteuerung vorgesehen (Abschaltung, wenn die Regelabweichung unter einem definierten Wert liegt). Für Stellglied 2 kommen stetige Stellglieder (beispielsweise Thyristorleistungssteller) oder binäre Stellglieder (wie Thyristorleistungsschalter) zum Einsatz. Im Zusammenhang mit Gasfeuerungsanlagen können auch Motorstellglieder Verwendung finden.

Zum Einsatz kann diese Struktur kommen, wenn Stellglied 2 für das Ausregeln ausreichend Heizleistung bereitstellt und Stellglied 1 nur zum Anheizen benötigt wird. Das Stellglied für das Ausregeln kann kleiner ausfallen und die Lastwechsel im ausgeregelten Zustand sind weniger intensiv.

Thermische Anlagen werden vereinzelt in einem großen Temperaturbereich betrieben: Es werden sehr hohe, aber auch geringe Temperaturen als Sollwert vorgegeben. Bei den kleinen Sollwerten wird nur ein Bruchteil der zur Verfügung stehenden Leistung benötigt, es besteht ein hoher Leistungsüberschuss. Im Fall von binären Stellgliedern können diese in der Momentaufnahme immer nur die volle oder keine Leistung ausgeben. Nach Vorgabe eines kleinen Sollwertes kann es bereits durch ein kurzes Ansteuern des Aktors (mit seiner hohen Nennleistung) zu einem Überschwingen kommen.

Eine Lösung kann sich ergeben, indem die Leistung ebenfalls über zwei Stellglieder ausgegeben wird. Bei den kleinen Sollwerten wird jedoch nur ein Stellglied angesteuert, ab einem bestimmten Sollwert sind es 2.

Bei kleinen Sollwerten ist die ausgegebene Maximalleistung geringer und ein Überschwingen wird unwahrscheinlicher.

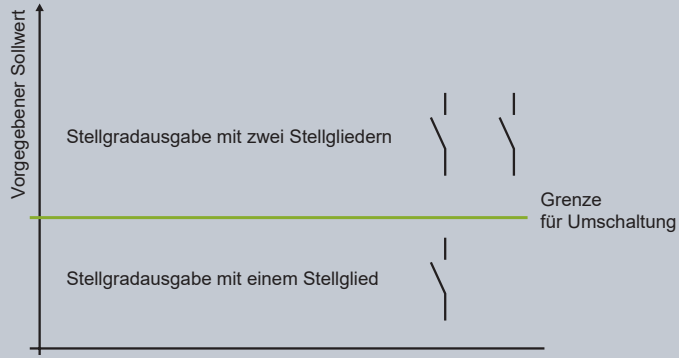


Abbildung 84: Ansteuerung von einem oder zwei Stellgliedern – je nach Höhe des eingestellten Sollwertes

Zur Realisierung dieser Ansteuerung überwacht der Regler den eingestellten Sollwert (in JUMO-Reglern geschieht dies mit der sogenannten Grenzwertüberwachung). Liegt der Sollwert über einer definierten Grenze, wird das zweite Stellglied mit angesteuert (in JUMO-Reglern geschieht dies über die sogenannte Logikfunktion).

Thermische Regelstrecken verfügen im höheren Temperaturbereich über einen kleineren Übertragungsbeiwert als für kleinere Istwerte. Um eine gute Regeldynamik zu erreichen, kann die Verstärkung für die hohen Temperaturen oft relativ hoch vorliegen (der Proportionalbereich wird entsprechend klein eingestellt).

Für kleinere Istwerte kann die hohe Reglerverstärkung jedoch zu groß sein und der Regelkreis instabil werden. Die Instabilität resultiert aus der zu hohen Gesamtverstärkung. Die Gesamtverstärkung ergibt sich aus der Verstärkung des Reglers, multipliziert mit dem Übertragungsbeiwert der Regelstrecke.

Durch die reduzierte Leistung bei den kleinen Sollwerten (siehe Abbildung 84) wird der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke geringer und die Kreisverstärkung ähnlich wie im höheren Arbeitsbereich. Tendenziell wird die Regelung auch bei den kleinen Sollwerten stabil bleiben.

6.3 Split-Range-Betrieb

Als Split-Range-Betrieb wird die Aufteilung des Reglerstellgrades (in der Regel 0 bis 100 %) auf mehrere Stellglieder bezeichnet. Die Aufteilung kann beispielhaft durch einen hohen Leistungsbedarf erforderlich werden, der auf mehrere Stellglieder verteilt wird. Im dargestellten Schema ermöglicht der Split-Range-Betrieb den energieeffizienten Betrieb einer Kühlanlage:

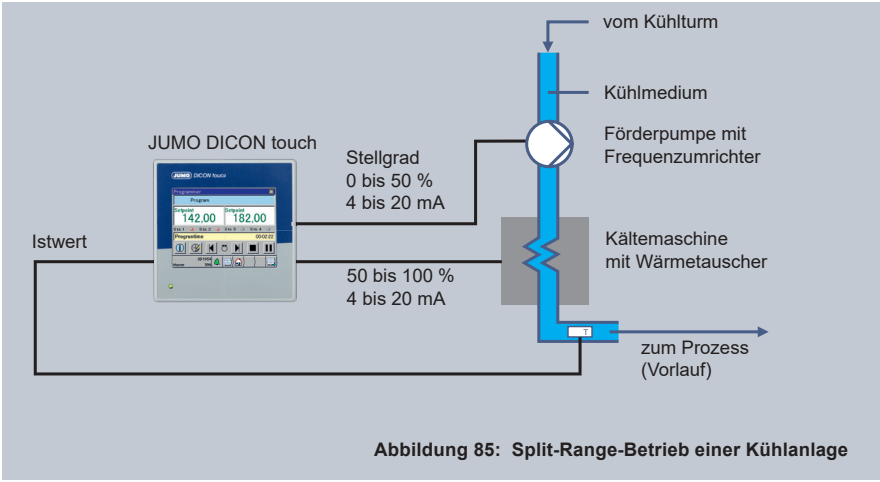


Abbildung 85: Split-Range-Betrieb einer Kühlanlage

Die Kühlanlage stellt Kühlflüssigkeit mit einer geforderten Vorlauftemperatur für einen Prozess bereit. Bei niedrigen Außentemperaturen erfolgt die Kühlung ressourcenschonend und kostengünstig mithilfe eines Kühlturms. Bis zu einem Stellgrad des Reglers von 50 % erhöht die Förderpumpe die Menge des Kühlmediums. Reicht die Kühlung durch den Kühlturm nicht mehr aus, erhöht der Regler automatisch den Stellgrad auf größer 50 %. Ab diesem Stellgrad erfolgt die Nachkühlung des Kühlmediums. Die Leistung der Kältemaschine wird mit größer werdendem Stellgrad erhöht. Bei 100 % Stellgrad ist die größte Kühlleistung bei maximalem Durchfluss erreicht.

Im Beispiel findet ein stetiger Regler Verwendung, der Split-Range-Betrieb ist auch mit Zweipunktreglern möglich.

6.4 Konstanthalten von Störgrößen

Variieren Störgrößen in einem Regelkreis, verändern diese die Regelgröße und daraus resultiert übergangsweise eine Regelabweichung. Mit jeder Störgrößenänderung variiert der Regler seinen Stellgrad und regelt den Istwert wieder auf den Sollwert. Insbesondere bei häufiger Störgrößenänderung kann der beschriebene Sachverhalt zu einem unbefriedigenden Regelergebnis führen.

