

Regelungstechnik

Grundlagen und Tipps für den Praktiker



Regelungstechnik

Grundlagen und Tipps für den Praktiker

Manfred Schleicher

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. Die vorliegende Broschüre konzentriert sich deshalb sehr stark auf praxisrelevante Aspekte der Regelungstechnik.

Sie will kein wissenschaftliches Lehrwerk sein, sondern zeigt anwenderbezogen und bewusst befreit von unnötigem theoretischen Beiwerk, wie Regelstrecken definiert, Regelparameter ermittelt und Regler optimiert werden können. Die Broschüre 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 der Broschüre. 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.

Die Broschüre „Regelungstechnik – Grundlagen und Tipps für den Praktiker“ erfreut sich seit Jahren großer Beliebtheit bei Anwendern aus den verschiedensten Branchen und bei Studenten dieses Fachgebiets. Die aktuelle Neuauflage wurde grundlegend überarbeitet und ergänzt und bietet so einen umfassenden Einblick in die komplette Thematik.

JUMO-Seminare zur Mess- und Regeltechnik

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

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

Fulda, im Oktober 2014

Manfred Schleicher

Bemerkung

Diese Broschüre 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.



JUMO GmbH & Co. KG

Moritz-Juchheim-Straße 1

36039 Fulda, Germany

Telefon: +49 661 6003-396

Telefax: +49 661 6003-500

E-Mail: manfred.schleicher@jumo.net

Internet: www.jumo.net

Nachdruck mit Quellennachweis gestattet!

Teilenummer: 00314836

Buchnummer: FAS 525

Druckdatum: 2014-10

ISBN: 978-3-935742-00-9

1	Grundbegriffe und Übersicht	7
1.1	Der geschlossene Regelkreis	7
1.2	Steuern – Der Handbetrieb	8
1.3	Das Regelverhalten	9
1.4	Erfassung des Istwertes	10
1.4.1	Die Abtastzeit	10
1.4.2	Universaleingänge von JUMO-Kompaktreglern	10
1.4.3	Eingänge für elektrochemische Größen	13
1.5	Ausgangsarten von JUMO-Kompaktreglern	14
1.5.1	Stetiger Ausgang	14
1.5.2	Binäre Ausgangsarten	15
1.6	Überblick Reglerarten	17
2	Die Regelstrecke	19
2.1	Allgemeines zur Regelstrecke	19
2.2	Strecken mit und ohne Ausgleich	20
2.2.1	Strecken mit Ausgleich	20
2.2.2	Strecken ohne Ausgleich	21
2.3	Strecken(anteile) mit Proportionalverhalten, Totzeit und Verzögerung	23
2.3.1	Strecken mit Proportionalverhalten	23
2.3.2	Strecken mit Totzeit	24
2.3.3	Strecken mit Verzögerung	26
2.4	Aufnahme der Sprungantwort für Strecken mit mindestens zwei Verzögerungen und Totzeit	29
3	Regleranteile PID und die Regelparameter	31
3.1	P-Regler	31
3.1.1	Der Proportionalbereich	32
3.2	I-Regler	37
3.3	PI-Regler	40
3.4	PD-Regler	43
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

Inhalt

4	Optimierung von Reglern/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	55
4.3.4	Empirische Methode zur Ermittlung der Regelparameter	56
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	Kontrolle der Reglereinstellung für PID-Struktur	63
4.6	Auswahlhilfe hinsichtlich der Reglerstruktur für unterschiedliche Regelgrößen	65
5	Regler mit Binärausgängen	67
5.1	Zweipunktregler	67
5.1.1	Zweipunktregler mit Impulslängenausgang	67
5.1.2	Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang	69
5.1.3	Minimale Einschaltdauer bei Zweipunktregler mit Impulslängenausgang bzw. Impulsfrequenzausgang	69
5.1.4	Sonderfall unstetiger Zweipunktregler	70
5.2	Dreipunktregler	73
5.2.1	Kontaktabstand	74
5.3	Regler zur Ansteuerung von Motorstellgliedern	76
5.3.1	Stellungsregler	77
5.3.2	Dreipunktschrittregler	78
5.3.3	Weitere Informationen zum Stellungs- und Dreipunktschrittregler	80
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	87
6.6	Kaskadenregelung	89
6.7	Verhältnisregelung	92

7	Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern	93
7.1	Weitere Einstellungen eines JUMO-Reglers hinsichtlich der Reglerfunktion	93
7.2	Rampenfunktion	95
7.3	Programmgeberfunktion	96
7.4	Grenzwertüberwachung	97
7.5	Binärfunktionen	99
7.6	Startup und Diagnosefunktion	101
7.7	Registrierung	103
7.8	Mathematik- und Logikfunktion	104
7.9	Schnittstellen	105
	Verwendete Abkürzungen	111

Inhalt

1 Grundbegriffe und Übersicht

1.1 Der geschlossene Regelkreis

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

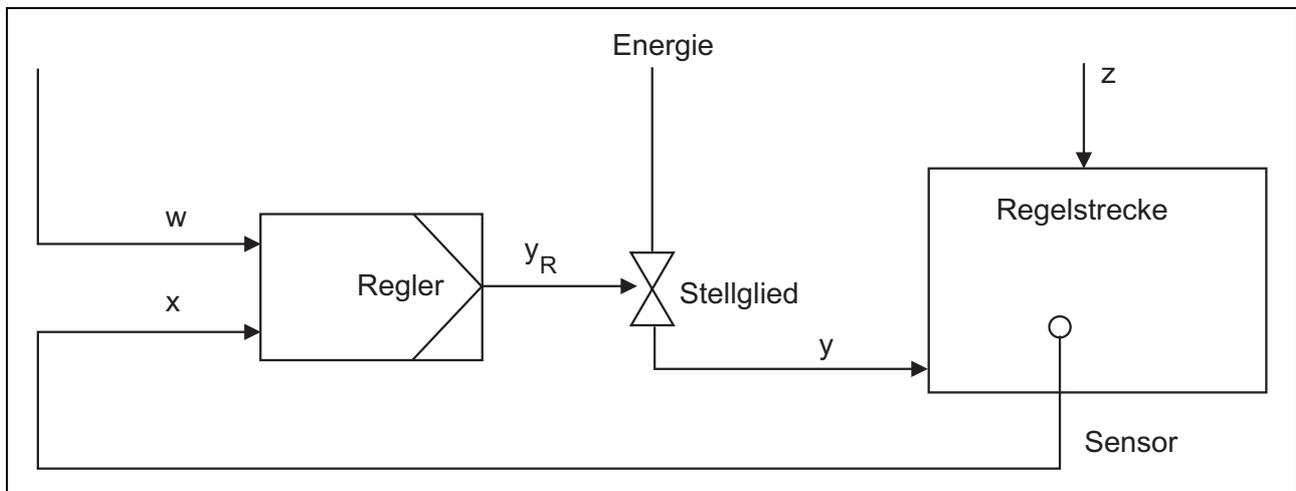


Abbildung 1: Der geschlossene Regelkreis

Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der Anlagenteil, in welchem die **Regelgröße (x)** konstant gehalten wird. Als Beispiel dient ein Gas betriebener 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 bis 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)**. Der Unterschied 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 „Die Regelstrecke“.

1 Grundbegriffe und Übersicht

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 so genannten Automatikbetrieb regelt der Regler in der beschriebenen Weise den Istwert auf den Sollwert. Moderne Kompaktregler ermöglichen zusätzlich die manuelle Ansteuerung des Stellgliedes: Im so genannten Handbetrieb wird manuell ein definierter Reglerstellgrad vorgegeben. Aus dem Reglerstellgrad ergibt sich eine durch das Stellglied bereitgestellte Leistung und letztlich anlagenbedingt ein 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 auf die jeweilige Regelstrecke angepasst. Dies geschieht über die Dimensionierung der Regelparameter X_p (Proportionalbereich), T_n (Nachstellzeit) und T_v (Vorhaltezeit).

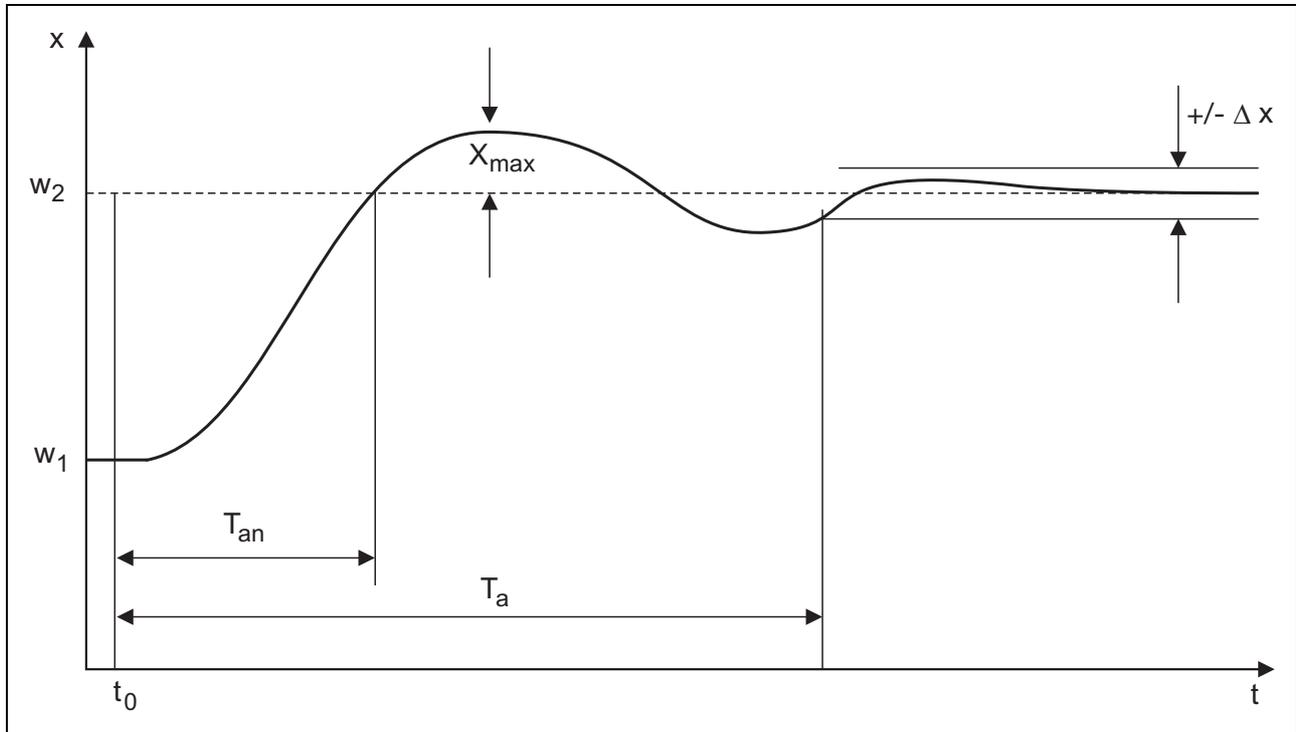


Abbildung 3: Kriterien für die Regelgüte

Abbildung 3 zeigt das mögliche Regelverhalten nach einer sprunghaftem 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 ($\pm \Delta x$), 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 Grundbegriffe und Übersicht

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 so genannten **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. Abbildung 4 zeigt die Übertragung eines Druckmesswertes über ein Signal 4 bis 20 mA:

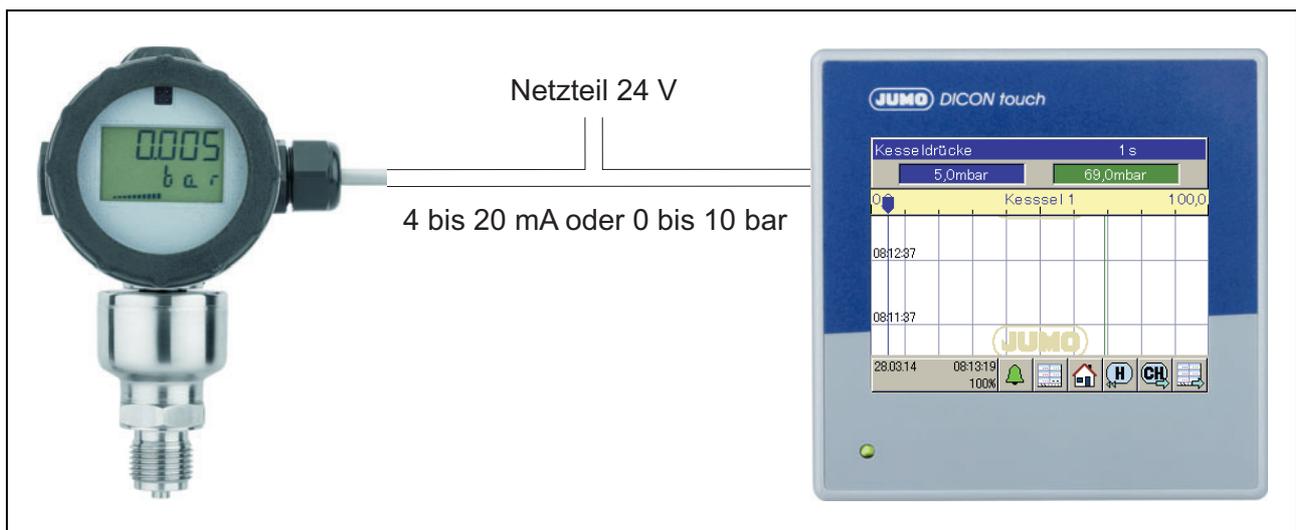


Abbildung 4: Beispielhafte Signalübertragung über Einheitssignal 4 bis 20 mA

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.

1 Grundbegriffe und Übersicht

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

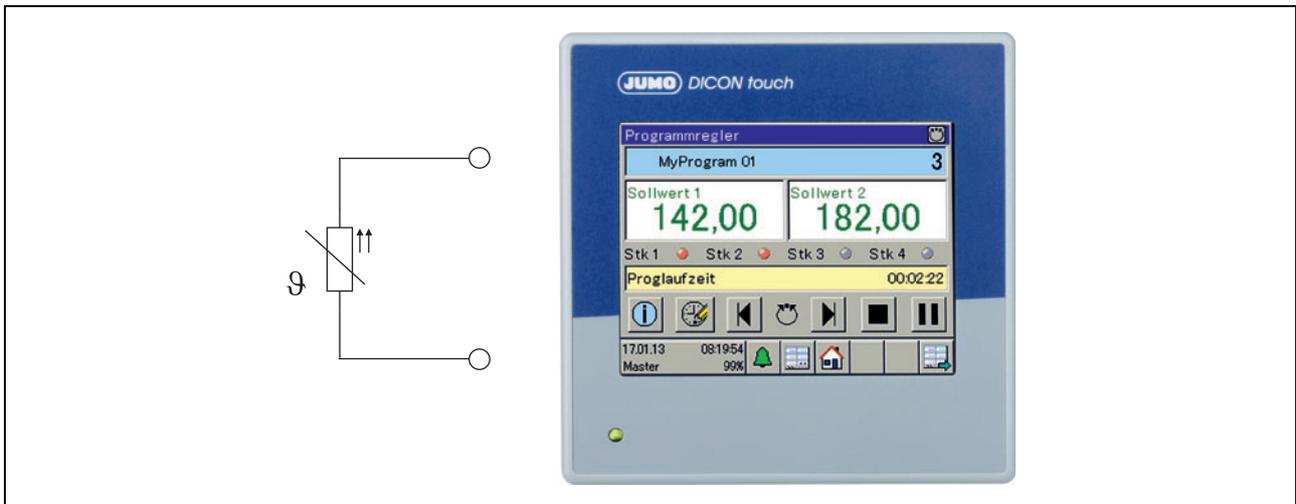


Abbildung 5: Widerstandsthermometer am Kompaktregler Typ JUMO DICON touch

Der universelle Eingang des Reglers ist auf Widerstandsthermometer (Zweileiteranschluss) einzustellen und die jeweilige Linearisierung (Pt100, Pt1000 etc.) anzugeben. Mit Hilfe 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.

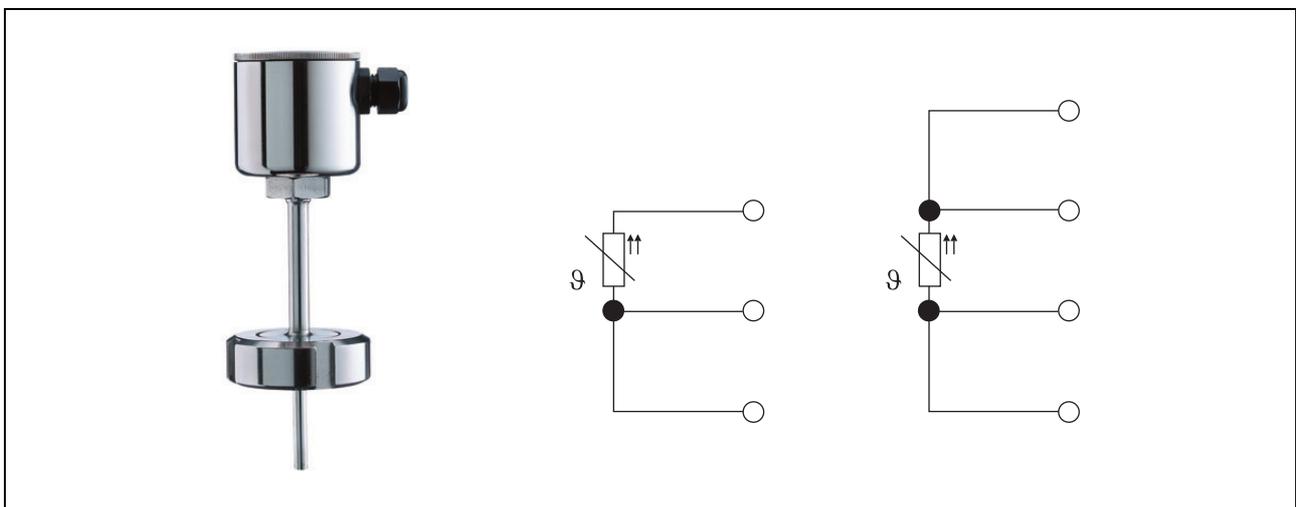


Abbildung 6: Widerstandsthermometer für die Lebensmittelindustrie und schematische Darstellung der Drei- und Vierleiteranschlusstechnik

1 Grundbegriffe und Übersicht

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:

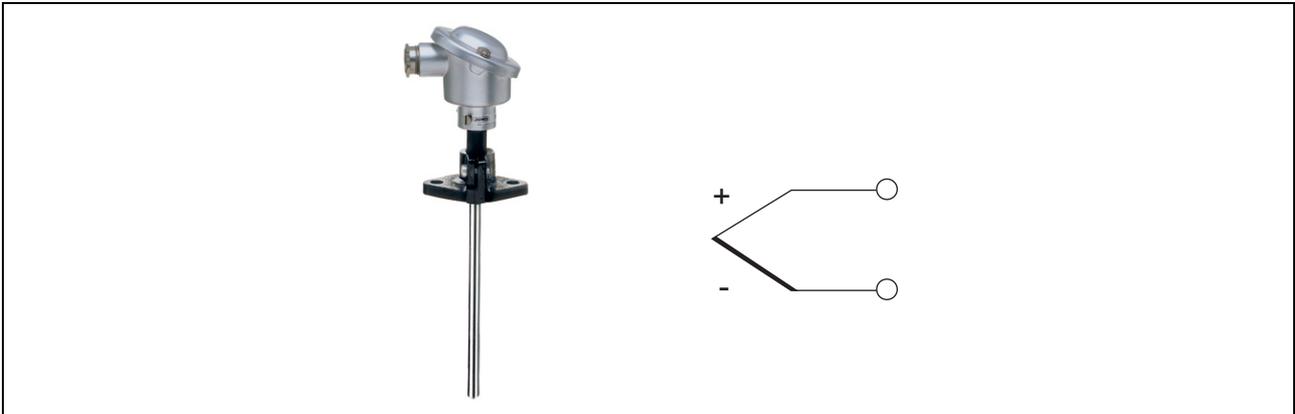


Abbildung 7: Einsteck-Thermoelement und schematische Darstellung Thermoelement

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 mit Hilfe der Linearisierung die vorliegende Temperatur am Thermoelement.