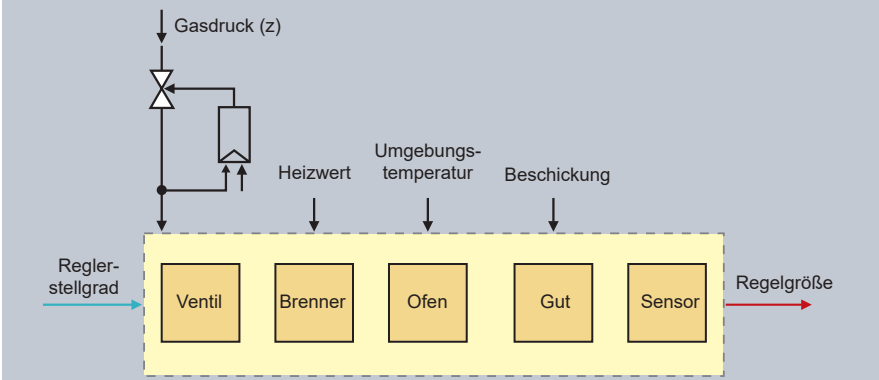


Abbildung 86: Konstanthalten der Störgröße Gasdruck in einem gasbetriebenen Ofen

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ist im Fall eines gasbetriebenen Ofens der Gasdruck eine der Störgrößen (Abbildung 86). Befindet sich das System in einem ausgeregelten Zustand, wird sich nach einer Gasdruckänderung eine Temperaturabweichung einstellen. Der Regler wird den Stellgrad verändern und somit die Regelabweichung beseitigen. Im Beispiel wird der Gasdruck konstant gehalten und so der Einfluss auf die Regelgröße vermieden. Die Realisierung kann über einen Druckminderer erfolgen (in Abbildung 86 als Regler mit Ventil dargestellt).

6.5 Störgrößenaufschaltung

In Abhängigkeit von den Störgrößen kann der Stellgrad des Reglers so verändert werden, dass im günstigsten Fall die Beeinflussung des Istwertes vollständig kompensiert wird.

In JUMO-Reglern kann aufgrund der Störgröße ein zusätzlicher Stellgrad aufgeschaltet (additive Störgrößenaufschaltung) oder der Stellgrad proportional zur Störgröße (multiplikative Störgrößenaufschaltung) verändert werden.

Der Reglerstellgrad wird in Abhängigkeit von der Störgröße beeinflusst. Die Stellgradänderung des Reglers aufgrund der Beeinflussung durch die Störgröße verkleinert die auftretende Regelabweichung bei Störgrößenänderung. Möglich ist diese sogenannte Störgrößenaufschaltung, wenn die Störgröße messtechnisch erfasst und der Einfluss von Störgrößenänderungen auf den Istwert abgeschätzt werden kann.

6.5.1 Additive Störgrößenaufschaltung

Die additive Störgrößenaufschaltung wird genutzt, wenn bei Veränderung der Störgröße ein zusätzlicher Stellgrad ausgegeben werden soll.

Beispiel für die additive Störgrößenaufschaltung:

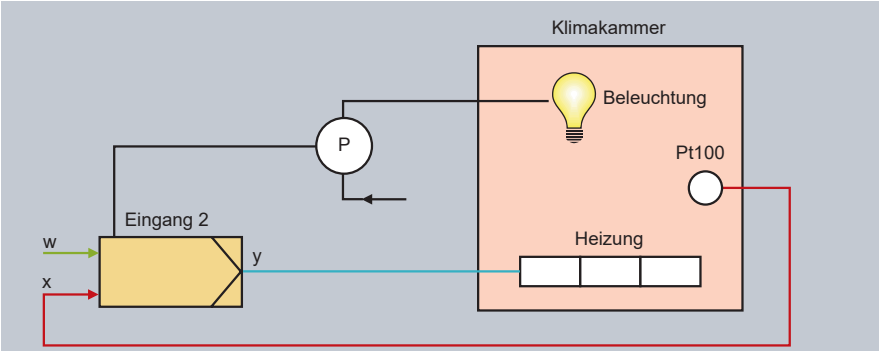


Abbildung 87: Beispiel für eine additive Störgrößenaufschaltung

In dem Brutschrank (Abbildung 87) befinden sich hochempfindliche Proben. Der Regler wird für die sehr exakte Regelung der Temperatur eingesetzt. Durch Einschalten der Beleuchtung entsteht ein zusätzlicher Wärmeeintrag und die Temperatur steigt an. Der Regler reagiert auf die Regelabweichung mit einer Reduzierung des Stellgrades und regelt den Istwert auf den Sollwert. Sobald die Lichtintensität wieder verändert wird, entsteht erneut eine Regelabweichung.

Der Wärmeeintrag durch die Beleuchtung ist die Störgröße, ein Maß für diese Störgröße ist die in die Beleuchtung geführte elektrische Leistung.

Das Messsignal für die elektrische Leistung wird dem Regler beispielsweise über den zweiten Analogeingang als additive Störgrößenaufschaltung zugeführt. Bei einer Maximalleistung von 50 W soll der Stellgrad um 10 % reduziert werden:

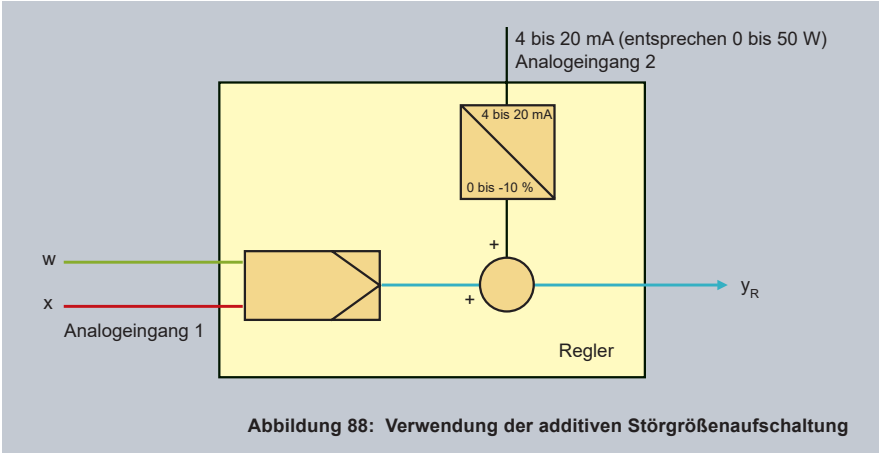


Abbildung 88: Verwendung der additiven Störgrößenaufschaltung

Im Beispiel (Abbildung 88) wird der Istwert dem Regler über Analogeingang 1 zugeführt. Das Leistungssignal wird über Analogeingang 2 als additive Störgrößenaufschaltung verwendet, 4 bis 20 mA entsprechen 0 bis 50 W.

Mit der Skalierung 4 bis 20 mA (0 bis 50 W) – entspricht 0 bis -10 % – wird bei einer Leistung von beispielsweise 50 W der Reglerstellgrad um 10 % reduziert. Mit Erhöhung der Beleuchtungsstärke wird der Vergrößerung des Istwertes entgegengewirkt.

Die additive Störgrößenaufschaltung realisiert einen zusätzlichen Stellgrad in Abhängigkeit von der Störgröße.

6.5.2 Multiplikative Störgrößenaufschaltung

Die multiplikative Störgrößenaufschaltung verändert den Reglerstellgrad proportional zur Störgröße.

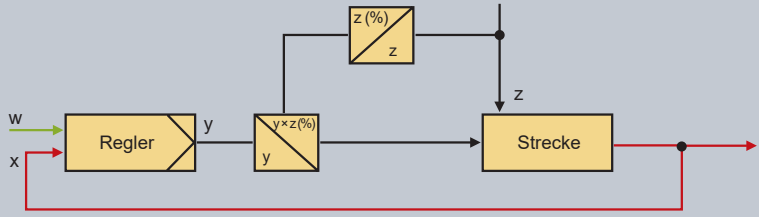


Abbildung 89: Schema der multiplikativen Störgrößenaufschaltung

Aus der Störgröße (z) wird der Wert z (%) gebildet, siehe Abbildung 89. Der Reglerstellgrad wird mit diesem Prozentwert multipliziert.

Anwendung findet dieses Verfahren, wenn in Prozessen der Stellgrad proportional zur Störgröße geändert werden muss.

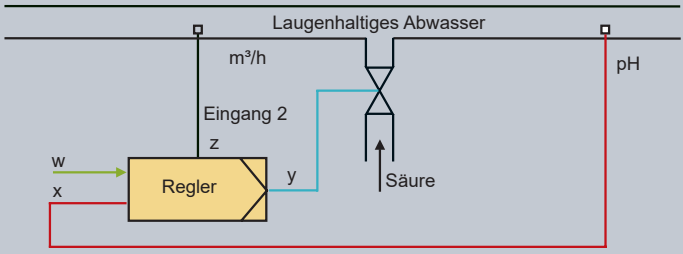


Abbildung 90: Neutralisationsanlage

Als Beispiel dient eine Neutralisationsanlage (Abbildung 90), in dieser wird zur Neutralisation von laugenhaltigen Abwässern Säure zugegeben. Ziel ist die Erreichung eines Sollwertes von pH 7 für die Abwässer.

Die Störgröße ist der Durchfluss, bei Verdoppelung der Durchflussmenge wird die doppelte Menge an Säure benötigt. Über Eingang 2 wird der Durchfluss multiplikativ aufgeschaltet. Der Durchfluss liegt als 4- bis 20-mA-Signal vor, dies entspricht einem Durchfluss von 0 bis „maximaler Durchfluss“. Durch die Skalierung des Stromsignals an Eingang 2 wird beispielsweise bei einem Signal von 4 bis 20 mA ein Wert von 0 bis 100 % gebildet. Der durch den Regler ermittelte Stellgrad wird mit der Störgröße in % multipliziert. Steigt beispielsweise der Durchfluss auf den doppelten Wert, wird der Reglerstellgrad vor der Ausgabe ebenfalls verdoppelt. Die Störgrößenaufschaltung unterdrückt dynamische Regelabweichungen nach einer Änderung des Durchflusses.

Die Regelstrecke weist bei einem großen Durchfluss einen kleinen Übertragungsbeiwert auf – die Veränderung der Säuredosierung hat nur geringen Einfluss auf den pH-Wert.

Demgegenüber ist bei einem kleinen Durchfluss der Übertragungsbeiwert größer – die Veränderung der Säuredosierung hat größeren Einfluss auf den pH-Wert.

Ohne Störgrößenaufschaltung ist es somit durchaus möglich, dass die Anlage für einen hohen Durchfluss ein gutes Regelverhalten zeigt, bei einem kleinen Durchsatz jedoch durch den hohen Übertragungsbeiwert Schwingungsneigung aufweist.

Durch die Störgrößenaufschaltung wird die Reglerverstärkung für geringeren Durchfluss reduziert und die Regelgröße bleibt auch in diesem Bereich tendenziell eher stabil. Dies ist ein positiver Nebeneffekt.

6.6 Kaskadenregelung

Die in diesem Buch dargestellten Regelkreise waren bisher einschleifig:

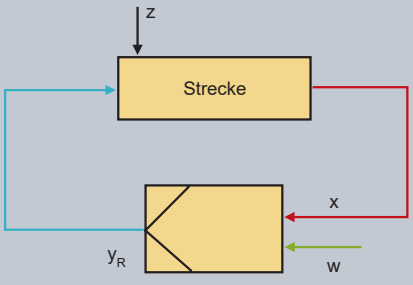


Abbildung 91: Der einschleifige Regelkreis

Dem Regler wird der Sollwert vorgegeben und er misst den Istwert. Aufgrund der vorhandenen Regelparameter wird der Reglerstellgrad berechnet und mit diesem direkt der Aktor angesteuert.

Bei der **Kaskadenregelung** sind mindestens 2 Regelkreise verschachtelt bzw. kaskadiert (Abbildung 92). Durch die Struktur wird die Regelstrecke auf mindestens 2 Teile aufgeteilt. Der Anlagensollwert wird am sogenannten Führungsregler vorgegeben, der seinerseits den Istwert auf diesen Wert regelt:

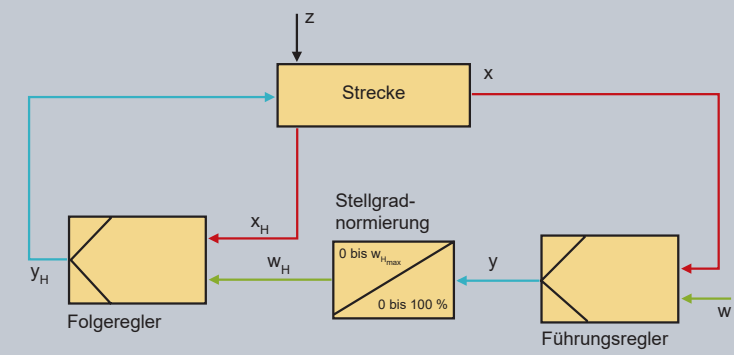


Abbildung 92: Kaskadenregelung

Proportional zum Stellgrad des Führungsreglers regelt der Folgeregler einen Hilfsistwert aus. Wie groß der Hilfsistwert bei 0 % bzw. 100 % Stellgrad des Führungsreglers sein soll, wird durch die Stellgradnormierung festgelegt. Generell kann die Struktur eingeführt werden, wenn in einer Regelstrecke ein Hilfsistwert (x_H) messtechnisch erfasst und dieser proportional zum Reglerstellgrad ausgeregelt werden soll.

6.6.1 Gründe für die Einführung der Kaskadenregelung

Die Gründe für die Einführung der Kaskadenregelung sind unterschiedlich und werden in diesem Kapitel beispielhaft aufgezeigt.

Aufteilung von Zeitgliedern auf mehrere Regelkreise

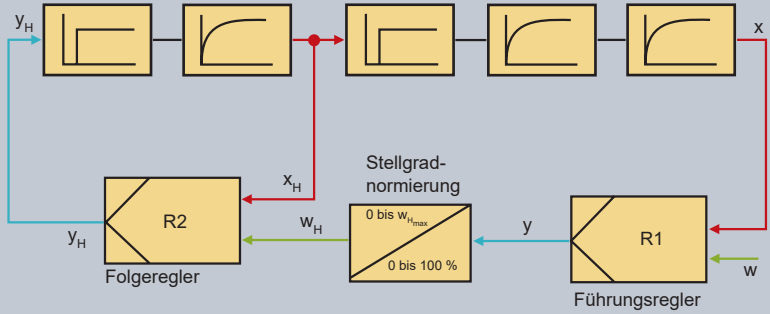


Abbildung 93: Aufteilung von Zeitgliedern auf mehrere Regelkreise

Durch die Aufteilung der Zeitglieder vergeht nicht mehr die gesamte Verzugszeit, bis der Regler auf eine Störung am Streckeneingang reagieren kann. Nach Veränderung der Störgröße im inneren Regelkreis reagiert der Folgeregler bereits nach dem Verstreichen der Verzugszeit dieser Teilregelstrecke. Störungen werden schneller kompensiert.

Das jeweilige Verhältnis T_g/T_u der beiden einzelnen Teilstrecken ist größer als das der gesamten Regelstrecke. Die Teilstrecken und damit auch der Gesamtprozess sind durch die Kaskadenstruktur besser beherrschbar. Die Regelgüte wird höher bzw. Regelkreise werden erst durch die Einführung der Kaskadenregelung beherrschbar.