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

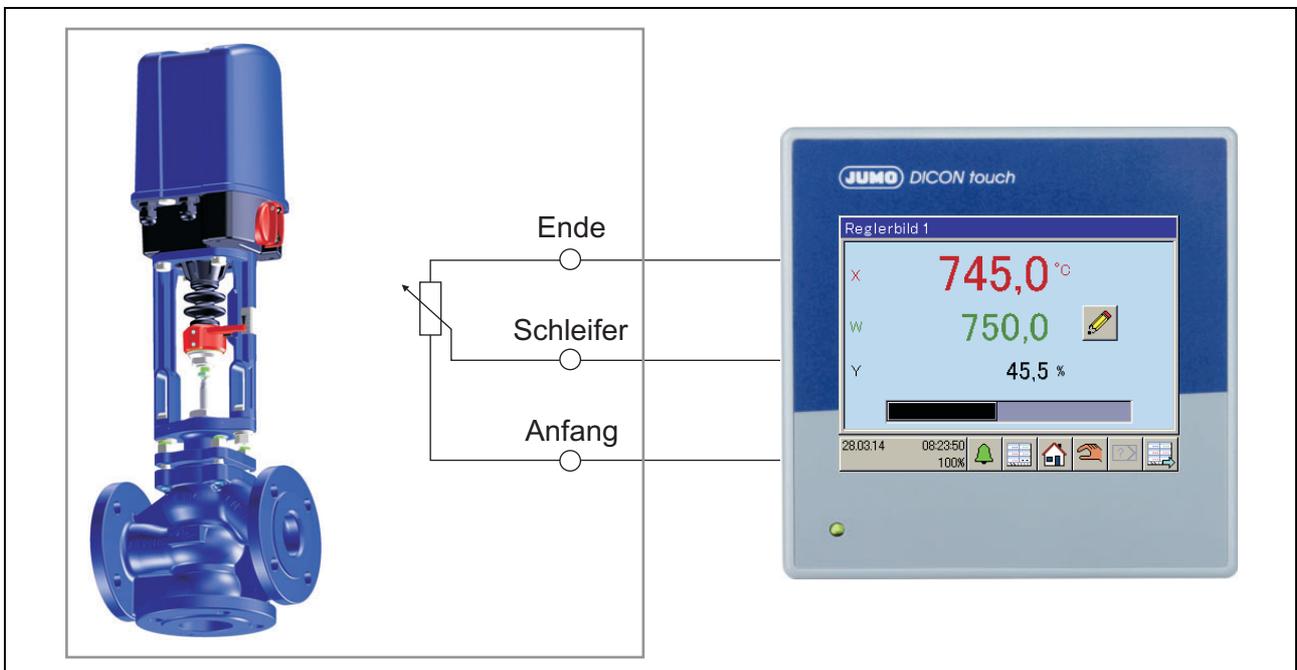


Abbildung 8: Stellantrieb der Firma ARI Armaturen mit Anschluss der Stellgradrückmeldung an den Kompaktregler JUMO DICON touch

1 Grundbegriffe und Übersicht

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

1.4.3 Eingänge für elektrochemische Größen

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



Abbildung 9: Sensoren für pH-Wert, Redoxpotenzial und elektrolytische Leitfähigkeit (konduktiv und induktiv)

1 Grundbegriffe und Übersicht

1.5 Ausgangsarten von JUMO-Kompaktreglern

Je nach vorliegender Regelstrecke, erforderlicher Regelgüte und Verfügbarkeit erfolgt die Auswahl des geeigneten Stellgliedes. Das Stellglied wiederum erfordert 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 des Reglerstellgrades. Beispiele sind:

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

Die Ansteuerung der Stellglieder geschieht über Einheitssignale (Kapitel 1.4.2 „*Universaleingänge von JUMO-Kompaktreglern*“) durch einen stetigen Ausgang.

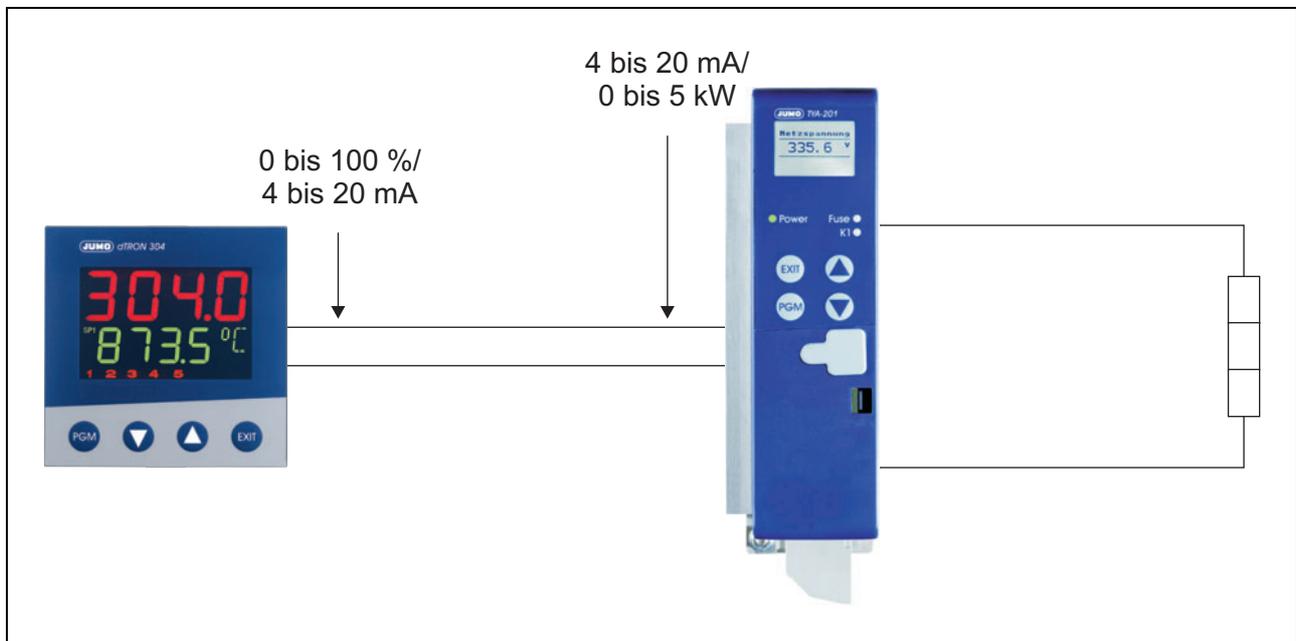


Abbildung 10: Kompaktregler JUMO dTRON 304, Thyristor-Leistungssteller JUMO TYA 201 und Heizelement

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

1 Grundbegriffe und Übersicht

1.5.2 Binäre Ausgangsarten

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 Relaisausgang. Angeboten wird er als Schließer- oder Wechselkontakt. Der mechanische Ausgang kommt zur Ansteuerung mit geringer Schalthäufigkeit zum Einsatz (Leistungsschütze, Magnetventile etc).

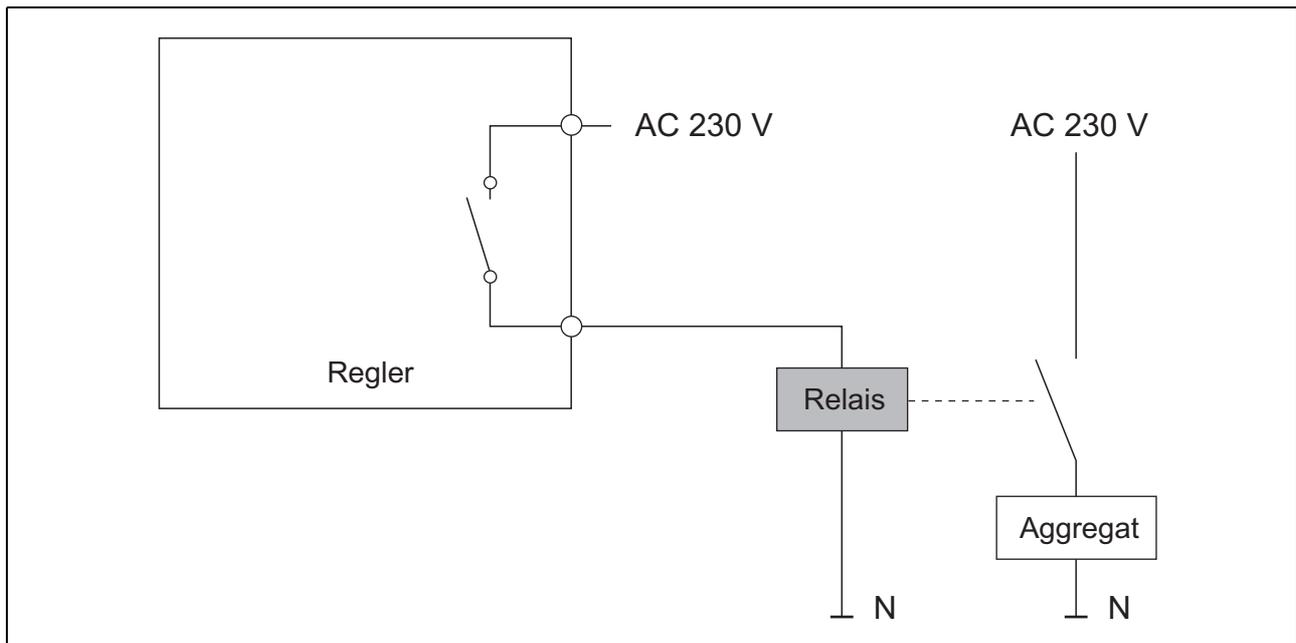


Abbildung 11: Schließerkontakt für die Ansteuerung eines Relais

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:

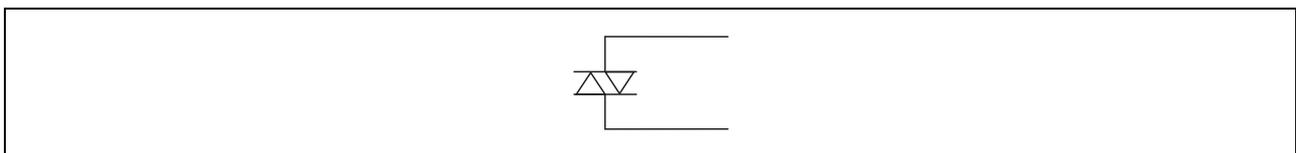


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Halbleiterrelais bzw. Triacs

Das Element besteht aus zwei antiparallel geschalteten Thyristoren und schaltet Wechselspannung quasi verschleißfrei.

1 Grundbegriffe und Übersicht

Digitalausgänge (beispielsweise 0 bis 12 V) finden bei der Ansteuerung von Stellgliedern mit einer Gleichspannung und geringem Strombedarf Verwendung. Typische Anwendungsfälle sind die Ansteuerung von Thyristorleistungsschaltern für die Versorgung von Heizelementen mit elektrischer Energie:

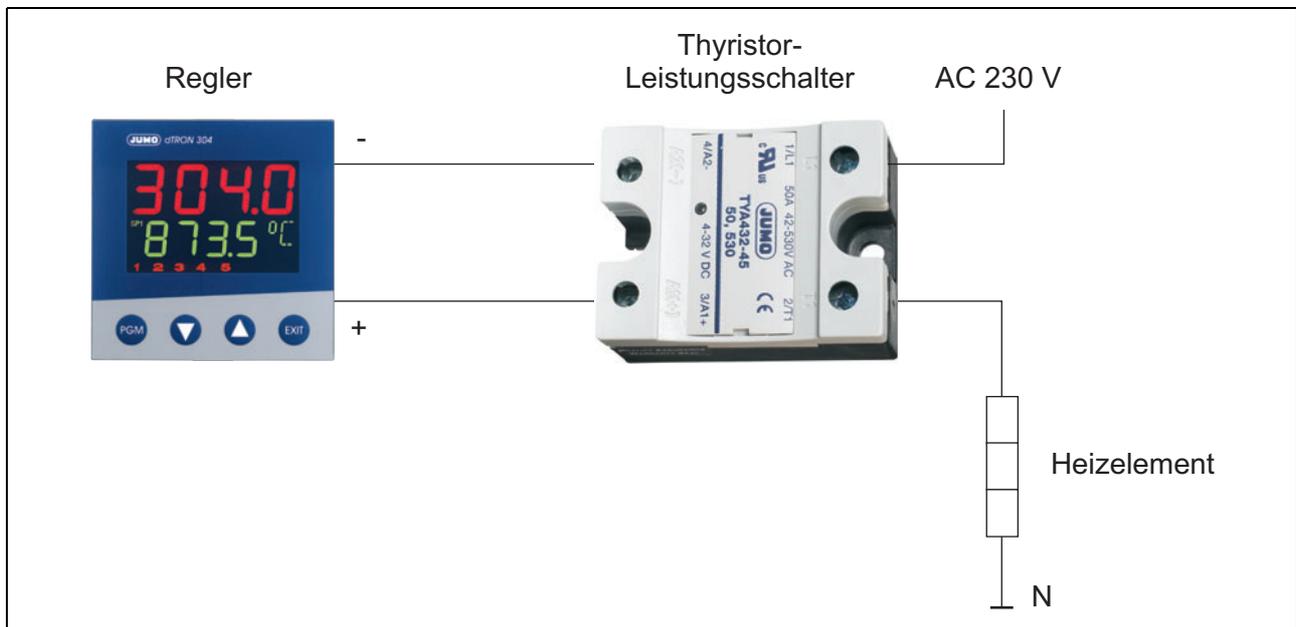


Abbildung 13: Ansteuerung eines Thyristor-Leistungsschalters über den Logikausgang eines Reglers

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 Schalzhäufigkeit kommen so genannte PhotoMOS-Relais zum Einsatz:

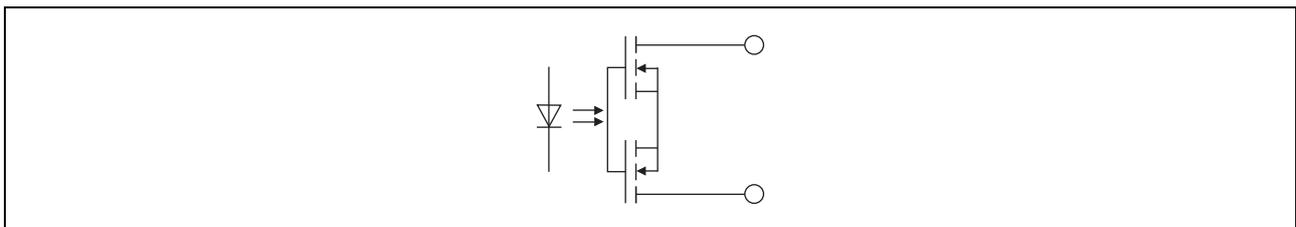


Abbildung 14: Symbolische Darstellung eines PhotoMOS-Relais

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

1 Grundbegriffe und Übersicht

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).

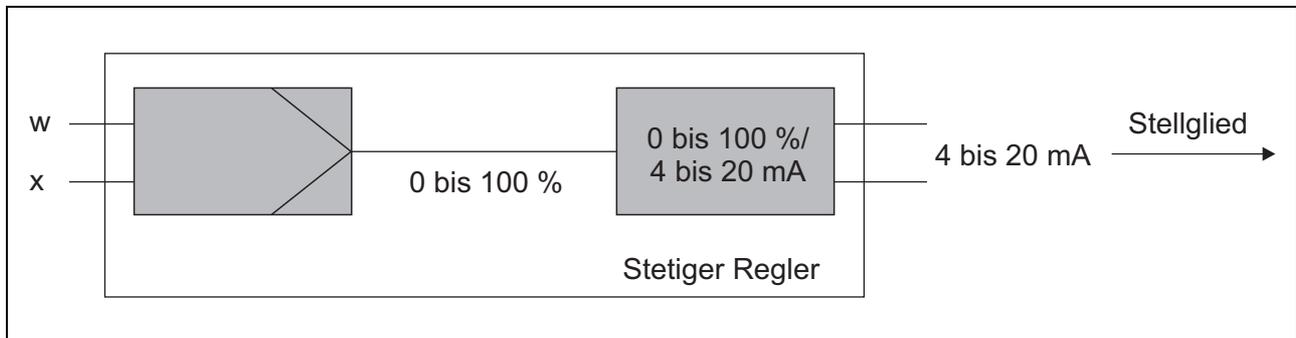


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines stetigen Reglers

Zweipunktregler verfügen über einen binären Ausgang zur Ansteuerung des Stellgliedes. Neben einem Relaisausgang sind die in Kapitel 1.5.2 „Binäre Ausgangsarten“ beschriebenen Binärausgänge möglich. Als PID-Regler variiert der Regler proportional zum ermittelten Stellgrad die Einschaltdauer des Binärausgangs.

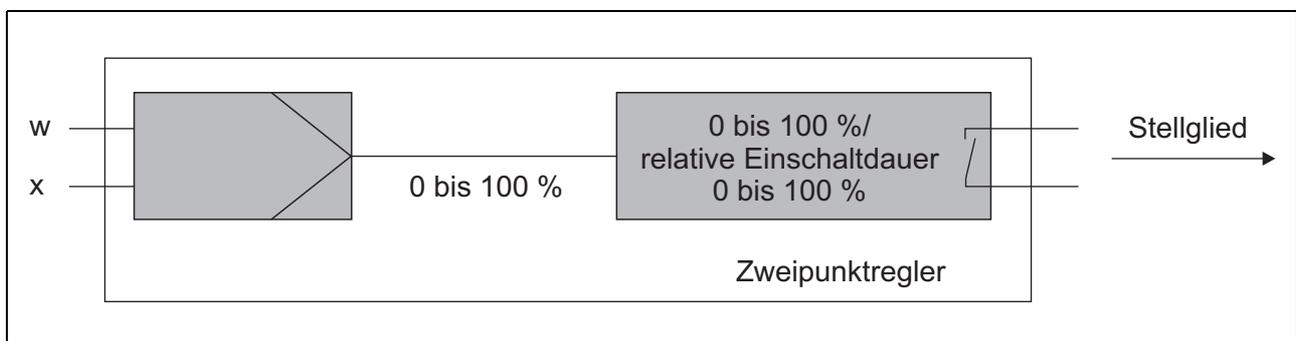


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Zweipunktreglers

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

1 Grundbegriffe und Übersicht

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. Der Regler berechnet einen Stellgrad im Bereich von -100 bis +100 %. Bei positivem Stellgrad wird proportional zu diesem die relative Einschaltdauer für das Stellglied 1 erhöht. Arbeitet der Regler mit einem negativen Stellgrad, wird entsprechend die relative Einschaltdauer von Stellglied 2 erhöht:

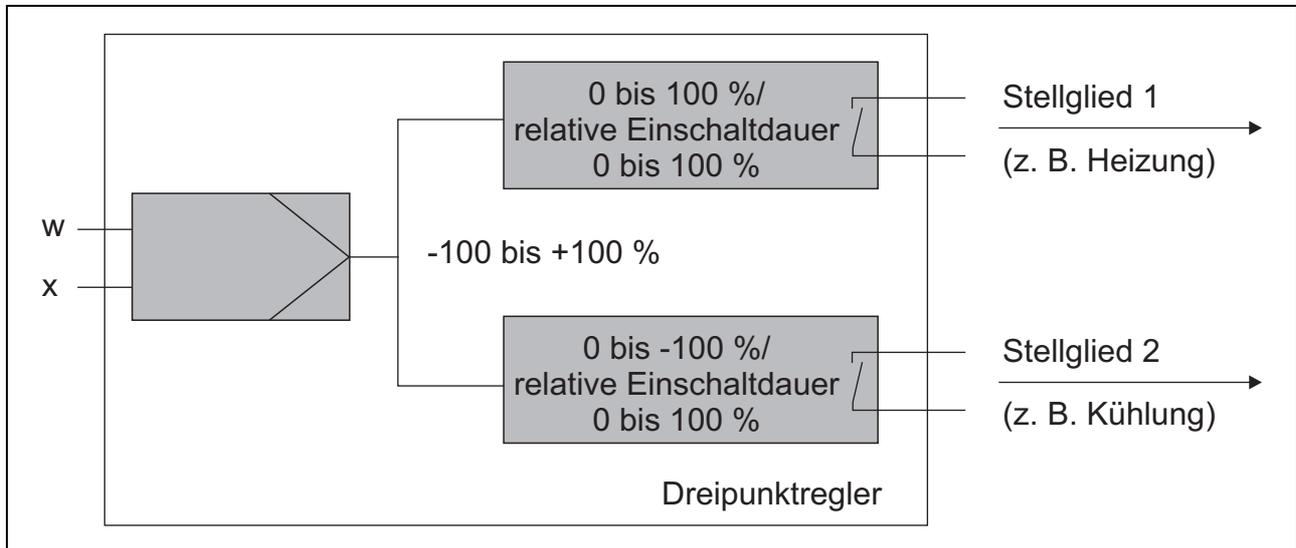


Abbildung 17: Schematische Darstellung eines Dreipunktreglers

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

Anstelle der Stellgradausgabe mit Binärausgängen kann diese auch mit stetigen Ausgängen erfolgen.