Begrenzung der Leistung in der Regelstrecke bzw. des Hilfsistwertes

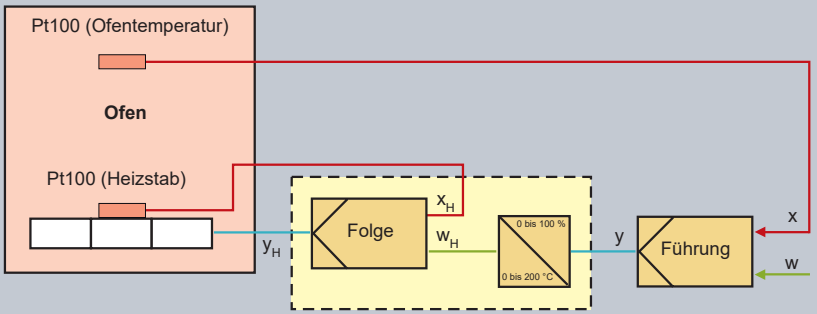


Abbildung 94: Kaskadenregelung an einem Ofen

Im Beispiel (Abbildung 94) wird eine Heizstabtemperatur auf 200 °C begrenzt. Soll- und Istwert für den Ofen stehen am Führungsregler zur Verfügung. Der Führungsregler ermittelt einen Stellgrad im Bereich von 0 bis 100 %. Durch die Stellgradnormierung erfolgt eine Umwandlung in 0 bis 200 °C. Proportional zu dem Stellgrad von 0 bis 100 % regelt der Folgeregler eine Heizstabtemperatur von 0 bis 200 °C aus.

Kompensation von Störgrößen

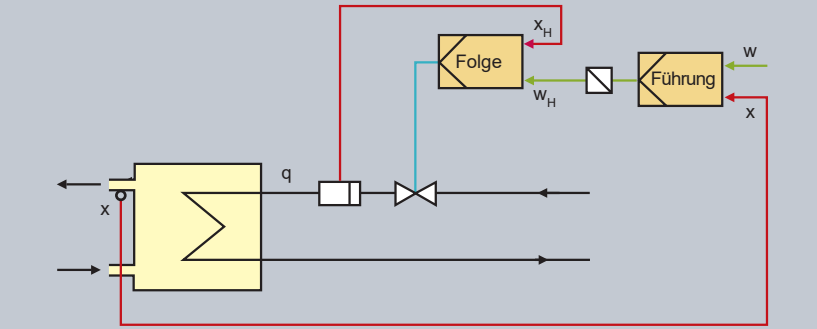


Abbildung 95: Kaskadenregelung an einem dampfbetriebenen Durchlauferhitzer

In dem Durchlauferhitzer (Abbildung 95) wird die Temperatur einer Flüssigkeit mithilfe von Dampf auf eine definierte Vorlauftemperatur (w) geregelt. Die Regelung der Temperatur übernimmt der Führungsregler. Proportional zum Stellgrad des Führungsreglers regelt der Folgeregler den Dampfdurchfluss für den Durchlauferhitzer. Die Zuordnung „Stellgrad des Führungsreglers“ zu „Dampfdurchfluss“ erfolgt durch die Stellgradnormierung. Bei Dampfdruckschwankungen in der Versorgung hält der Folgeregler den Dampfdurchfluss weiterhin konstant. Die Veränderung der Störgröße Dampfdruck hat somit keinen Einfluss auf die Vorlauftemperatur der Flüssigkeit.

6.6.2 Reglerstrukturen und Optimierung von Führungs- und Folgeregler

Bei Aktivierung des I-Anteils für Führungs- und Folgeregler neigt das Gesamtsystem zum Schwingen. Mit dieser Tatsache begründet, findet für den Führungsregler PID- und für den Folgeregler PD-Struktur Verwendung. Für den Folgeregler wird sich immer eine Regelabweichung einstellen, der Führungsregler sorgt jedoch für das Ausregeln des Istwertes.

Die Optimierung des Gesamtsystems erfolgt von innen nach außen: Der Führungsregler wird in den Handbetrieb geschaltet und ein typischer Stellgrad wird vorgegeben. Durch die Stellgradnormierung ergibt sich am Folgeregler ein typischer Sollwert und für den Folgeregler kann eine Selbstoptimierung erfolgen. Nach der Optimierung des Folgereglers auf PD-Struktur wird auch der Führungsregler in den Automatikbetrieb geschaltet und optimiert.

6.7 Verhältnisregelung

Verhältnisregler werden für Brennersteuerungen (Regelung des Gas-/Luft-Mischungsverhältnisses) in der Analysenmesstechnik (Mischung von Reaktionspartnern) und in der Verfahrenstechnik (Herstellung von Mischungen) verwendet.

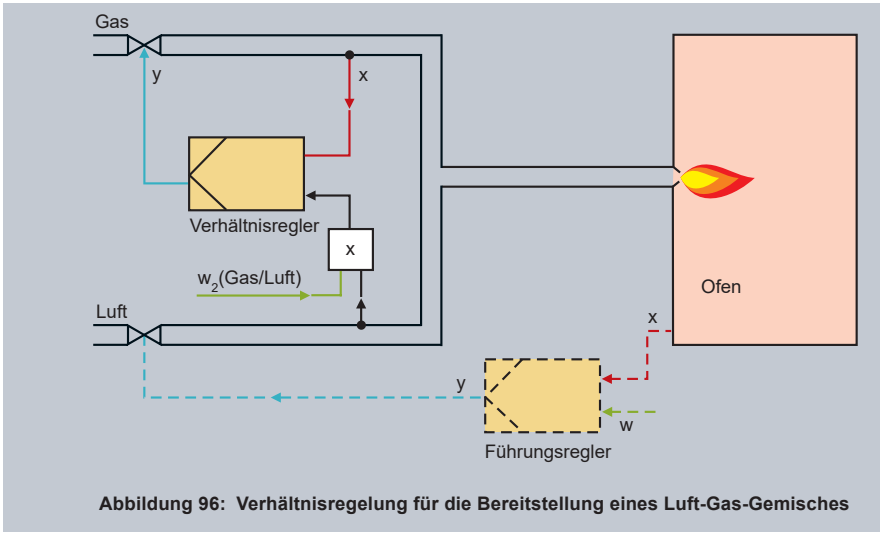


Abbildung 96: Verhältnisregelung für die Bereitstellung eines Luft-Gas-Gemisches

Im Beispiel wird der Luftstrom messtechnisch erfasst und mit einem Faktor multipliziert. Das Ergebnis ist die erforderliche Gasmenge, diese stellt den Sollwert für den Verhältnisregler dar. Der Verhältnisregler seinerseits regelt die Gasmenge auf den geforderten Sollwert. Dieses innere System verkörpert die Verhältnisregelung.

Der Führungsregler seinerseits regelt auf die geforderte Ofentemperatur. Er steuert den Luftstrom, durch die Verhältnisregelung wird das Gasvolumen auf das eingestellte Verhältnis geregelt.

Das dargestellte Gesamtsystem wird von innen nach außen optimiert. Der Führungsregler wird in den Handbetrieb geschaltet und es erfolgt die Optimierung des Verhältnisreglers. Danach wird auch der Führungsregler in den Automatikbetrieb gesetzt und optimiert.

7 Die Reglerfunktion und weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

JUMO-Regler regeln nicht nur, sondern sie können eine Vielzahl von Zusatzfunktionen übernehmen und dem Anwender dadurch viele Vorteile bieten. Dieses Kapitel verschafft einen Überblick hinsichtlich der Reglerfunktion und beschreibt ausgewählte Möglichkeiten.

7.1 Einrichtung der Reglerfunktion

Die Regelgeräte bieten im Konfigurationsprogramm und alternativ über die Gerätefront unterschiedliche Konfigurationsmenüs. Zur Einrichtung der Reglerfunktion werden die Menüs „Analogeingänge“, „Regler“ und „Ausgänge“ bearbeitet.

Im Menü „Analogeingänge“ wird der Eingang an den verwendeten Sensor angepasst (Widerstandsthermometer, Thermoelement, 4 bis 20 mA etc.).

Im Konfigurationsmenü „Regler“ werden die Reglerart (Zweipunktregler, Stetiger Regler etc.) sowie die Richtung des Wirksinns eingestellt (Abbildung 98). Im Untermenü „Reglereingänge“ des gleichen Menüs wird die Quelle für den Istwert definiert (Abbildung 97):

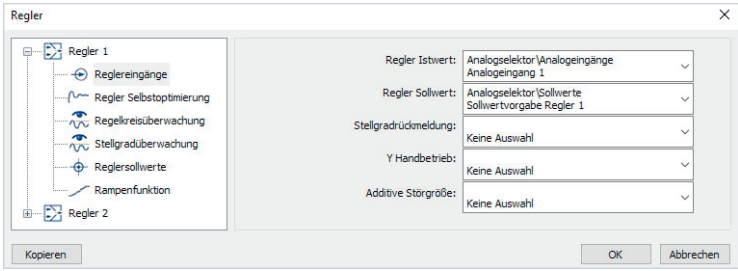


Abbildung 97: Quellen für Regler-Istwert und externen Sollwert

Die Sollwertvorgabe erfolgt in der Regel über die Gerätefront oder auch über eine Schnittstelle. Alternativ kann über ein analoges Signal (z. B. Analogeingang 2) die Sollwertvorgabe erfolgen (Abbildung 97).

Im Konfigurationsprogramm werden unter „Ausgänge“ der erste und ggf. der zweite Ausgang einem Analog- bzw. Binärausgang zugewiesen.

Im Konfigurationsmenü „Regler“ können weitere Einstellungen vorgenommen werden:

Abbildung 98: Einstellungen im Konfigurationsmenü „Regler“

Mit der Einstellung „Handbetrieb – Frei“ ist die Aktivierung des Handbetriebs möglich.

Der Regler übernimmt im Moment der Umschaltung in den Handbetrieb mit der Einstellung „Y bei Hand = Aktueller Wert“ den Stellgrad aus dem Automatikbetrieb.

Generell kann auch durch den Parameter „Y bei Hand“ ein beliebiger Stellgrad definiert werden, den der Regler bei der Umschaltung in den Handbetrieb annehmen soll.

Mit der Einstellung „Handbetrieb = Gesperrt“ ist keine Aktivierung des Handbetriebs möglich.

Die Einstellung in „Y bei Fehler“ definiert einen Stellgrad bei ungültigem Istwertsignal (Kabelbruch Widerstandsthermometer, Signal < 4 mA bei 4 bis 20 mA).

7.2 Rampenfunktion

JUMO-Regler arbeiten werkseitig als Festwertregler. Auf den jeweiligen Sollwert wird so lange geregelt, bis er durch den Anwender verändert wird. Die Sollwertänderung erfolgt sprungförmig. Diverse Prozesse benötigen jedoch eine rampenförmige Sollwerterhöhung. In JUMO-Reglern kann die Rampenfunktion aktiviert und eine Steilheit definiert werden. Nach einer neuen Sollwertvorgabe (Abbildung 99) verändert sich dann der aktuelle Sollwert mit der definierten Steilheit bis hin zum eingegebenen Sollwert.

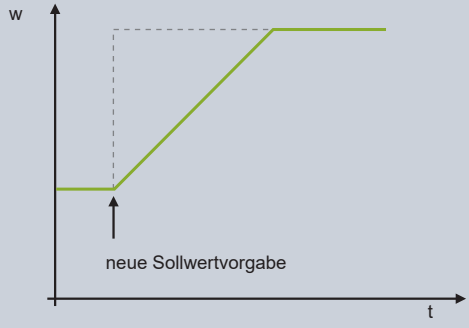


Abbildung 99: Rampenförmige Sollwertvorgabe

7.3 Programmgeberfunktion

Programmgeber ermöglichen die Vorgabe von Sollwertprofilen. Diese Profile werden dem Regler vorgegeben, welcher seinerseits den Istwert auf den aktuell vorgegebenen Wert ausregelt. Aus Programmgeber und Regler entsteht ein sogenannter Programmregler.

Ein Profil wird abschnittsweise definiert. Im Beispiel dauern Abschnitt 1 und 2 jeweils eine Stunde. Abschnitt 1 beginnt mit 25 °C, Abschnitt 2 mit 50 °C (Abbildung 100).

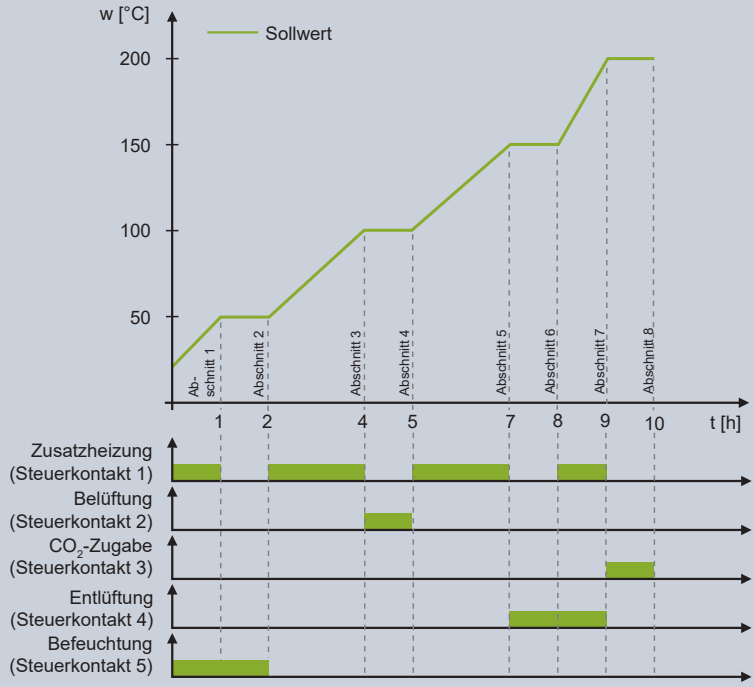


Abbildung 100: Programm eines Programmreglers

In vielen Fällen werden in den Abschnitten Kontakte gesteuert, beispielsweise für Zusatzheizungen oder Belüftungen. Die Definition erfolgt über sogenannte Steuerkontakte. Diese werden der jeweiligen Hardware (meist Relais) zugewiesen. Die Zustände der Steuerkontakte bilden gemeinsam mit dem Sollwertprofil ein Programm. Für einen Temperofen werden z. B. verschiedene Programme definiert. Nach der Bestückung des Ofens wird das jeweilige Programm ausgewählt und gestartet.

7.4 Grenzwertüberwachung

Die Funktion ermöglicht den Vergleich von zwei Prozessgrößen und die Grenzwertüberwachung einer Größe.