Dreipunktschritt- und **Stellungsregler** sind für die Ansteuerung von Motorstellgliedern geeignet. Zwei Ausgänge der Regler steuern entsprechend über den Stellmotor ein Stellglied auf und zu. Der Stellungsregler benötigt eine Rückmeldung über die Position des Stellgliedes. Der Dreipunktschrittregler kommt ohne diese Stellgradrückmeldung aus.

2.1 Allgemeines zur Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der Anlagenteil, in dem die Regelgröße auf einen 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 Gas betriebenen Ofen:

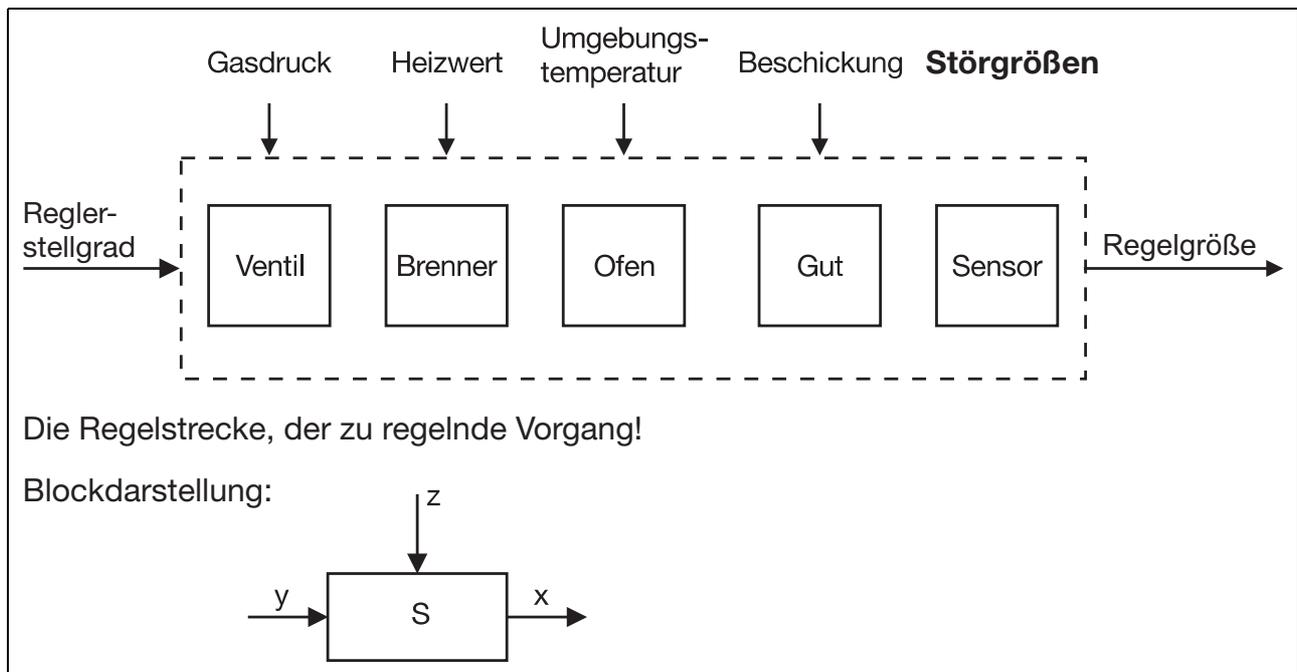


Abbildung 18: Beispiel für eine Regelstrecke

Der Reglerstellgrad ist am Ventil aufgeschaltet. Geregelt werden soll die Temperatur im Ofengut. 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 Die Regelstrecke

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 Verhalten zwischen dem vorgegebenen Stellgrad und dem sich einstellenden Istwert. Abbildung 19 zeigt den Istwertverlauf für eine Strecke mit Ausgleich nach sprungförmigen Stellgraderhöhungen:

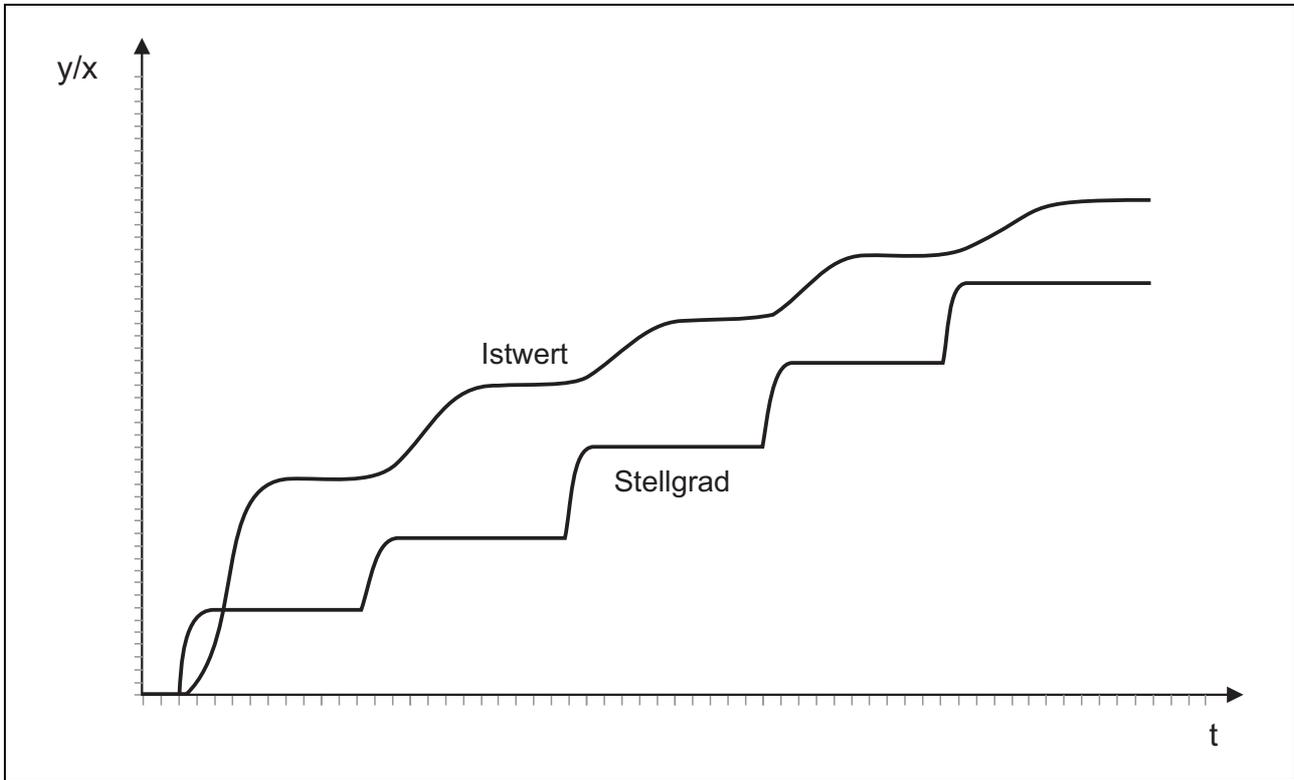


Abbildung 19: Istwertverlauf für eine nichtlineare Regelstrecke mit Ausgleich bei stufenweiser Erhöhung des Stellgrades

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

Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke beschreibt das Verhältnis aus Istwertänderung/ 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 konstanten Veränderung des Istwertes. Die Steilheit des Istwertes ist neben den Streckeneigenschaften proportional zum vorgegebenen Stellgrad.

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

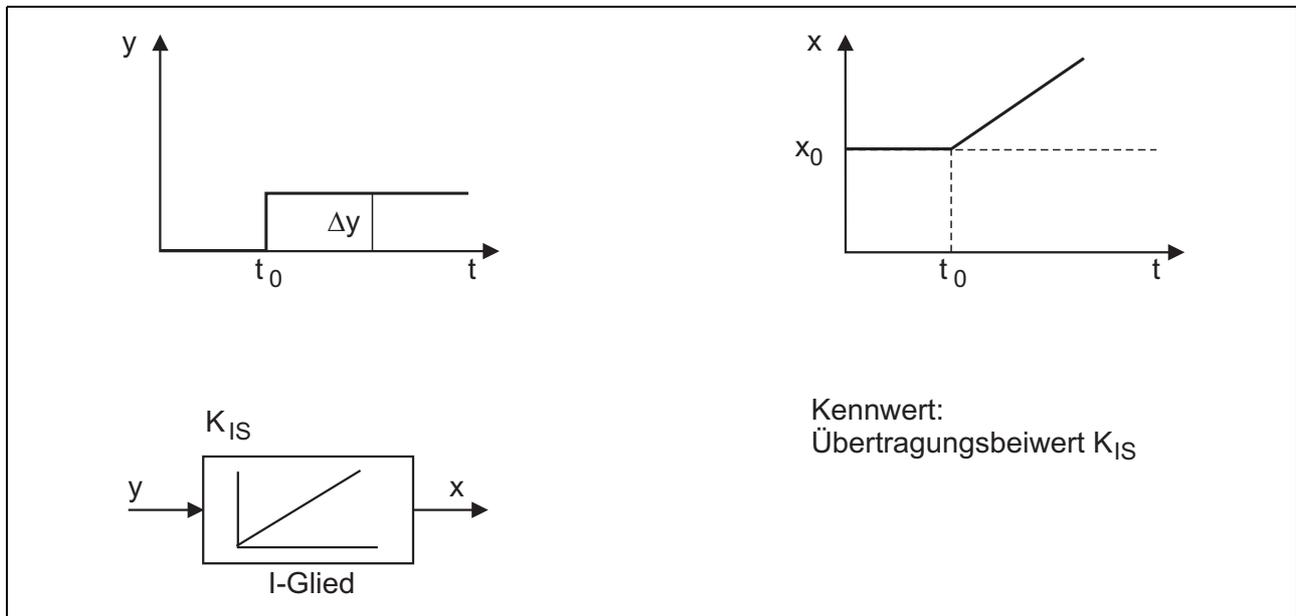


Abbildung 20: Sprungantwort einer Strecke ohne Ausgleich und Blocksymbol

Ist 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:

$$\Delta x = K_{IS} \cdot \Delta y \cdot t \quad (1)$$

K_{IS} Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich

Für einen nicht konstanten Stellgrad gilt:

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

Beispiele für Strecken ohne Ausgleich sind:

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

2 Die Regelstrecke

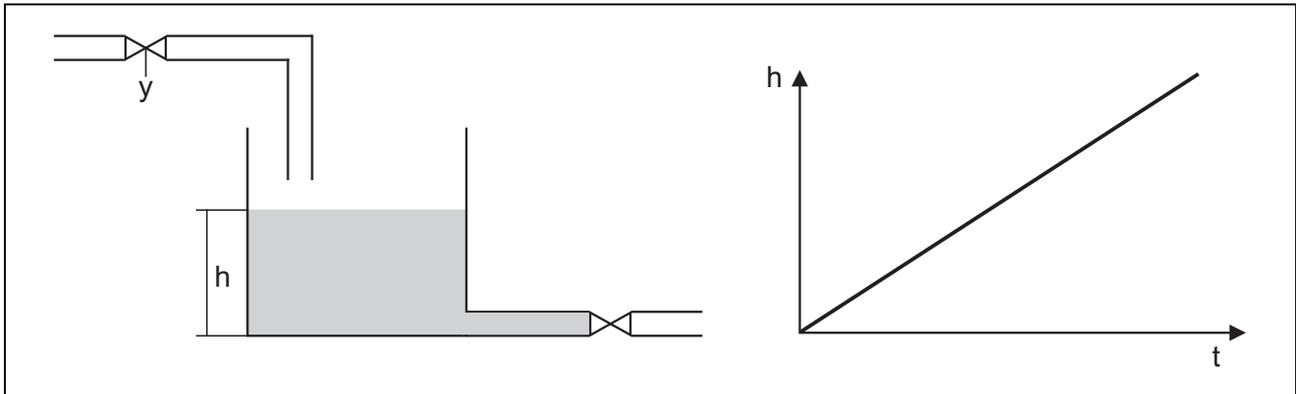


Abbildung 21: Niveauregelstrecke

Abbildung 21 zeigt das klassische Beispiel für eine Strecke ohne Ausgleich: In einem Flüssigkeitsbehälter erfolgt über ein Zulaufventil eine Niveauregelung. Der Behälter verfügt weiterhin 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 auch mit einer Störgrößenänderung 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 :

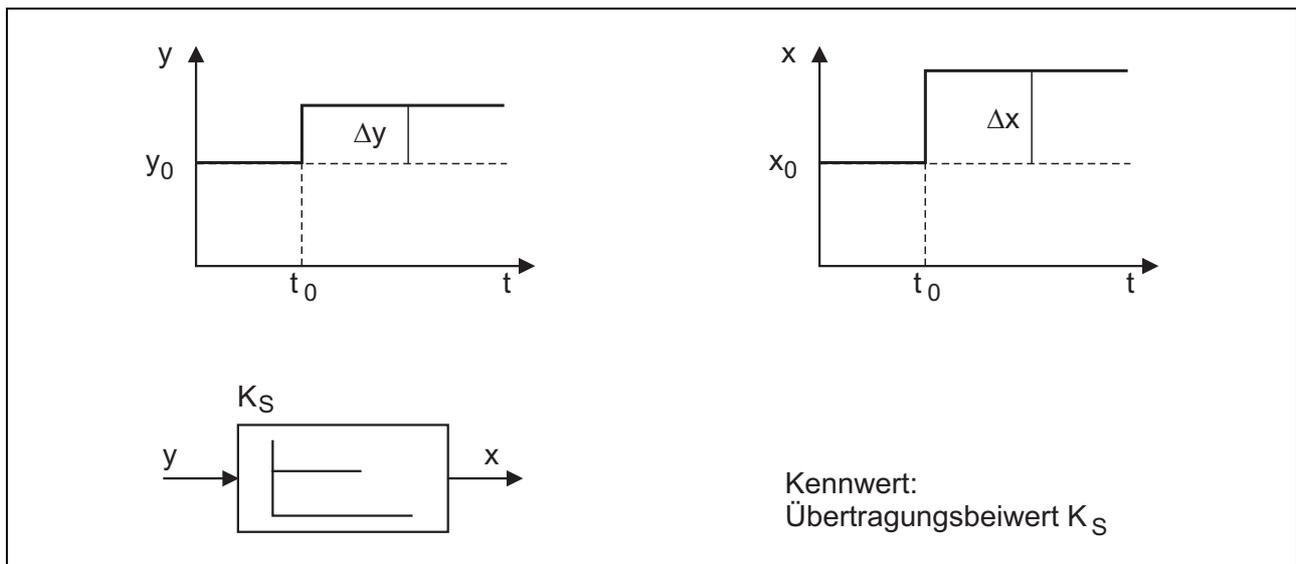


Abbildung 22: Sprungantwort einer P-Regelstrecke und Blocksymbol

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:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y \quad (3)$$

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

2 Die Regelstrecke

2.3.2 Strecken mit Totzeit

P-Strecken treten häufig in Kombination mit Totzeitelementen auf: Diese so genannten PT_t -Strecken sind neben dem Übertragungsbeiwert durch die Totzeit definiert:

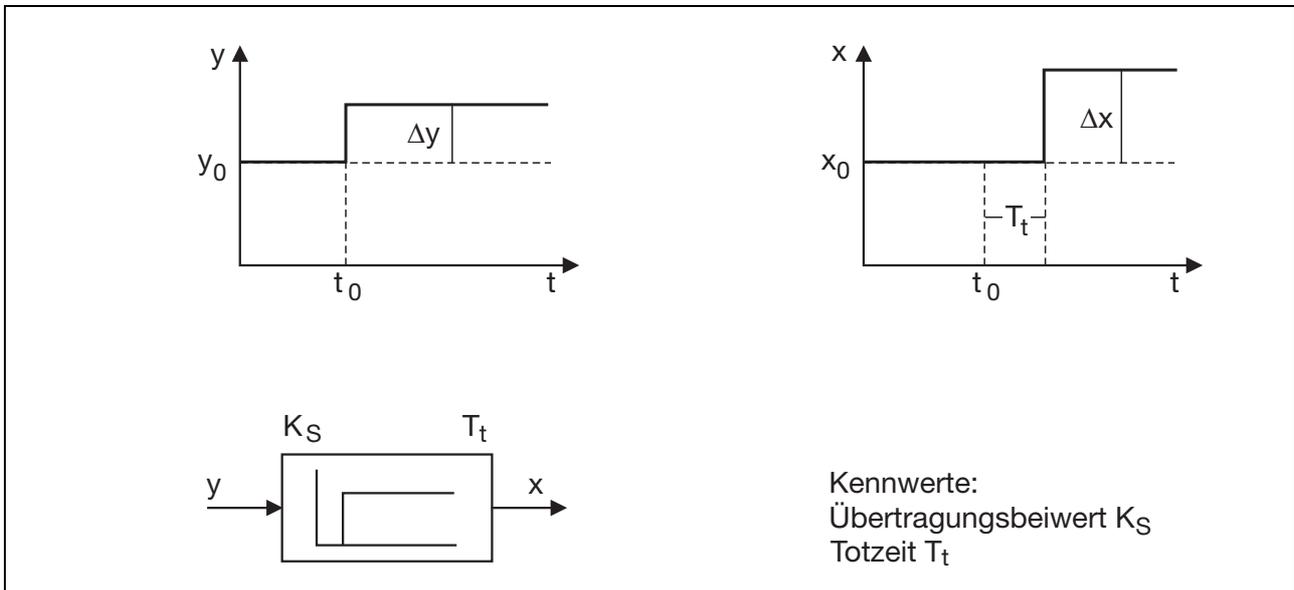


Abbildung 23: Sprungantwort einer PT_t -Strecke und Blocksymbol

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:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y, \text{ jedoch verzögert um die Totzeit } T_t \quad (4)$$

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

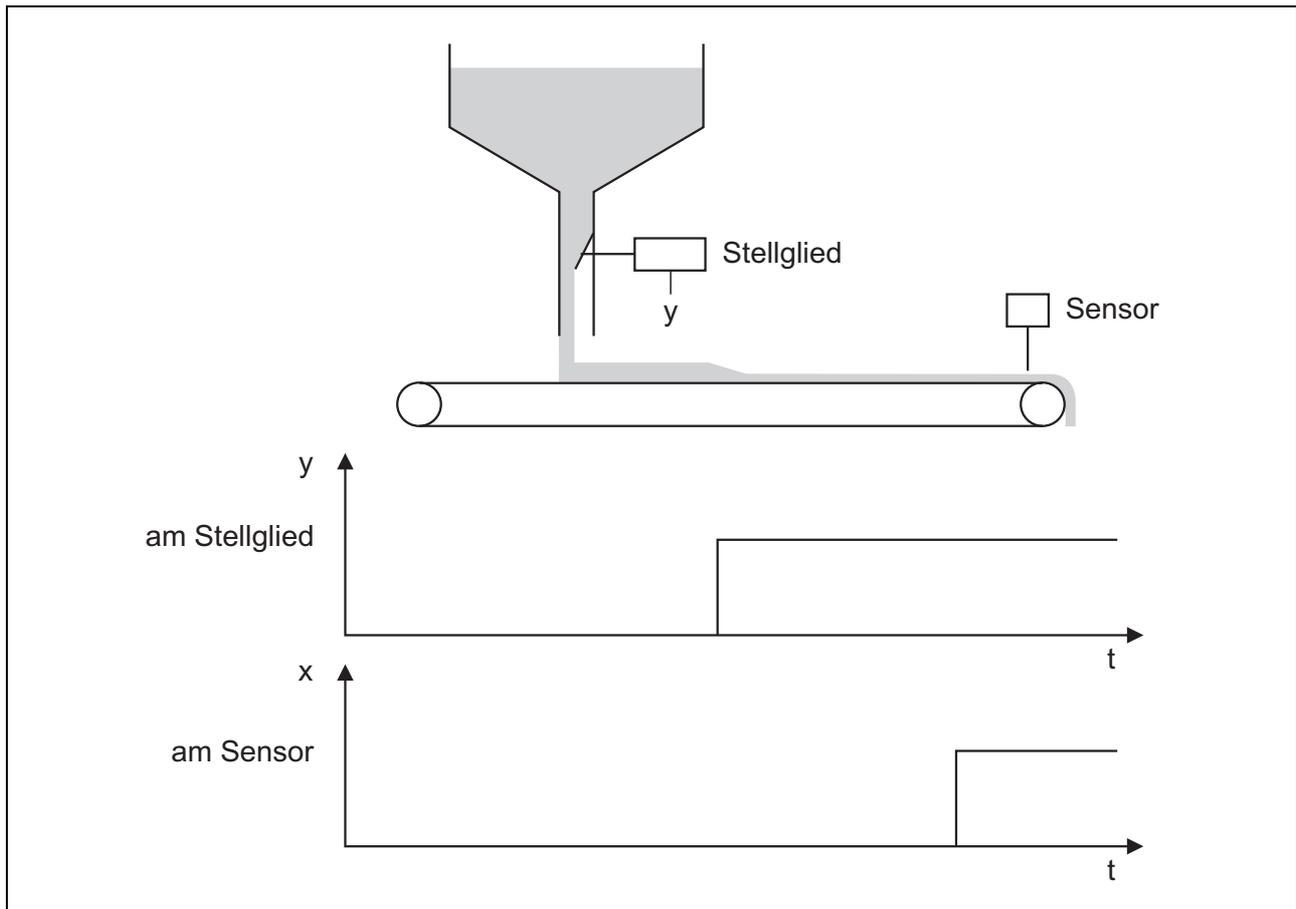


Abbildung 24: Regelung der Schüttgutmenge an einem Förderband

Ein Regler steuert mit seinem Stellgrad die Klappe. Wird der Stellgrad am Regler sprunghaft erhöht, öffnet die Klappe ohne Zeitverzug (Annahme). Eine bestimmte Menge (Schüttgut/Zeiteinheit) fällt auf das Förderband. Das Förderband benötigt jedoch die so genannte 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 sprunghaften Stellgraderhöhung auf 75 % ergibt sich nach 10 s sprunghaft eine Schüttgutmenge von 150 t/h.

Berechnung des Übertragungsbeiwertes:

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

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

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 Die Regelstrecke

2.3.3 Strecken mit Verzögerung

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. usw. 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).

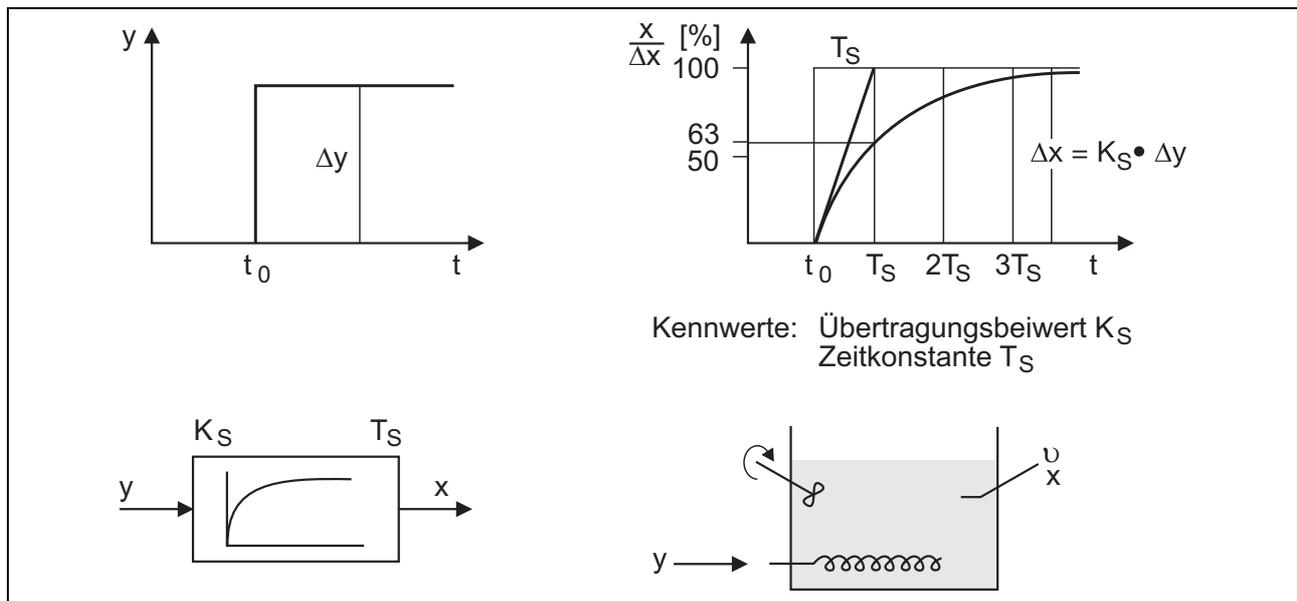


Abbildung 25: Strecke 1. Ordnung; PT₁-Strecke

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:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) \quad (6)$$

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) aufgezeichnet.

2 Die Regelstrecke

Folgende Abbildung zeigt den Istwertverlauf nach der Stellgradsprungvorgabe:

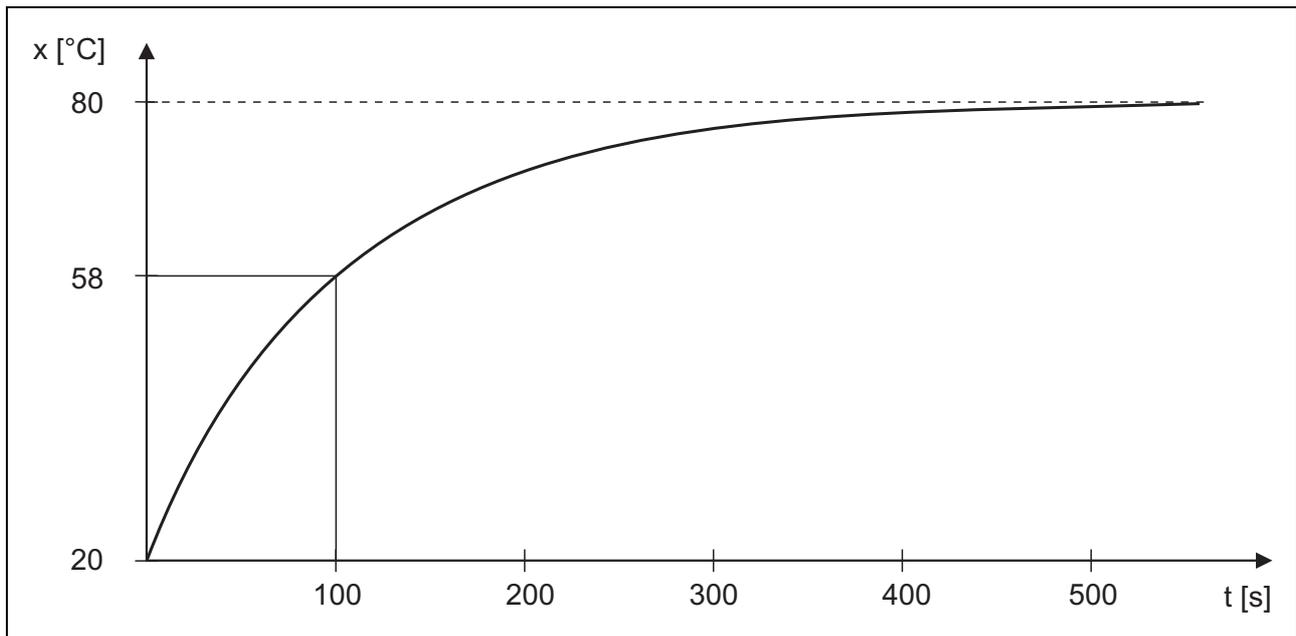


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der Sprungantwort einer Strecke 1. Ordnung

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:

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

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.

$$20 \text{ °C} + 60 \text{ K} \cdot 63 \% \approx 58 \text{ °C} \quad (8)$$

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:

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

bzw.

2 Die Regelstrecke

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

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

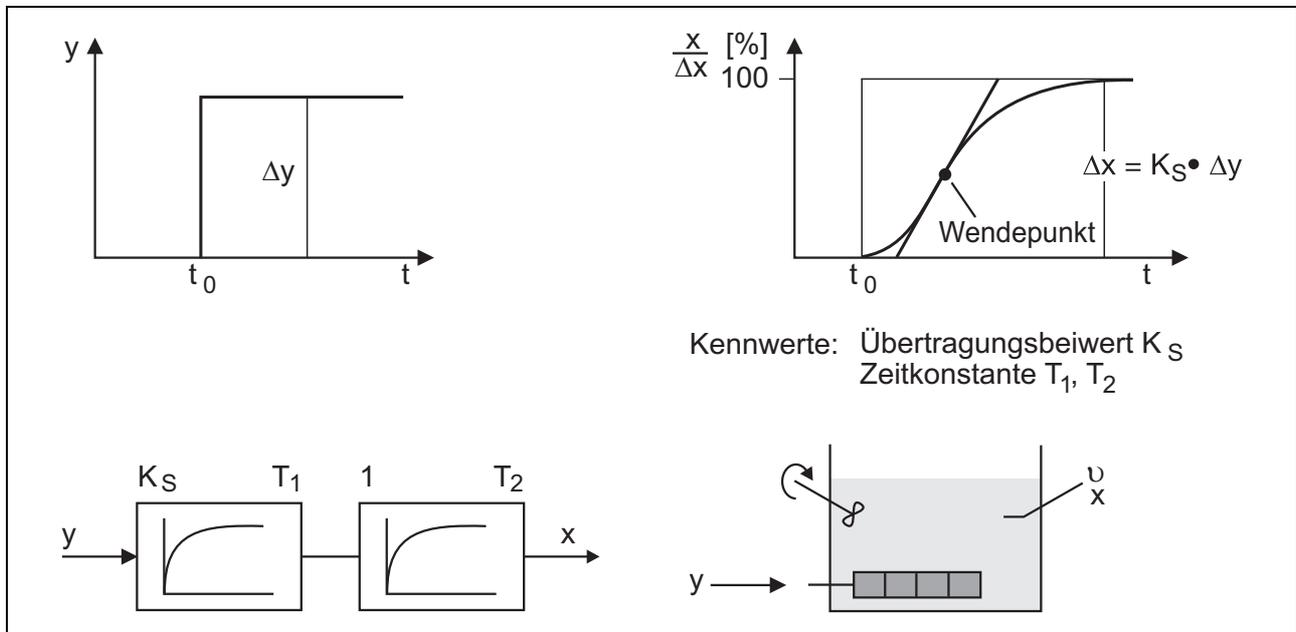


Abbildung 27: Strecke 2. Ordnung; PT₂-Strecke

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 nennenswerter 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 gezeichnet.

Die PT₂-Strecke ist durch die beiden Zeitkonstanten und den Übertragungsbeiwert definiert. Die Sprungantwort ergibt sich nach folgender Gleichung:

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

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 (Kapitel 2.4 „Aufnahme der Sprungantwort für Strecken mit mindestens zwei Verzögerungen und Totzeit“).

Strecken höherer Ordnung

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

2.4 Aufnahme der Sprungantwort für Strecken mit mindestens zwei Verzögerungen und Totzeit

Regelstrecken bestehen meist aus mehreren Elementen mit Verzögerungen und Totzeit:

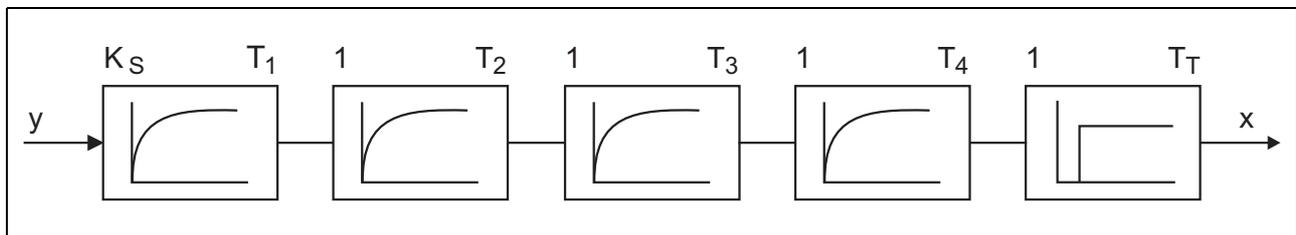


Abbildung 28: Blockstruktur einer Regelstrecke mit mehreren Verzögerungen und Totzeit

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, wieviele 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 aufgenommen (siehe Abbildung 29). In Höhe des Istwertes nach dem Sprung wird parallel zur Zeitachse eine Linie gezeichnet. Durch Anlegen der Tangenten an den Istwert wird der Bereich ermittelt, an 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 liegen 20°C vor. Über den Regler wird im Handbetrieb der Stellgrad sprunghaft von 0 auf 50% erhöht und der Istwert aufgezeichnet. Abbildung 29 zeigt den Istwertverlauf:

2 Die Regelstrecke

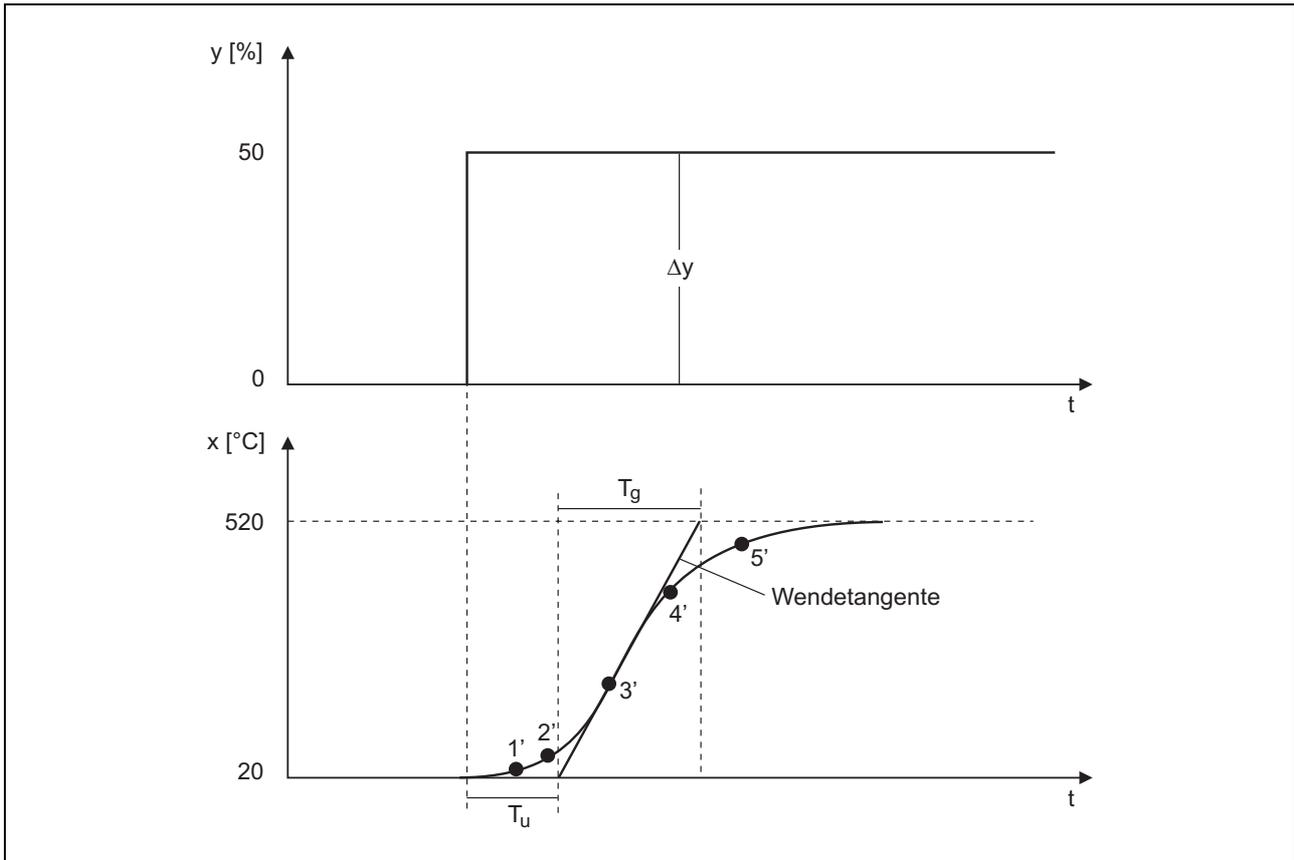


Abbildung 29: Bestimmen von Verzugs- und Ausgleichzeit

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', 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. Mit Hilfe der Wendetangente 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
$T_g/T_u = 10 \dots 3$	noch regelbar
$T_g/T_u < 3$	schwer regelbar

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

Beispiel:

Eine Strecke höherer Ordnung beinhaltet zwei Energiespeicher mit großen Zeitkonstanten, das Verhalten entspricht einer Strecke 2. Ordnung und das Verhältnis T_g/T_u wird relativ groß sein.

Werden die Kenngrößen in die Faustformeln nach dem Kapitel 4.3.2 „Verfahren nach der Streckensprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick“ 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).

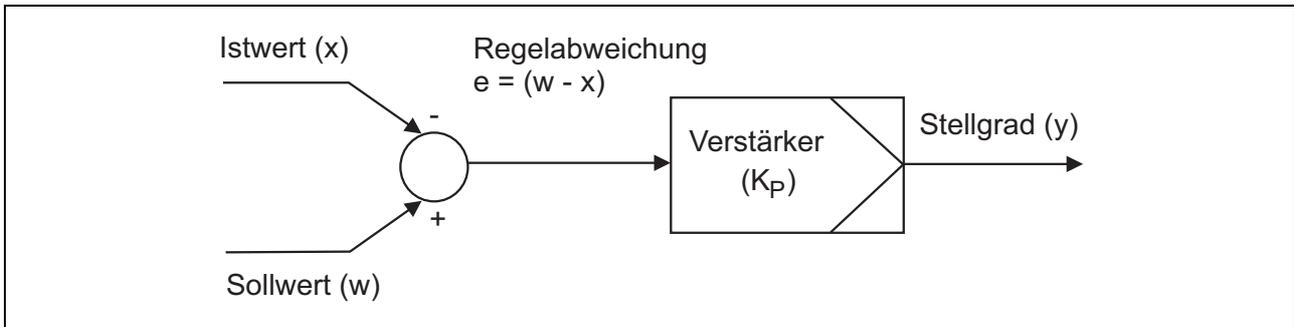


Abbildung 30: Funktionsprinzip eines P-Reglers

Der Proportionalbeiwert wird am Regler frei definiert.

$$y = K_P \cdot (w - x) \quad (12)$$

Der Regler arbeitet mit dem dimensionslosen Zahlenwert der Regelabweichung.

Allgemein verfügt K_P 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 %.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

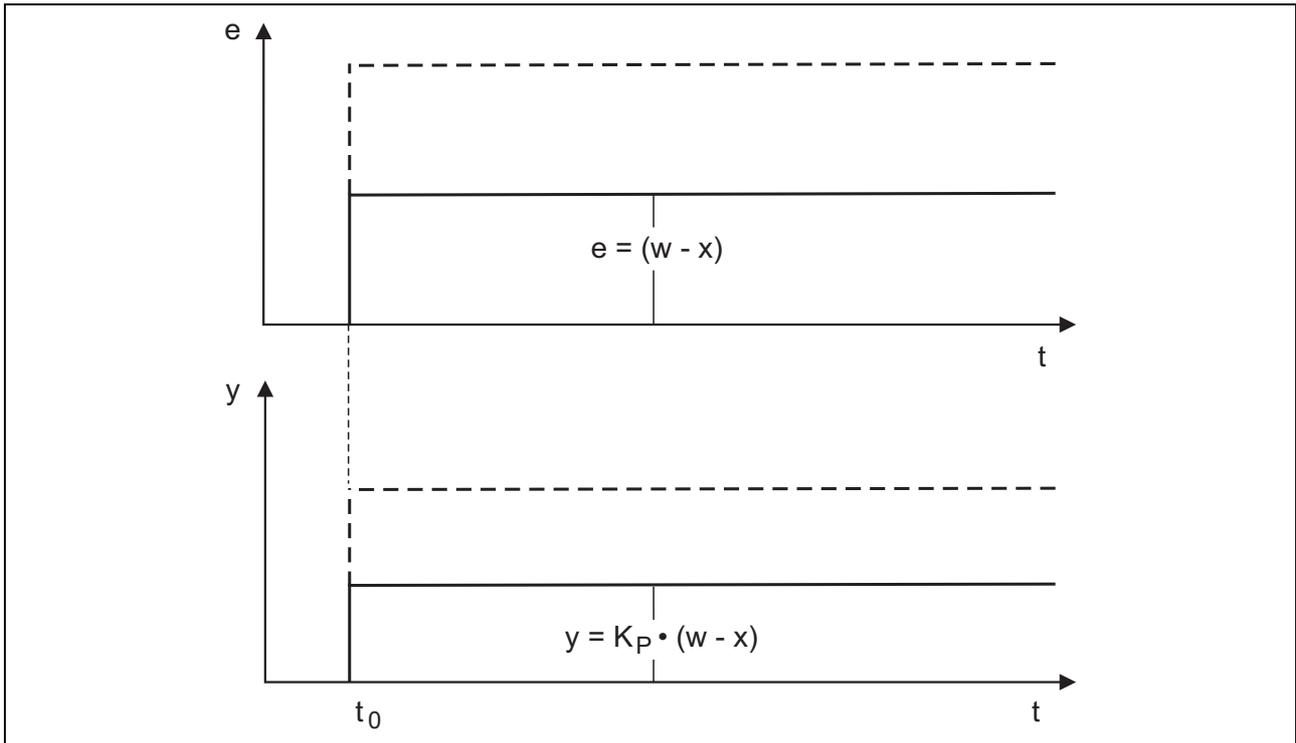


Abbildung 31: Sprungantwort eines P-Reglers

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.