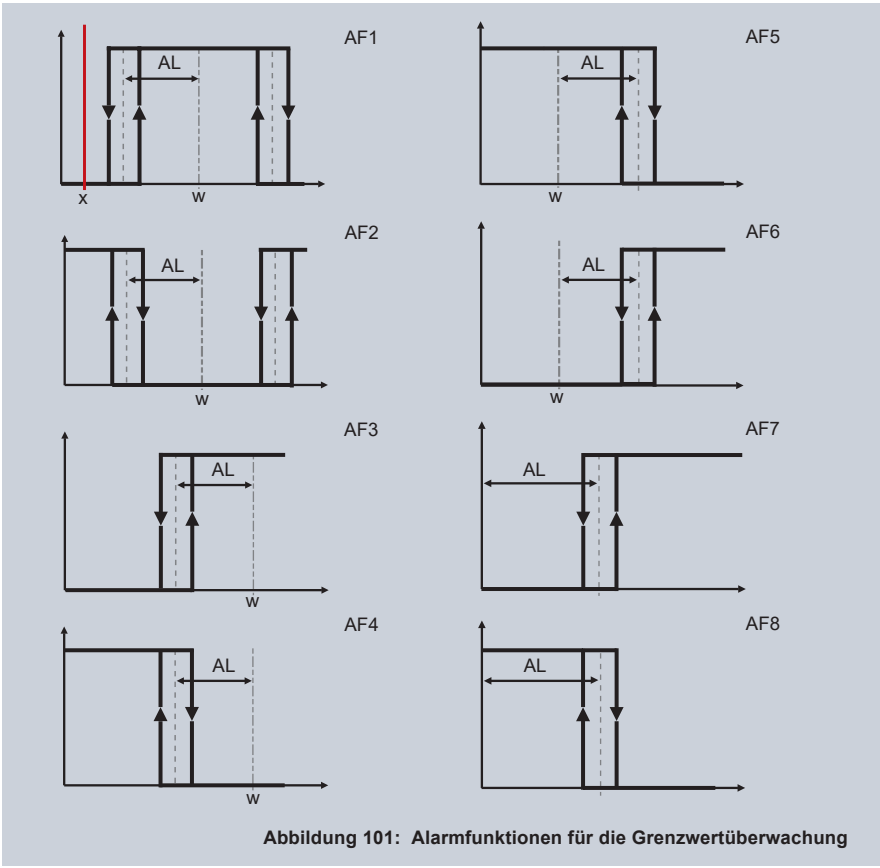


Abbildung 101: Alarmfunktionen für die Grenzwertüberwachung

In JUMO-Reglern können mehrere Grenzwertüberwachungen Anwendung finden. Für eine Grenzwertüberwachung kann wiederum eine von 8 Alarmfunktionen ausgewählt werden. Es existieren vier generell unterschiedliche Alarmfunktionen (AF1, AF3, AF5, AF7), weiterhin stellt die jeweils folgende Alarmfunktion die invertierte Funktion dar (AF2, AF4, AF6, AF8).

Die Alarmfunktionen 1 bis 6 überwachen jeweils 2 Größen im Verhältnis zueinander. Die beiden Variablen sind der Sollwert (w) und der Istwert (x) der Grenzwertüberwachung. Die Quellen für die beiden Signale können frei gewählt werden (beispielsweise Sollwert und Istwert des Reglers oder Analogeingang 1 und Analogeingang 2).

Beispielhaft definiert die Alarmfunktion 1 (AF1) ein Fenster um den Sollwert der Grenzwertüberwachung (w). Das Fenster wird definiert durch den Grenzwert (AL) und die Schaltdifferenz. Der Sollwert (w) steuert das Fenster in seiner Position. Der Istwert für die Grenzwertüberwachung befindet sich im gleichen Diagramm und bewegt sich in Richtung der x-Achse. Gelangt der Istwert in das Fenster um den Sollwert, wird der Ausgang der Grenzwertüberwachung aktiviert.

Beispielhaft werden für eine Überwachung der Regelabweichung auf < 10 folgende Einstellungen vorgenommen:

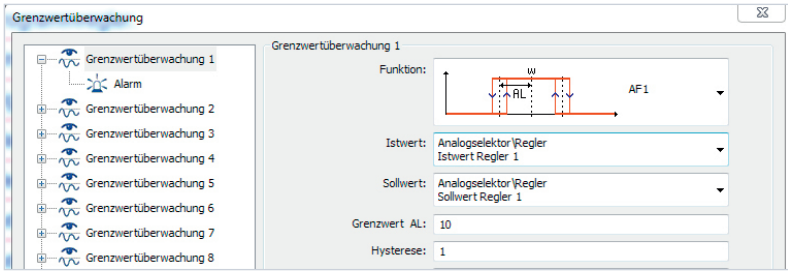


Abbildung 102: Einstellung für die Überwachung der Regelabweichung < 10 (Konfigurationsprogramm)

Im einfachsten Fall wird das Ergebnis der Grenzwertüberwachung über einen binären Ausgang ausgegeben.

AF2 bis AF8 erfüllen die folgenden Grundfunktionen:

AF2 ist die invertierte Funktion von AF1 (Abbildung 101).

AF3 bietet das halbe Fenster von AF1 – gelangt der steigende Istwert in die Nähe des Sollwertes, schaltet die Grenzwertüberwachung ein. Mit steigendem Istwert bleibt die Funktion aktiviert.

AF4 ist die invertierte Funktion von AF3.

AF5 bietet die rechte Hälfte des Fensters von AF1 – liegt der Istwert mindestens um den Wert AL über dem Sollwert, schaltet die Grenzwertüberwachung aus. Bei kleinerem Istwert ist die Funktion aktiviert.

AF6 ist die invertierte Funktion von AF5.

AF7 bietet die Überwachung des Istwertes hinsichtlich eines maximalen Wertes AL.

AF8 ist die invertierte Funktion von AF7.

7.5 Binärfunktionen

In JUMO-Reglern liegt eine Vielzahl binärer Signale vor, wie z. B. der Zustand von binären Eingängen oder das Ergebnis der Grenzwertüberwachung. Mit der Zustandsänderung des jeweiligen Binärsignals können Funktionen aktiviert werden. Mithilfe der beispielhaften Konfigurationsmaske können Funktionen für Binäreingang 1 eingerichtet werden:

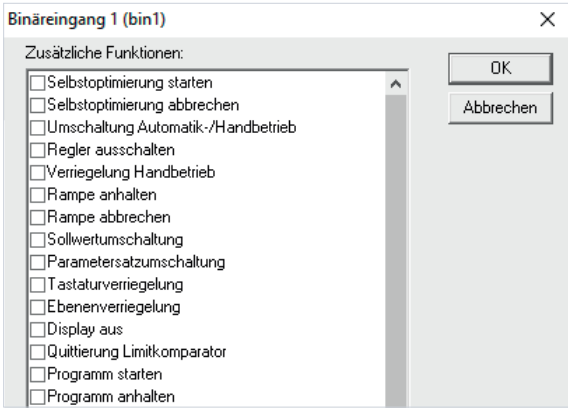


Abbildung 103: Binärfunktionen für Binäreingang 1 (Konfigurationsprogramm)

Die Auswahl **Selbstoptimierung starten** (flankengetriggert) ermöglicht im Beispiel den Start der Selbstoptimierung über Binäreingang 1. Mit **Selbstoptimierung abbrechen** (flankengetriggert) kann diese vorzeitig beendet werden.

Üblicherweise befindet sich der Regler im Automatikbetrieb und regelt auf den eingestellten Sollwert. Durch **Umschaltung Automatik-/Handbetrieb** erfolgt bei aktivem Binärsignal die Schaltung in den Handbetrieb. Für den Handbetrieb kann wiederum ein Stellgrad definiert werden, welcher direkt nach der Umschaltung angenommen wird.

Durch **Regler ausschalten** wird das Reglerausgangssignal bei aktivem Binärsignal deaktiviert.

Verriegelung Handbetrieb verhindert den Wechsel in den Handbetrieb.

Ist bei aktiver Rampenfunktion der definierte Sollwert noch nicht erreicht, kann der **Rampe**nsollwert **angehalten** werden. **Rampe abbrechen** ermöglicht auch bei aktivierter Rampenfunktion die sprungförmige Sollwertvorgabe.

Werkseitig arbeiten JUMO-Regler als Festwertregler. Die Regler regeln auf den sogenannten Sollwert 1. Bei Bedarf kann Sollwert 2 definiert werden und es kann durch **Sollwertumschaltung** zwischen Sollwert 1 und 2 gewechselt werden. Die meisten JUMO-Regler verfügen zudem über die Sollwerte 3 und 4. Zur Umschaltung zwischen den vier definierten Sollwerten muss **Sollwertumschaltung** beispielsweise für zwei Binäreingänge (B1 und B2) gewählt werden. Die Umschaltung erfolgt binärcodiert.