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).

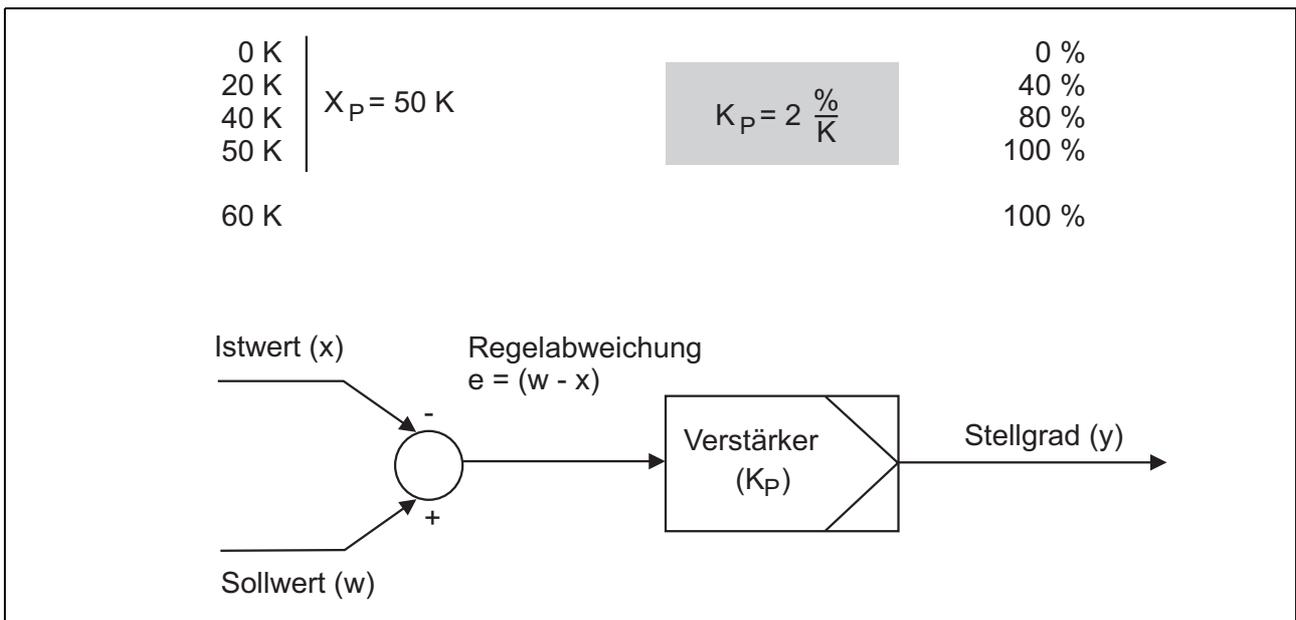


Abbildung 32: Proportionalbeiwert K_P und Proportionalbereich X_P

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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:

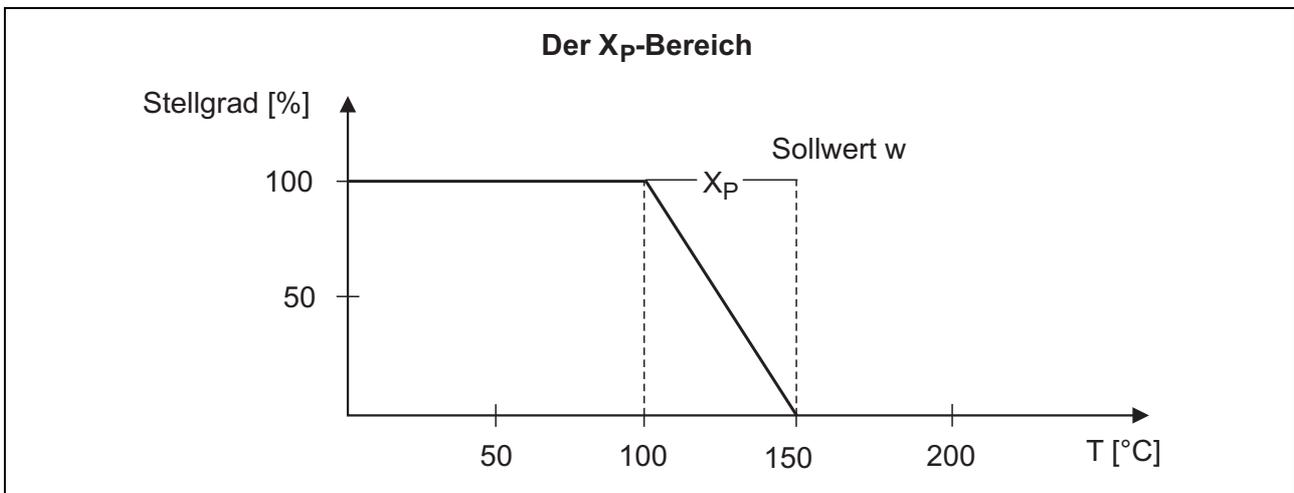


Abbildung 33: Kennlinie eines Proportionalreglers

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 weiterhin der Istwert eingezeichnet:

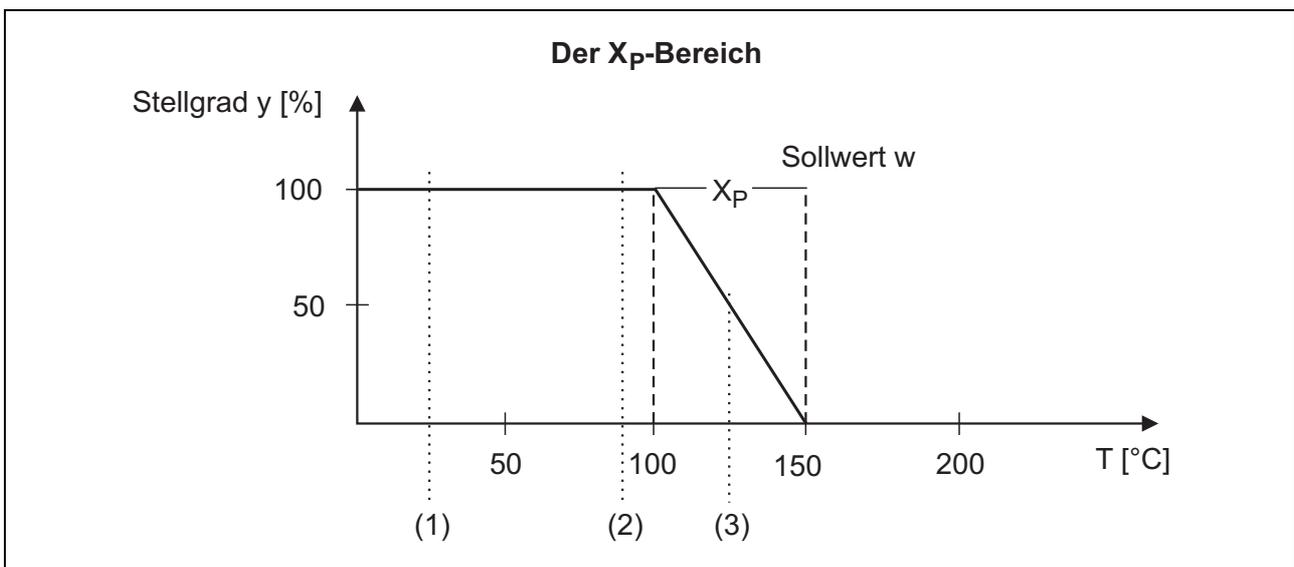


Abbildung 34: Kennlinie eines Proportionalreglers mit eingezeichnetem Istwert

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 auf 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). Liegt der Istwert z. B. in der Mitte des Proportionalbereiches (125 °C), beträgt der Stellgrad noch 50 % (3). Bei einem Istwert von 150 °C oder darüber, liegt der Stellgrad bei 0 %.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

Bleibende Regelabweichung

Ab einem Istwert von 150 °C oder darüber (Abbildung 34), wird keine Heizleistung mehr ins System geführt. Im Fall eines Ofens wird dieser nicht mehr beheizt. Die Temperatur wird kleiner 150 °C und der Stellgrad größer werden. 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 dieser selten Verwendung. Der 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 stagniert der Istwert bei 125 °C und 50 % Stellgrad. Wird der Proportionalbereich auf 25 K reduziert, steigt der Stellgrad auf 100 % und der Istwert gelangt näher an den Sollwert.

Mit kleiner werdendem X_P jedoch steigt die Schwingungsneigung des Istwertes:

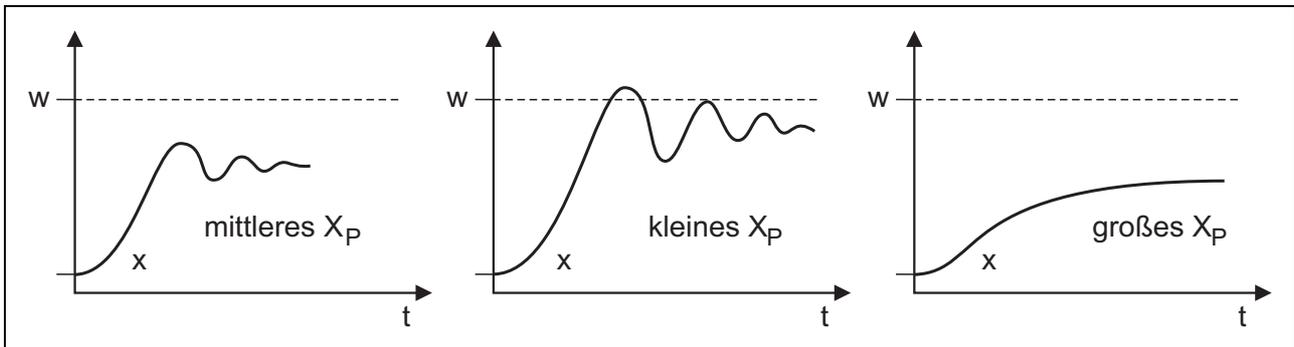


Abbildung 35: Regelverhalten für unterschiedliches X_P

Die großen Schwingungen bei einem kleinen X_P begünden 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 Proportionalbeiwert und Proportionalbereich

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

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

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

Wirksinn invers und direkt

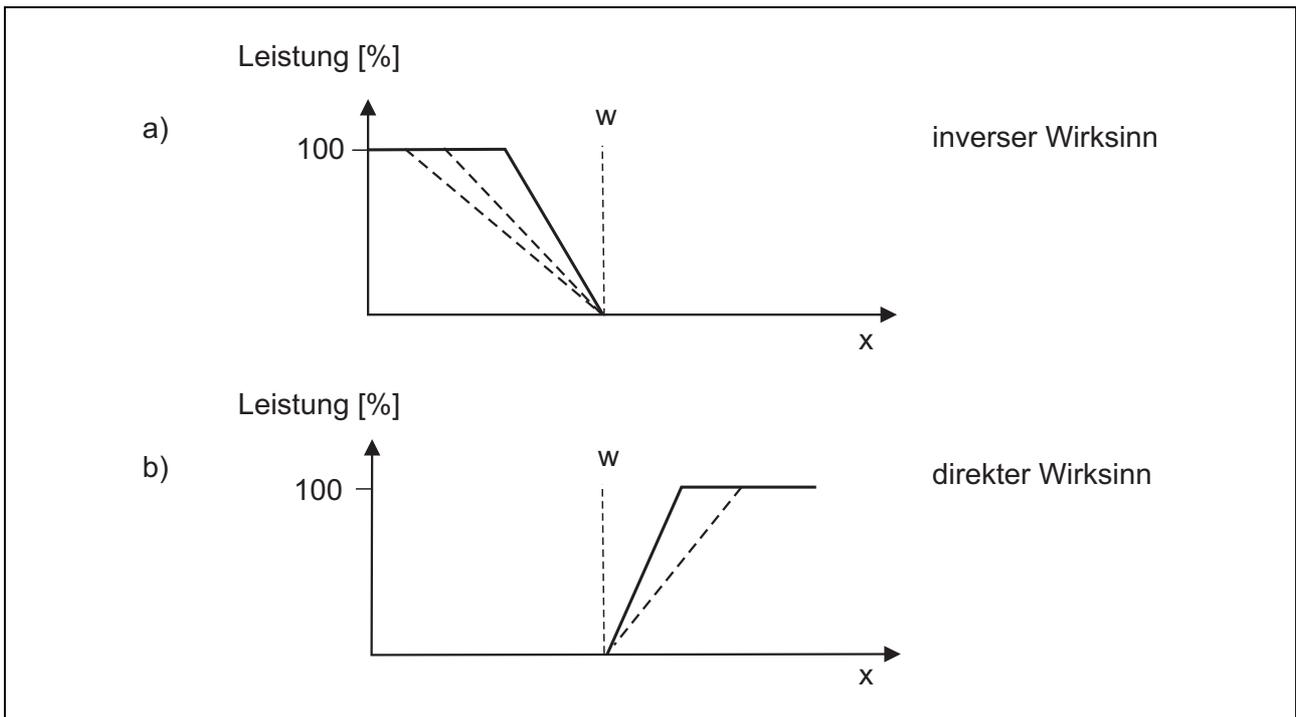


Abbildung 36: Inverser und direkter Wirksinn

Je nachdem, ob das angesteuerte Stellglied den Istwert zu kleiner oder größer werdenden 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 mit 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.).

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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:

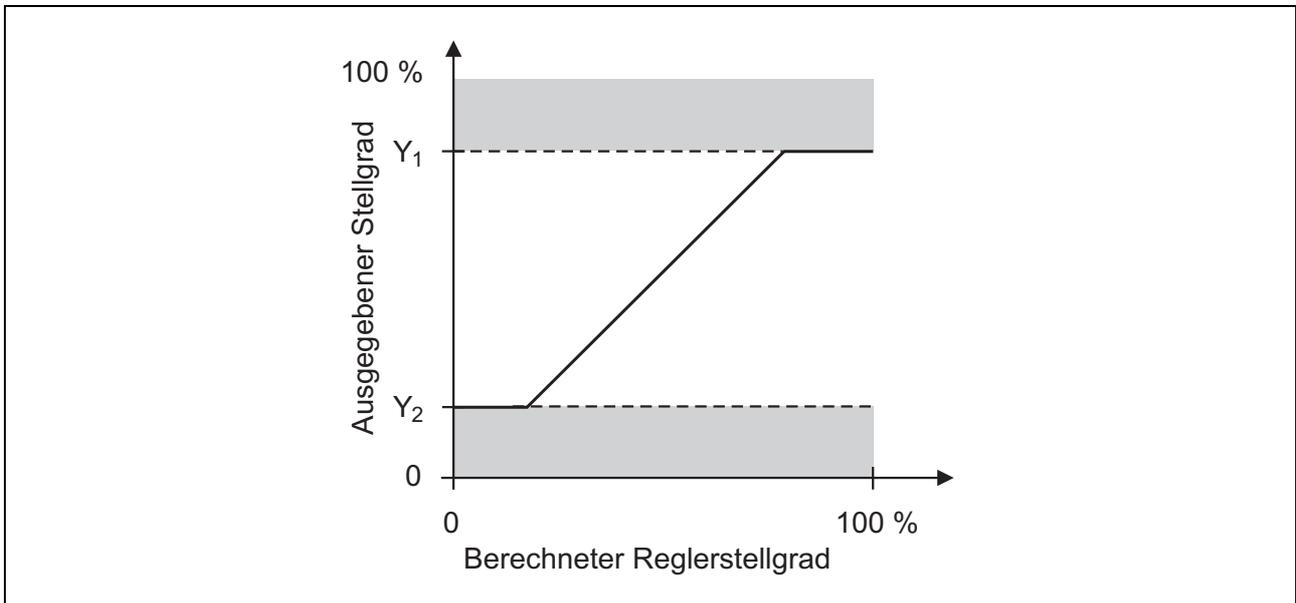


Abbildung 37: Verwendung der oberen Stellgradbegrenzung

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

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 mit der unteren Stellgradbegrenzung (Y_2) ebenfalls begrenzt werden (z. B. auf 50 % bei einer Einstellung von Y_2 von -50 %).

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

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

3.2 I-Regler

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

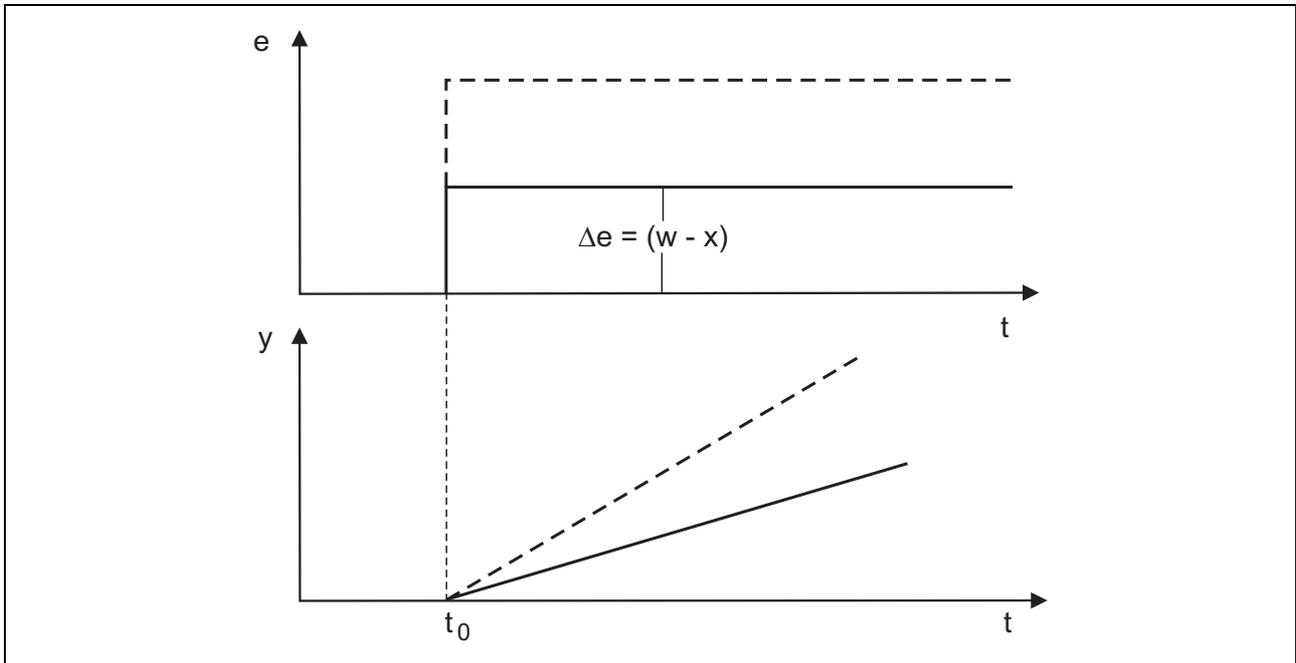


Abbildung 38: Sprungantwort eines I-Reglers

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 sprunghaft auf einen positiven Wert gesetzt, bildet 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 und verharrt auf diesem Wert. Ist die angebotene Regelabweichung doppelt so groß, baut der Regler den Stellgrad doppelt so schnell auf (siehe gestrichelte Linien in Abbildung 38). Bei einem Istwert größer als dem Sollwert (negative Regelabweichung) wird der Stellgrad entsprechend verringert.

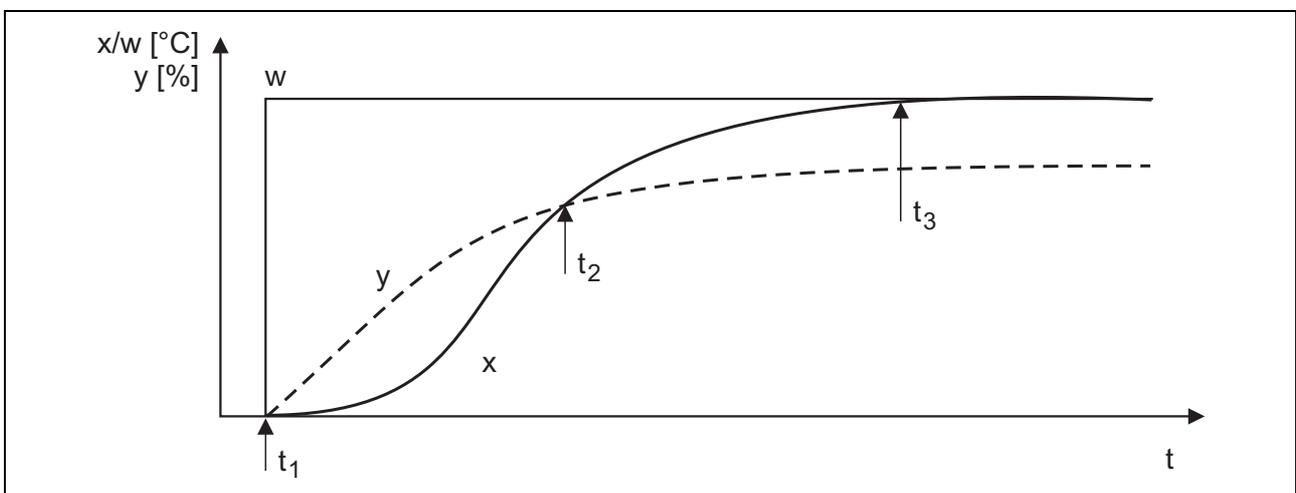


Abbildung 39: Der I-Regler im geschlossenen Regelkreis

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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 immer 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 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 beträgt die Reglergleichung:

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

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:

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

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

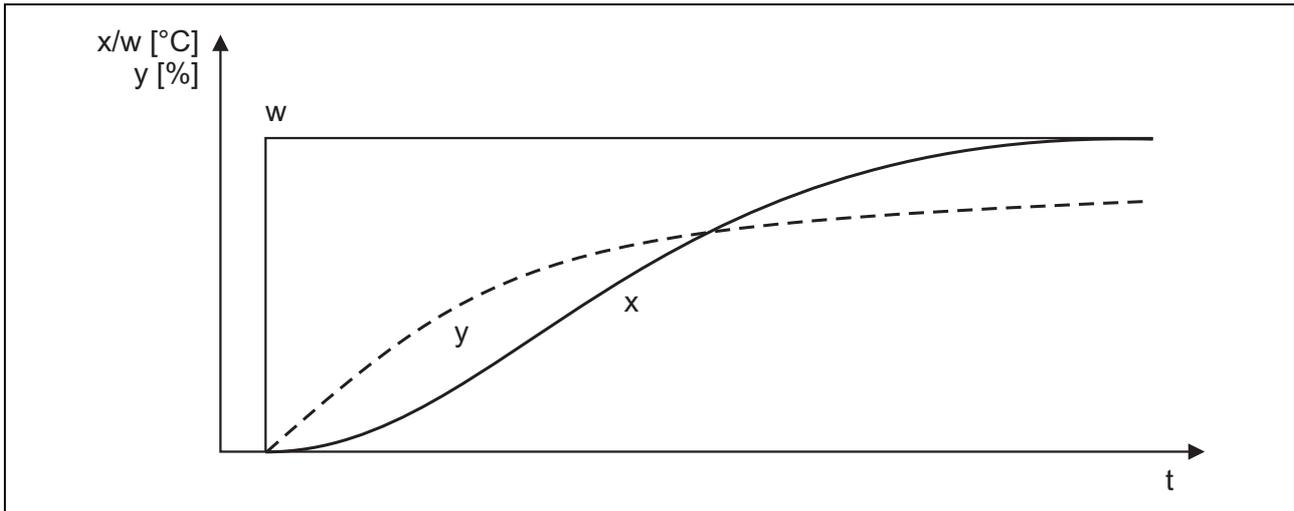


Abbildung 40: I-Regler mit groß eingestelltem T_i

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 40).

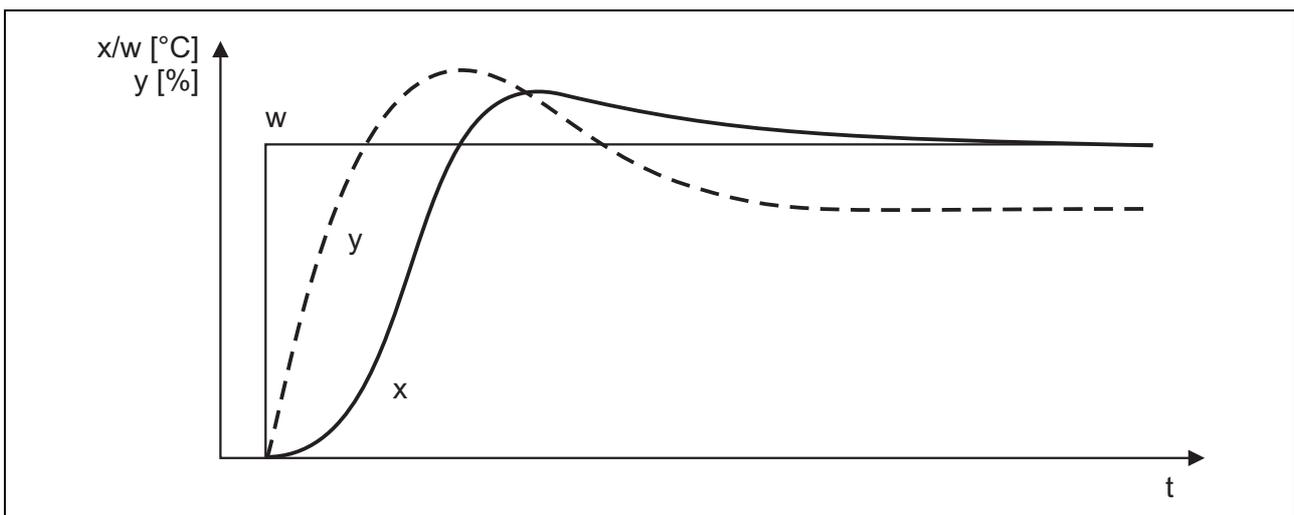


Abbildung 41: I-Regler mit klein eingestelltem T_i

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 gerät über den Sollwert.

Einsatz von I-Reglern

I-Regler finden relativ selten Verwendung: Zum Einsatz kommen sie bei pulsierenden Größen (Druckregelungen) und Strecken, die im Verhältnis zur Verzugszeit eine relativ kleine Ausgleichzeit besitzen ($T_G/T_U < 3$). Um den Regler schnell reagieren zu lassen, wird die Integrierzeit bei schnell reagierenden Strecken auf kleine Werte gesetzt.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

3.3 PI-Regler

Der PI-Regler vereint die Vorzüge der beiden 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 dem Auftreten einer positiven Regelabweichung seinen Stellgrad und sorgt dafür, dass die Regelabweichung zu 0 wird.

Bei der Kombination des I- 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 zur Verfügung stehen. 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:

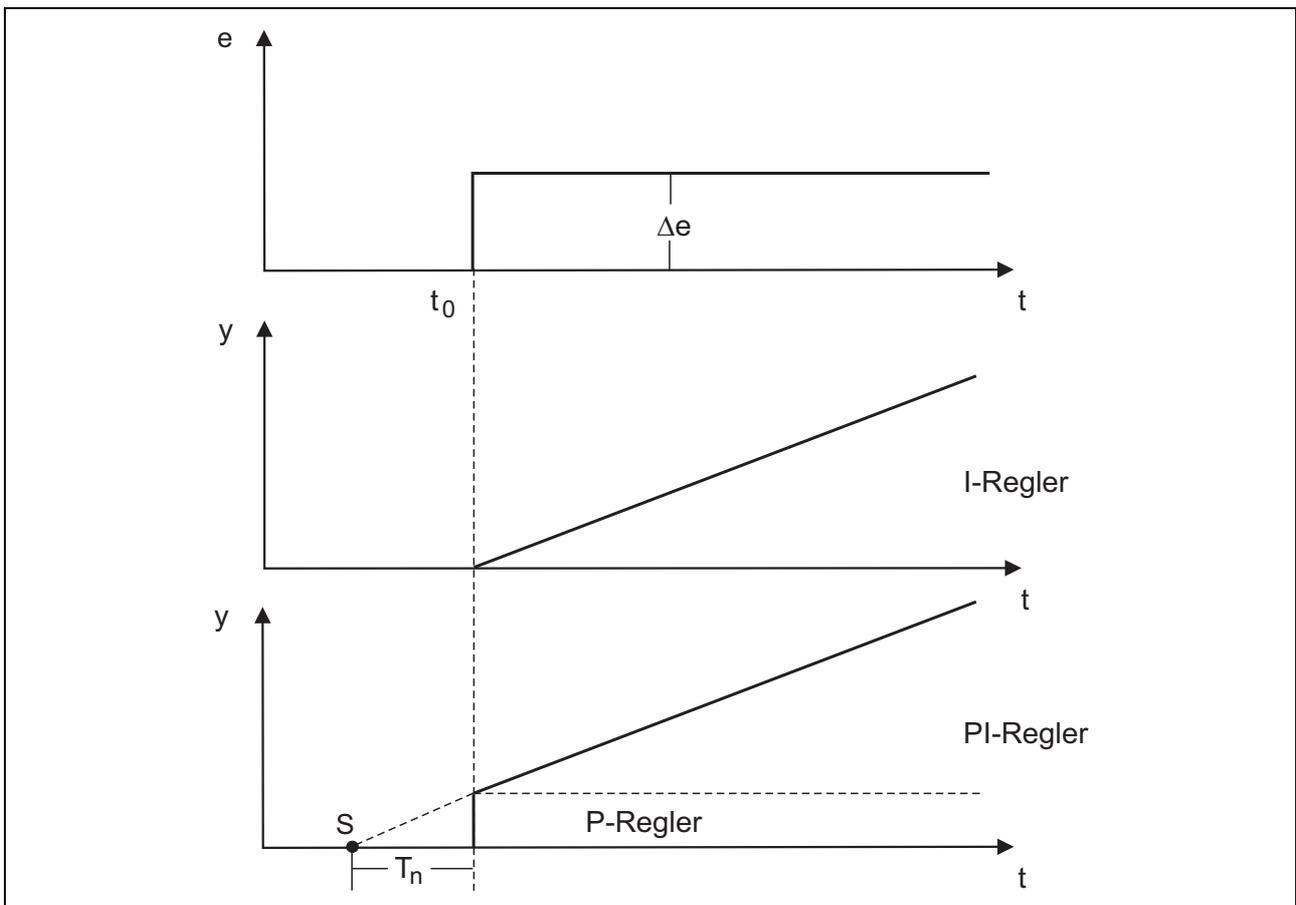


Abbildung 42: Sprungantwort eines PI-Reglers

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 vorliegt.

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:

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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

oder umgestellt:

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

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 „Blockstruktur des PID-Reglers“.

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

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

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

Der PI-Regler im geschlossenen Regelkreis

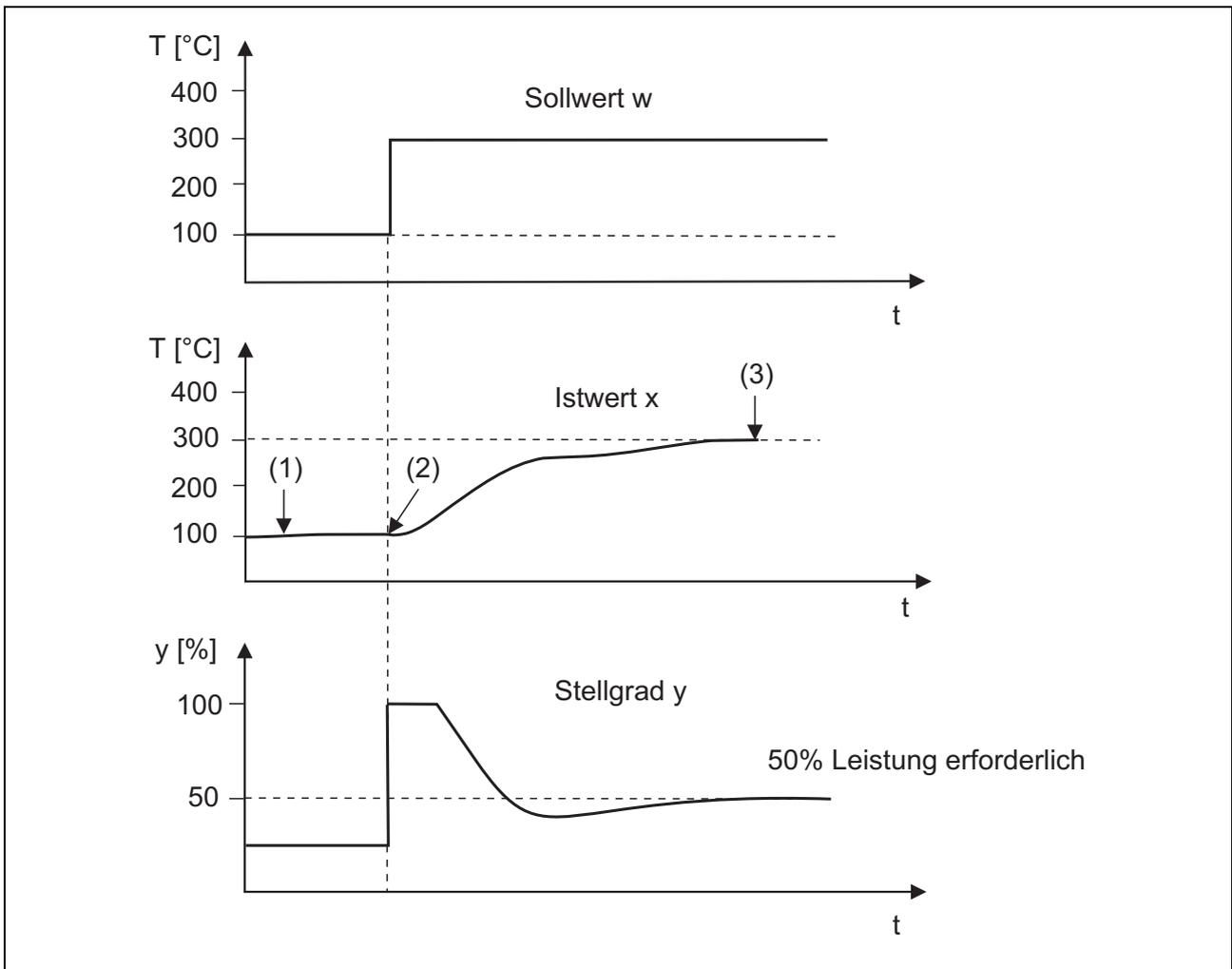


Abbildung 43: PI-Regler im geschlossenen Regelkreis

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 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, der Regler hat ausgeregelt und es wird ein Stellgrad 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 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 ausregelten Zustand liefert der I-Anteil erneut den gesamten Stellgrad (im Beispiel 50%).

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

3.4 PD-Regler

Der D-Anteil (Differenzierende Anteil) reagiert bei Änderungen der Regelgröße und wirkt diesen entgegen: Der D-Anteil eines Reglers mit inversem Wirksinn gibt bei größer werdendem Istwert einen 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:

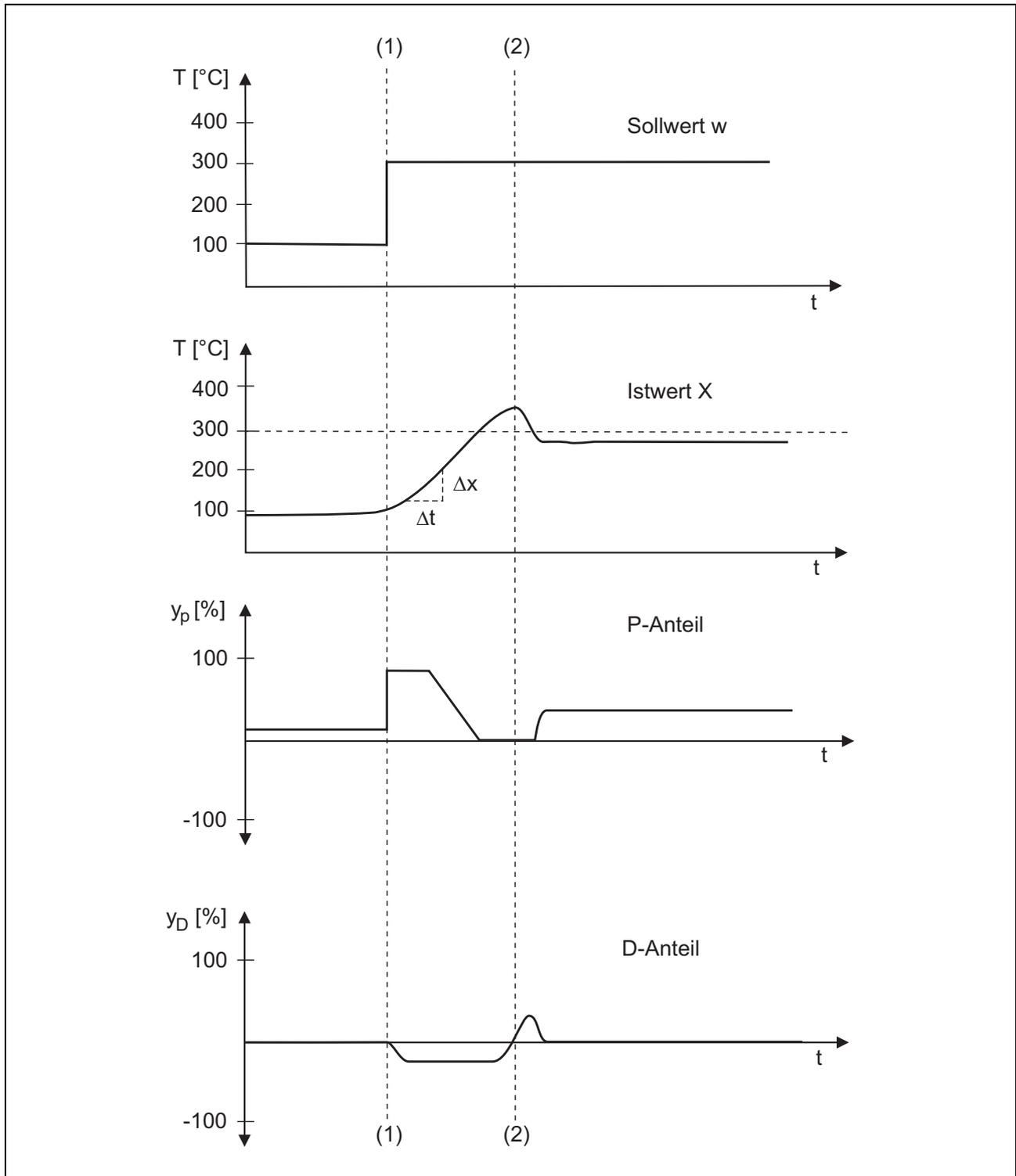


Abbildung 44: Der PD-Regler im geschlossenen Regelkreis

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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. Der 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 %. 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, um so stärker ist die beschriebene Wirkung.