Die an den Prozess angepassten Regelparameter (X_P, T_n, T_v etc.) sind in einem Regelparametersatz abgelegt. JUMO-Regler verfügen über mehrere Parametersätze, wobei werkseitig

nur der erste Verwendung findet. Unter Umständen verändern sich die Bedingungen im Prozess so stark, dass mit den Parametern im Parametersatz 1 kein zufriedenstellendes Regelergebnis mehr erreicht wird. Dieser Betriebszustand erfordert dann eine andere Dimensionierung der Regelparameter. Parametersatz 2 enthält die gleiche Auswahl von Regelparametern wie Parametersatz 1, hier können die erforderlichen Parameter für den anderen Betriebspunkt eingestellt werden. Eine Umschaltung zwischen Parametersatz 1 und 2 erfolgt durch **Parametersatzumschaltung**.

Tastaturverriegelung sperrt die Tastatur, während ein Binärsignal aktiviert ist.

Ebenenverriegelung ermöglicht die Verriegelung der Ebenen für die Konfiguration und Parametrierung.

Display aus schaltet das Display dunkel bei sonst voller Funktion der Regelgeräte.

Verriegelung Programmstart verhindert den Start des Programms bei Konfiguration der Programmgeberfunktion.

Programm starten und **Programm abbrechen** (beide flankengetriggert) ermöglichen den Start und das Abbrechen.

Programm anhalten hält das Programm an, während das jeweilige Signal aktiv ist.

7.6 Startup und Diagnosefunktion

Die Regleroptimierung erfordert in vielen Fällen die Aufzeichnung wichtiger Prozessgrößen wie Istwert, Sollwert und Stellgrad.

Das Konfigurationsprogramm von JUMO-Reglern bietet hierfür die Softwarekomponente JUMO Startup. Diese kann frei wählbare Analog- und Binärsignale aufzeichnen. Für den Zeitraum der Aufzeichnung muss eine Verbindung zum JUMO-Regler bestehen.

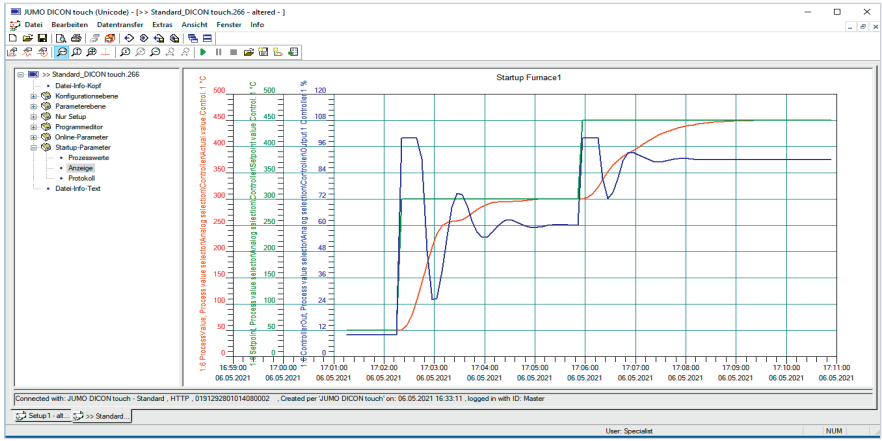


Abbildung 104: Mit JUMO Startup online aufgezeichnete Daten eines JUMO-Reglers

Das Ergebnis der Aufzeichnung kann ausgedruckt bzw. abgespeichert werden (auch in Tabellenform).

Die **Diagnosefunktion** zeigt den Zustand von Ein- und Ausgängen und gibt wichtige Informationen zum Status des Reglers. Die Funktion unterstützt bei der Fehlersuche und bei Wartungsarbeiten:

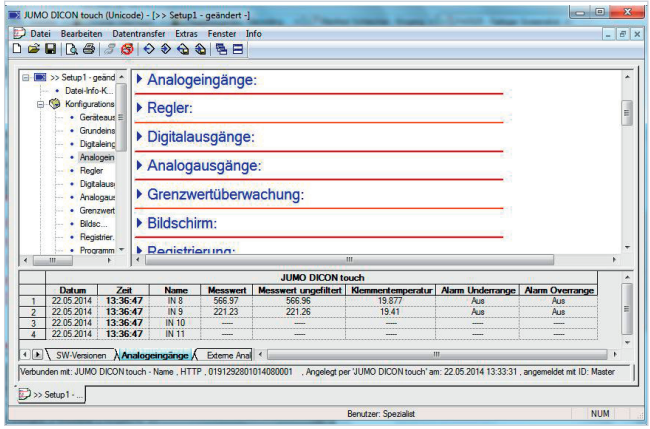


Abbildung 105: Diagnose im Fall eines JUMO DICON touch

7.7 Registrierung

Ausgewählte JUMO-Regler bieten die Aufzeichnung von Prozessgrößen im Gerät. Die Aufzeichnung erfolgt in Analog- und Binärkanälen, wobei die zu registrierenden Signale frei definierbar sind.

Die Daten werden mit einem einstellbaren Speicherzyklus in einem Ringspeicher abgelegt und können am Gerät in der sogenannten Historiefunktion eingesehen werden.

Die Daten können zeitgesteuert von der PC-Kommunikationssoftware JUMO PCC in eine Archivdatei übertragen werden. Durch diese Vorgehensweise wird eine kontinuierliche Datenaufzeichnung möglich. Die Auswertung der Daten erfolgt mit Hilfe der PC-Auswerte-Software JUMO PCA3000.

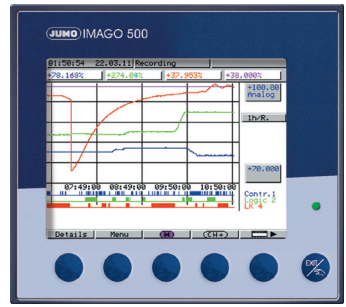


Abbildung 106: Registrierung im JUMO IMAGO 500

7.8 Mathematik- und Logikfunktion

Die Mathematik- und Logikfunktion ermöglicht mathematische Berechnungen und Boolsche Operationen. Die Eingabe von Formeln geschieht im Formeleditor.

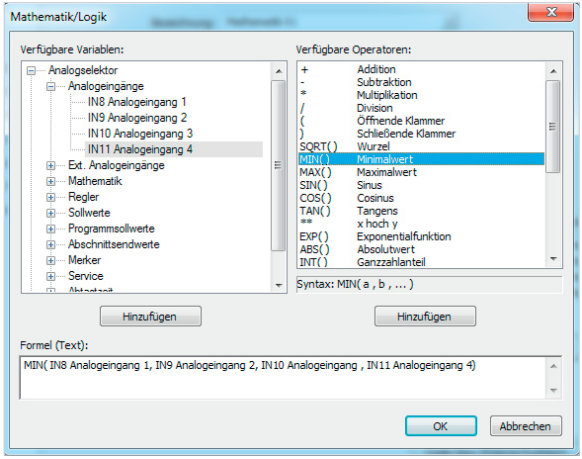


Abbildung 107: Formeleditor im JUMO DICON touch

Im Editor befinden sich auf der linken Seite die nutzbaren Variablen, auf der rechten Seite die zulässigen Operatoren inklusive einem Hinweis zur verwendenden Syntax.

Mithilfe der beiden Fenster wurde eine Formel zur Bestimmung des Minimalwertes der Analogeingänge 1 bis 4 definiert. Bei den 4 Prozessgrößen könnte es sich um 4 Temperaturen eines Ofens handeln und die Mathematikfunktion gibt den kleinsten der 4 Werte aus. Im Ofen soll sichergestellt werden, dass an allen Messstellen die Temperatur mindestens dem Sollwert entspricht. Das Ergebnis der Mathematikfunktion wird in einem weiteren Schritt im Regler als Quelle für den Istwert definiert.