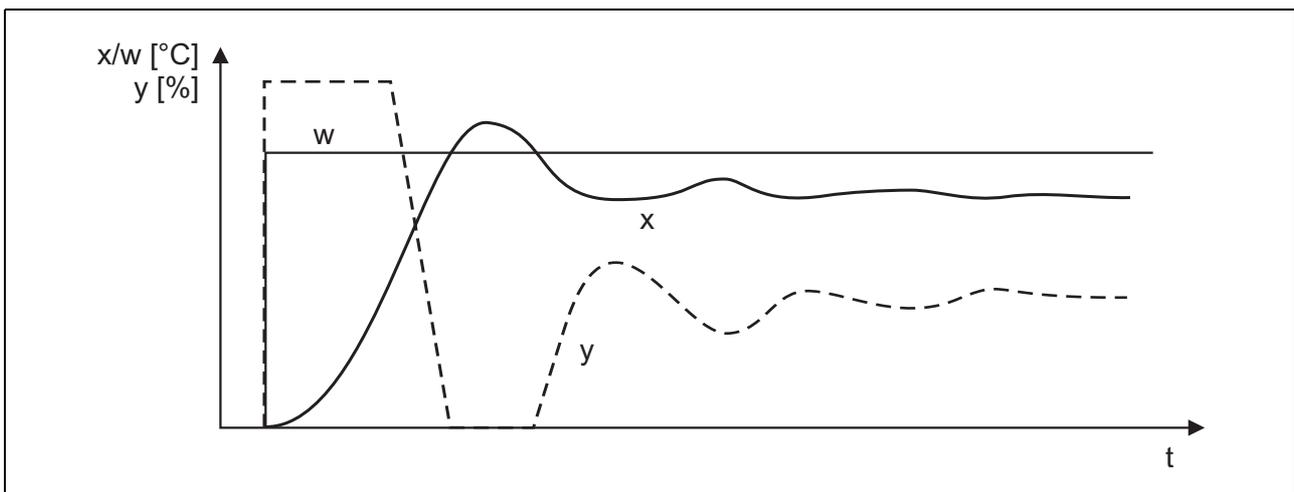


Abbildung 45: PD-Regler mit $T_V = 0$ s (D-Anteil ist unwirksam), P-Regler

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.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

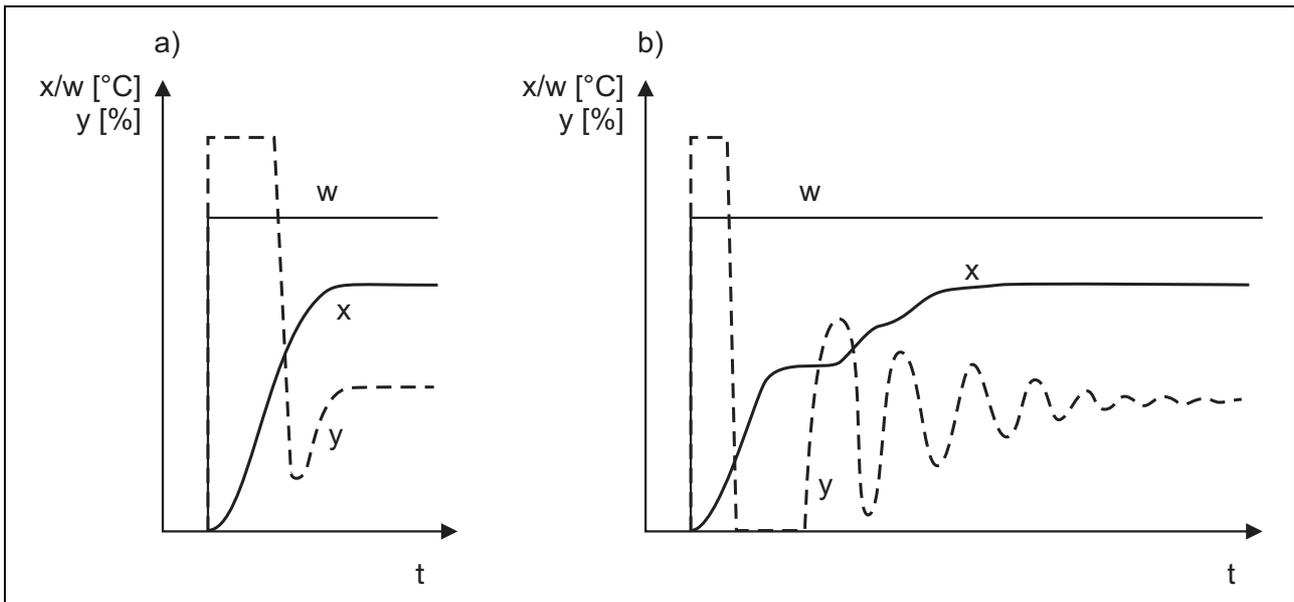


Abbildung 46: PD-Regler mit a) optimal eingestelltem T_v und b) zu groß eingestelltem T_v

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 durch die hohe 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.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

In einem geschlossenen Regelkreis führt eine Veränderung von Störgrößen zu einer zeitweisen Regelabweichung. Der D-Anteil verkleinert die maximal auftretende Regelabweichung.

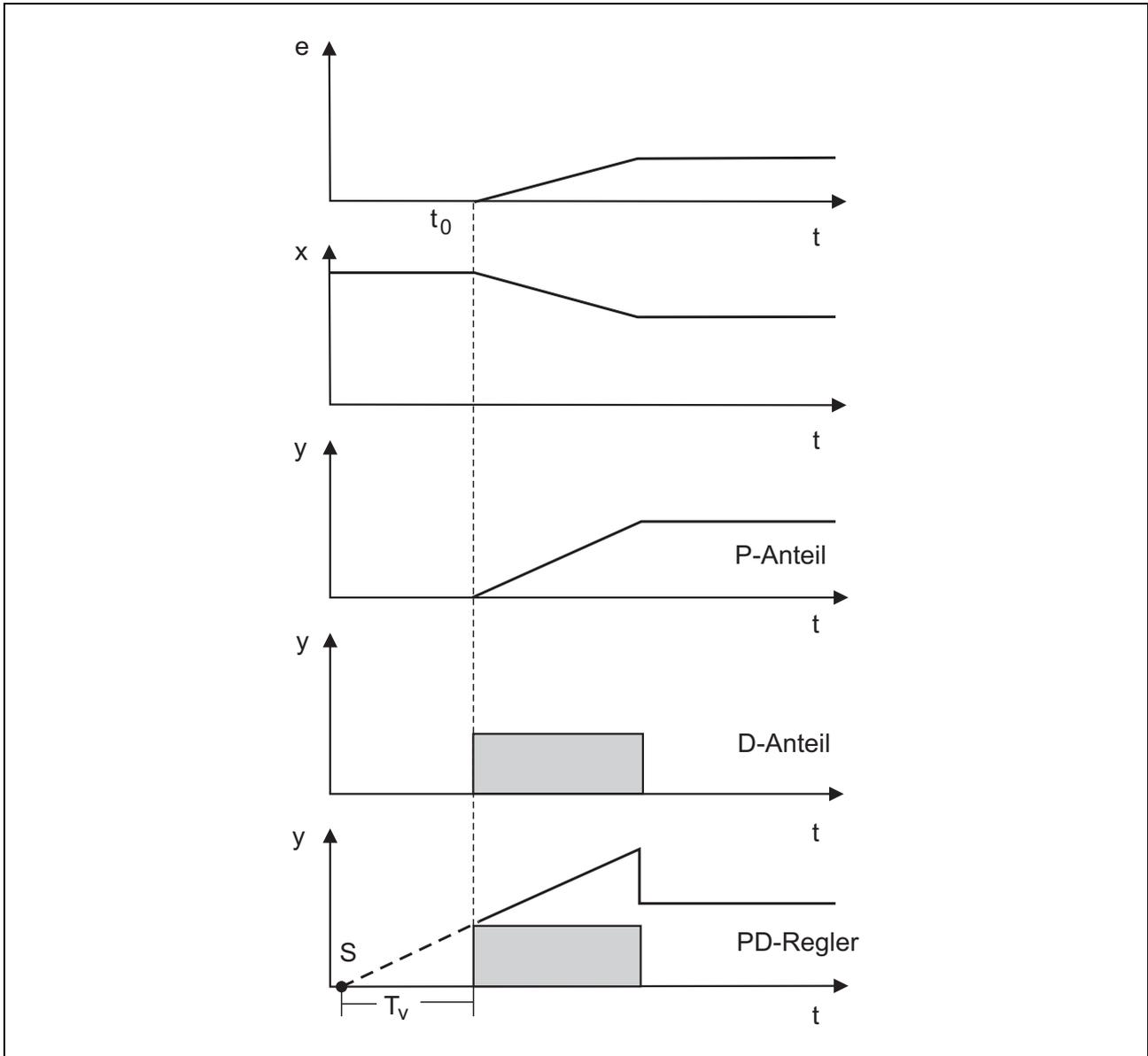


Abbildung 47: Anstiegsantwort eines PD-Reglers

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 sofort mit der Verkleinerung des Istwertes proportional zur Änderungsgeschwindigkeit und beeinflusst sofort mit großer Intensität den Istwert.

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

$$y = \frac{1}{X_p} \cdot 100\% \cdot \left(e - T_v \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \quad (19)$$

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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

$$y = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \cdot \left(e - T_v \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (20)$$

$\frac{dx}{dt}$

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).

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 beschriebene Verhalten durch den Einsatz eines T_1 -Gliedes bedämpft.

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 direkt eingestellt werden. Aus der Sprungantwort des „praktischen D-Anteils“ kann auf Grund des Verhältnisses $T_1 = T_v/4$ aus T_1 die Vorhaltezeit T_v bestimmt werden.

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

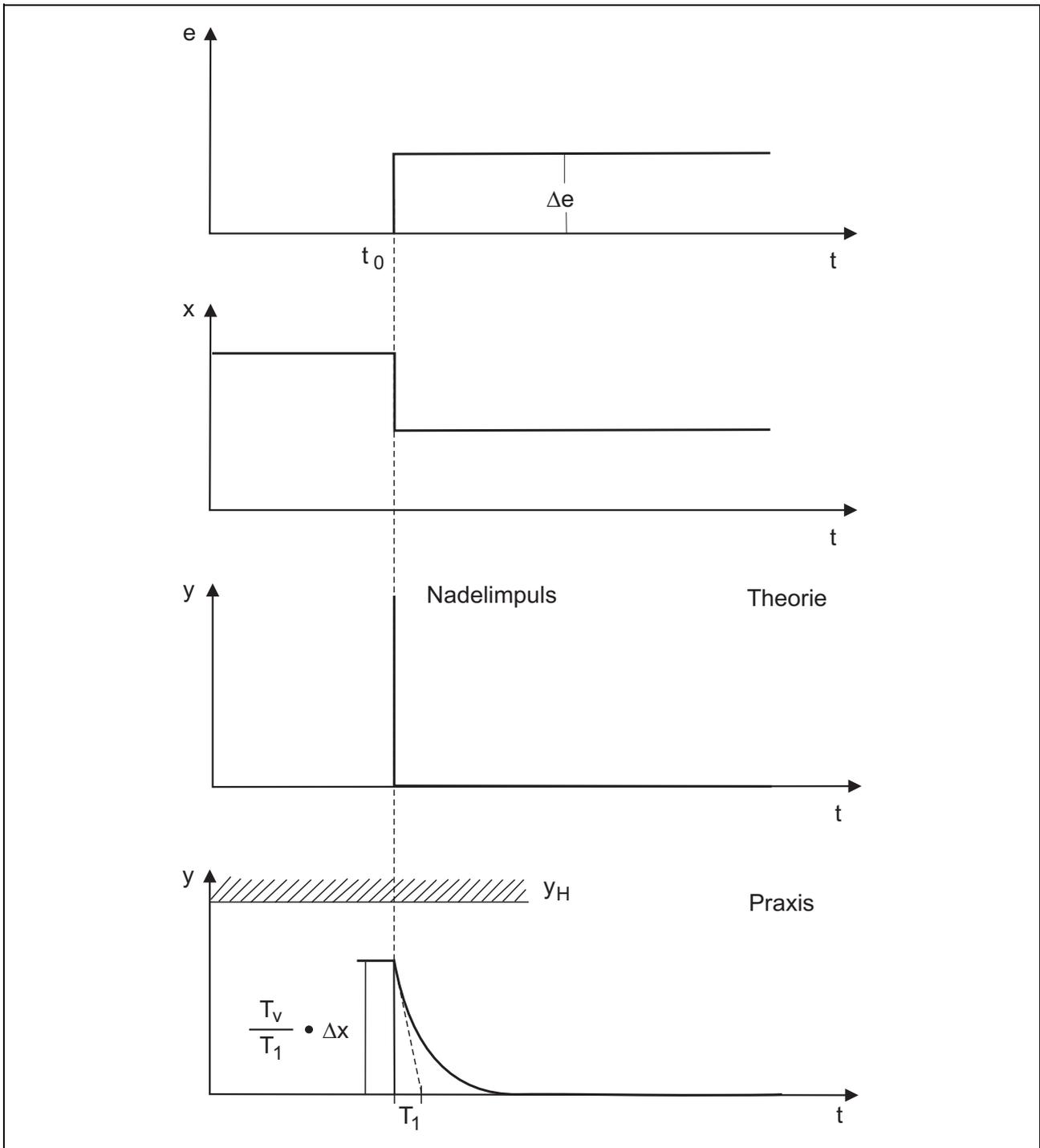


Abbildung 48: Sprungantwort eines DT_1 -Elementes

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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).

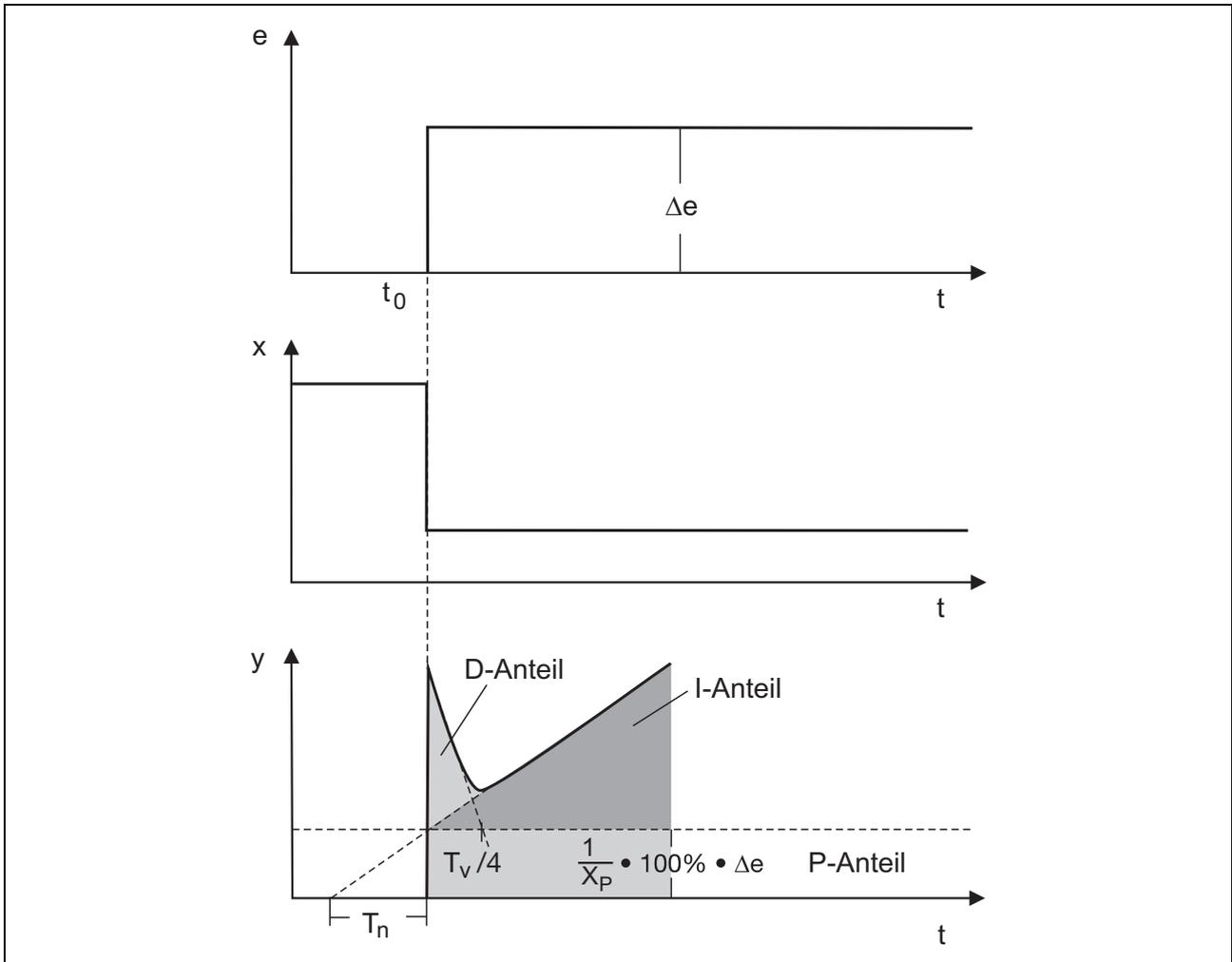


Abbildung 49: Sprungantwort eines PID-Reglers

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 weiterhin proportional zur Regelabweichung positiven Stellgrad. Zusätzlich erhöht der I-Anteil seinen Stellgrad, die Rampe des I-Anteils ist jedoch erst ersichtlich, wenn der I-Anteil in Höhe des D-Anteils liegt.

Die Reglergleichung für den PID-Regler ergibt sich zu:

$$\Delta y = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \cdot \left(e + \frac{1}{T_n} \cdot \int e \cdot dt - T_v \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (21)$$

3 Regleranteile PID und die Regelparameter

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

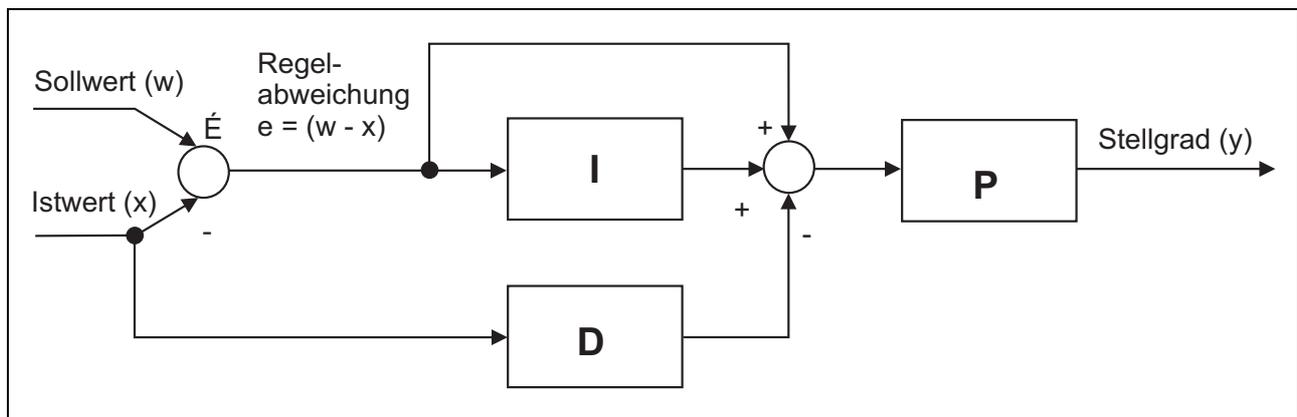


Abbildung 50: Blockstruktur des PID-Reglers

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 habe die Einstellung $T_n = 10$ s und $X_p = 100$ K (der D-Anteil soll in diesem Beispiel außer Betracht gezogen werden). Die Regelabweichung sei 2.

Dimensionslos betrachtet, hat der P-Anteil eine Verstärkung von $1 \left(K_p = \frac{1}{X_p} \cdot 100 \% \right)$.

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 Halbierung des Proportionalbereiches bzw. Verdoppelung der Verstärkung liegt auch der doppelte I-Anteil vor.

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

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

4 Optimierung von Reglern/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

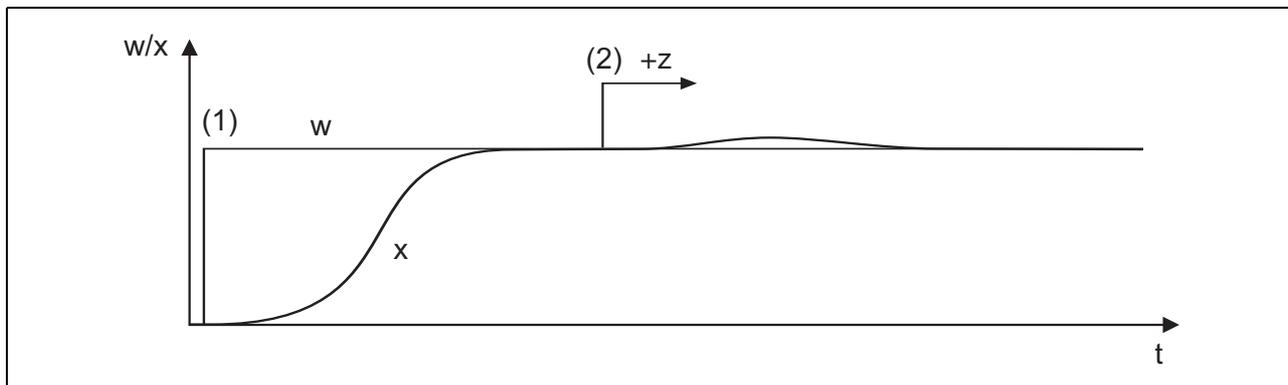


Abbildung 51: Führungs- und Störverhalten eines Regelkreises

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 betrachtet, wie diese Regelabweichung beseitigt wird (2).

Die Optimierung des Reglers auf Führungsverhalten ergibt tendenziell eher große Werte für die Regelparameter (X_p , T_n und T_v), das sich daraus ergebende Störverhalten wird in der Regel akzeptiert. Die weitere Optimierung des Störverhaltens kann durch eine Verkleinerung der Regelparameter erfolgen. Die im ungewöhnlichen Fall der Optimierung auf Störverhalten ermittelten Parameter ergeben wiederum für das Führungsverhalten ein Überschwingen des Istwertes über den Sollwert.

Parametersätze und Parametersatzumschaltung

In JUMO-Reglern können die Regelparameter mehrfach in unterschiedlichen Parametersätzen abgelegt werden. Im ersten Parametersatz können beispielsweise Parameter für das Führungsverhalten, im zweiten Parametersatz diese für das Störverhalten abgelegt werden. Die sogenannte Grenzwertüberwachung überwacht die Regelabweichung. Bei Unterschreitung einer definierten Regelabweichung wird von Parametersatz 1 auf Parametersatz 2 geschaltet und die Parameter für das Störverhalten finden Verwendung.