8 Verwendete Abkürzungen

Reglerparameter

PID-Verhalten

X_{P1}	Proportionalbereich des P-Anteils; englisch: Pb
T_{n1}	Nachstellzeit des I-Anteils; englisch: rt
T_{v1}	Vorhaltezeit des D-Anteils; englisch: dt
X_{P2}	Proportionalbereich für Reglerstruktur 2 (Dreipunktregler)
T_{n2}	Nachstellzeit für Reglerstruktur 2 (Dreipunktregler)
T_{v2}	Vorhaltezeit für Reglerstruktur 2 (Dreipunktregler)

Allgemeine Parameter

Y1	Obere Stellgradbegrenzung des Reglerausgangssignals (Verwendung nicht bei Dreipunkt-Schrittregler)
Y2	Untere Stellgradbegrenzung des Reglerausgangssignals (Verwendung nicht bei Dreipunkt-Schrittregler)
Y0	Arbeitspunktkorrektur des P-Anteils

Parameter für Zweipunkt-, Dreipunkt-, Dreipunkt-Schritt- und Stellungsregler

C_{y1}	Schaltperiodendauer (wirksam bei Zwei- und Dreipunktregler, $X_{P1} > 0$)
C_{y2}	Schaltperiodendauer für Reglerstruktur 2 (wirksam bei Dreipunktregler, $X_{P2} > 0$)
T_{k1}	minimale Einschaltdauer (wirksam bei Zwei- und Dreipunktregler, $X_{P1} > 0$)
T_{k2}	minimale Einschaltdauer für Reglerstruktur 2 (wirksam bei Dreipunktregler, $X_{P2} > 0$)
X_{Sd1}	Schaltdifferenz (wirksam bei Zwei- und Dreipunktregler, $X_{P1} = 0$)
X_{Sd2}	Schaltdifferenz für Reglerstruktur 2 (wirksam bei Dreipunktregler, $X_{P2} = 0$)
X_{Sh}	Kontaktabstand; englisch: db Der Kontaktabstand liegt symmetrisch um den Sollwert. Bei Dreipunktreglern liegen die beiden Proportionalbereiche um diesen getrennt voneinander, bei Dreipunkt-Schritt- und Stellungsreglern erfolgt im Bereich des Kontaktabstandes keine Ansteuerung des Motorstellgliedes.

TT	Laufzeit des Motorstellgliedes, Einstellung bei Dreipunkt-Schritt- und Stellungsreglern

Weitere Formelzeichen

e	Regelabweichung (Sollwert – Istwert)
K_{IS}	Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich
K_P	Proportionalbeiwert des Reglers
K_S	Übertragungsbeiwert oder Verstärkung der Regelstrecke mit Ausgleich
T_1, T_2	1. und 2. Zeitkonstante einer Strecke 2. Ordnung
T_a	Ausregelzeit, nach dieser Zeit gelangt in einem Regelkreis der Istwert dauerhaft in ein definiertes Band um den Sollwert
T_{an}	Anregelzeit, nach dieser Zeit erreicht in einem Regelkreis der Istwert das erste Mal den Sollwert
T_g	Ausgleichszeit einer Regelstrecke
T_I	Integrierzeit eines I-Reglers
T_K	Schwingungsdauer des Istwertes bei X_{Pk} (Optimierungsverfahren nach Ziegler/Nichols)
T_S	Zeitkonstante der Strecke 1. Ordnung
T_t	Totzeit einer Regelstrecke
T_u	Verzugszeit einer Regelstrecke
V_{max}	Maximale Anstiegsgeschwindigkeit (Optimierungsverfahren nach der Anstiegsgeschwindigkeit)
w	Sollwert, Führungsgröße
x	Istwert, Regelgröße
X_{max}	Überschwingweite
X_{Pk}	Kritisches X_P, bei dem die Regelgröße dauerhaft schwingt (Optimierungsverfahren nach Ziegler/Nichols)
y	Stellgrad, Stellgröße
y_H	Stellbereich eines Reglers, meist 100 %
y_R	Stellgrad eines Reglers
z	Störgröße

Weitere Fachliteratur von JUMO

Elektronische Druckmesstechnik
Technisches Know-how
für den Anwender
Marcell Bräutigam

FAS 606
Artikel-Nr.: 00690171
ISBN: 978-3-935742-19-1
kostenfrei

Messunsicherheit einer Temperaturmesskette
mit Beispielrechnungen
Gerd Scheller, Stefan Krummeck

FAS 625
Artikel-Nr.: 00413510
ISBN: 978-3-935742-12-2
kostenfrei

Regelungstechnik
Grundlagen und Tipps
für den Praktiker
Manfred Schleicher

FAS 525
Artikel-Nr.: 00314836
ISBN: 978-3-935742-00-9
kostenfrei

Aktoren für die elektrische Beheizung
Thyristorleistungsschalter,
Thyristorleistungssteller
und elektronischer Transformator
Manfred Schleicher

FAS 620
Artikel-Nr.: 00398728
ISBN: 978-3-935742-04-7
kostenfrei

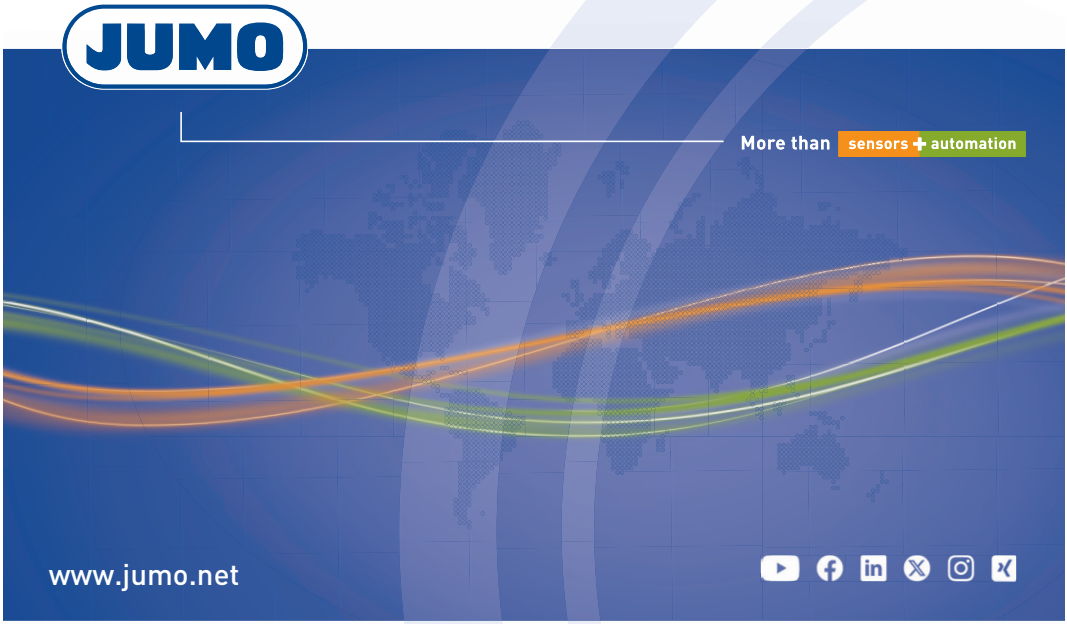
Explosionsschutz in Europa
Elektrische Betriebsmittel
Grundlagen, Richtlinien, Normen
Dieter Herrmann

FAS 547
Artikel-Nr.: 00324966
ISBN: 978-3-935742-08-5
kostenfrei

Funktionale Sicherheit
Safety Integrity Level
Dr. Thomas Reus
Matthias Garbsch

FAS 630
Artikel-Nr.: 00463374
kostenfrei

Unter www.jumo.net kann ein Download der Fachliteratur erfolgen bzw. eine Bestellung der Lektüre als Printmedium.



ISBN: 978-3-935742-00-9