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

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 Regler versuchsweise Einsatz finden. Als Alternative kann die in JUMO-Reglern existierende Selbstoptimierung verwendet werden. Die beiden Selbstoptimierungsmethoden sind in Kapitel 4.4 „Die Selbstoptimierung in JUMO-Kompaktreglern“, 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 parametrisiert und ein relativ großes X_P eingestellt. Ein Sollwert im späteren Arbeitsbereich wird definiert (Abbildung 52).

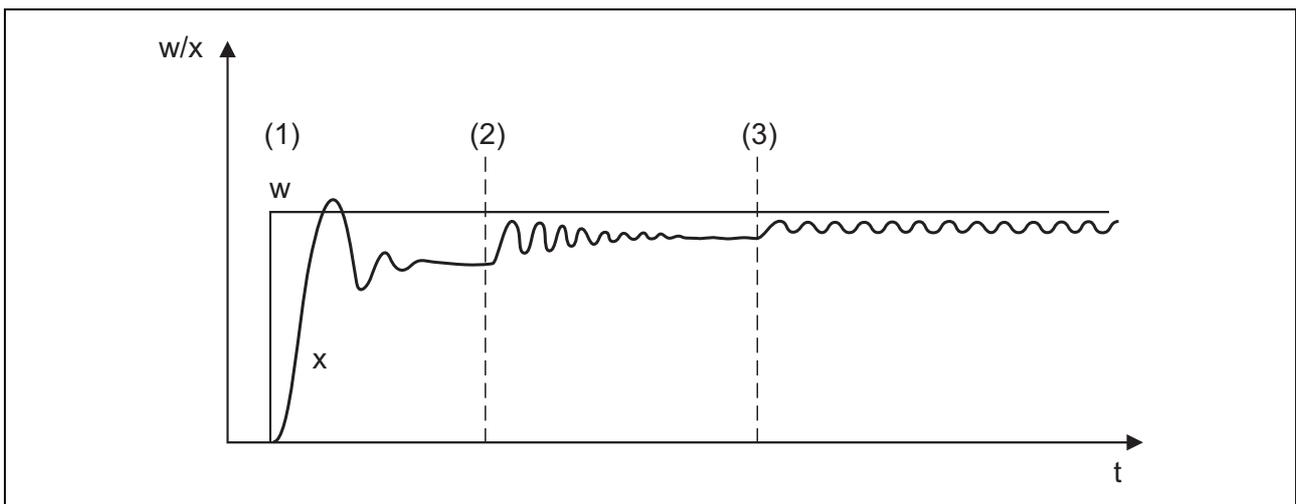


Abbildung 52: Sollwert und Istwert während der Schwingungsmethode

Mit dem relativ groß eingestellten Proportionalbereich verläuft 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 verfährt 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).

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

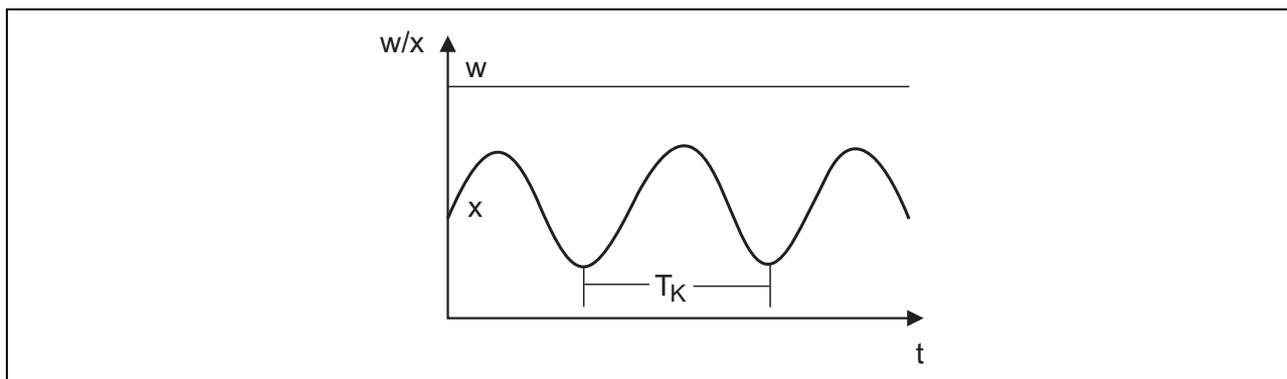


Abbildung 53: Kritische Periodendauer

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 von zwei 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	$X_P = X_{PK} / 0,45$ $T_n = 0,83 \cdot T_K$
PID	$X_P = X_{PK} / 0,6$ $T_n = 0,5 \cdot T_K$ $T_v = 0,125 \cdot T_K$

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 bei langsamen Regelstrecken relativ zeitsparend ermittelt. Die Methode wird für Strecken ab 2. Ordnung angewendet und bietet die Besonderheit der Unterscheidung zwischen den Formeln für das Führungsverhalten und Störverhalten.

Für die Faustformeln werden aus der Sprungantwort der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke, die Verzugs- und die Ausgleichzeit ermittelt. Das Kapitel 2.4 „Aufnahme der Sprungantwort für Strecken mit mindestens zwei Verzögerungen und Totzeit“ beschreibt detailliert die Vorgehensweise.

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

Tabelle 2: Formeln zur Einstellung nach der Streckensprungantwort

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

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 sprunghaft auf 80 % erhöht und der Istwert aufgezeichnet.

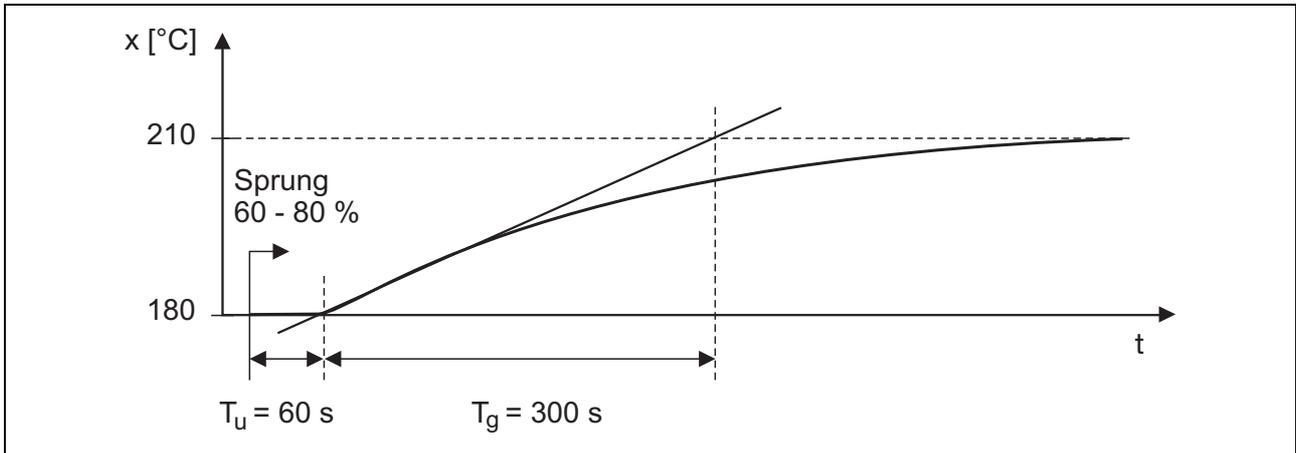


Abbildung 54: Sprungantwort des Laborofens

Aus der Sprungantwort (Abbildung 54) werden mit Hilfe 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:

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

Mit Hilfe der Faustformeln ergeben sich folgende Parameter für das Störverhalten:

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

$$T_n = 2,4 \cdot T_u = 2,4 \cdot 60\text{s} = 144 \text{ s} \quad (24)$$

$$T_v = 0,42 \cdot T_u = 0,42 \cdot 60\text{s} \approx 25\text{s} \quad (25)$$

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 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

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 ein Istwert unterhalb des später verwendeten Sollwertes liegt.

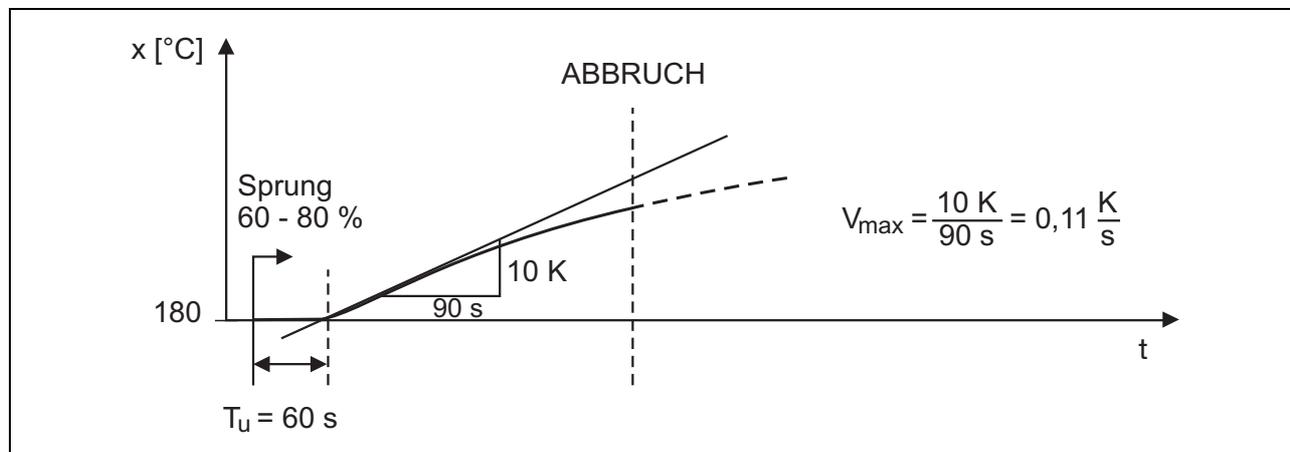


Abbildung 55: Istwertverlauf beim Verfahren nach der Anstiegsgeschwindigkeit

Die Sprungvorgabe erfolgt für den Laborofen aus Kapitel 4.3.2 „Verfahren nach der Streckensprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick“, 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:

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

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

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

Tabelle 3: Formeln zur Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

Für einen PID-Regler ergeben sich folgende Werte:

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

$$T_n = 2 \cdot T_u = 2 \cdot 60 \text{ s} = 120 \text{ s} \quad (28)$$

$$T_v = 0,5 \cdot T_u = 0,5 \cdot 60 \text{ s} = 30 \text{ s} \quad (29)$$

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).

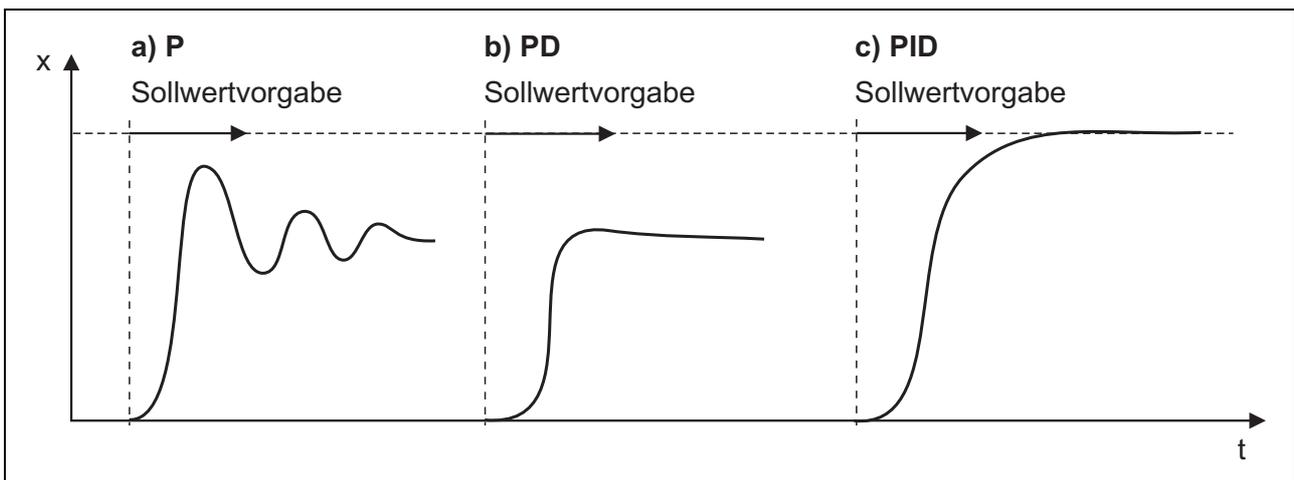


Abbildung 56: Einstellung eines PID-Reglers nach der Empirischen Methode

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 56 (a)].

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 56 (b)].

Hinweis: Sobald der Regler beim Anfahren den Stellgrad auch nur einmal auf 0 % setzt, liegt ein zu großes T_v vor.

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 56 c) zeigt das Ver-

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

halten 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 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

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:

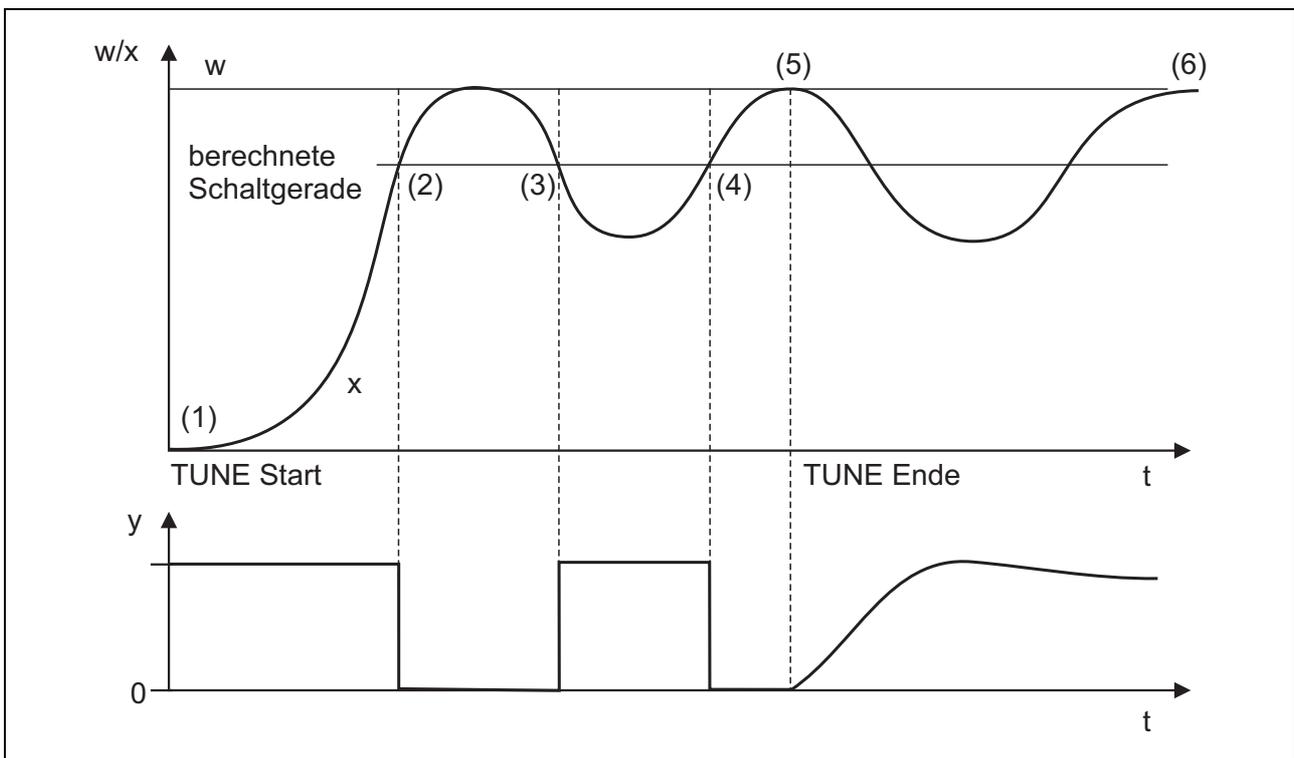


Abbildung 57: Sollwert-, Istwert- und Stellgradverlauf während der Selbstoptimierung nach der Schwingungsmethode

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. Während 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 Abschalten 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

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

Optimierung während des Anfahrens wird weiterhin der maximale Stellgrad für eine längere Zeit aufgeschaltet. Durch das 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 und wartet auf die Stabilisierung des Istwertes (Abbildung 58). Der Regler erhöht den Stellgrad sprunghaft und der Istwert steigt mit immer größerer Steilheit an. Erreicht der Istwert seine maximale Steilheit, sind die Regelparameter ermittelt und die Selbstoptimierung ist beendet:

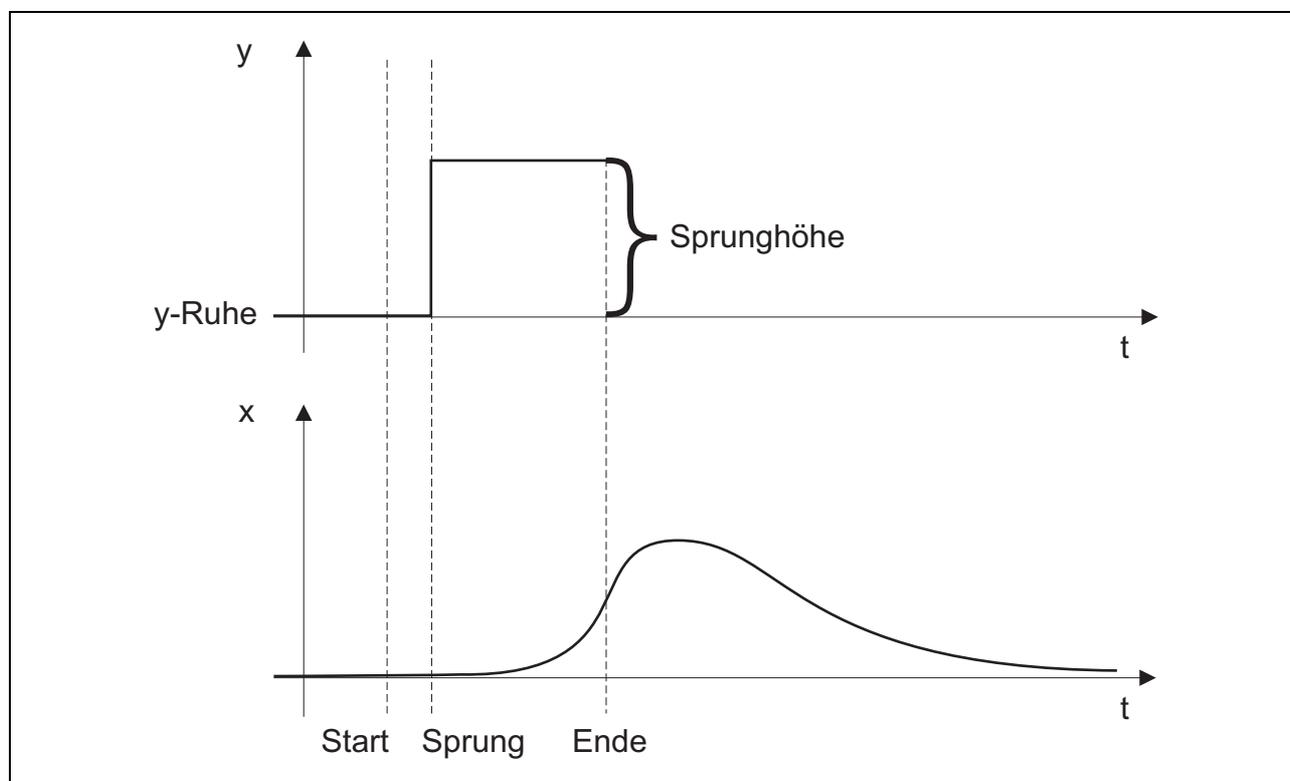


Abbildung 58: Istwert- und Stellgradverlauf während der Selbstoptimierung nach der Sprungantwort

Denkbar ist die Verwendung vor dem ersten Anfahren der Anlage (Abbildung 58). Die Selbstoptimierung wird gestartet und der Ruhestellgrad (werksseitig 0 %) ausgegeben. Erkennt der Regler einen stabilen Istwert, wird der Stellgrad um den Stellgradsprung (werksseitig 30 %) erhöht. Der Istwert steigt mit immer größerer Steilheit an. Mit Erreichen der maximalen Istwertsteilheit sind die Regelparameter berechnet und die Selbstoptimierung ist beendet. Nach Ende der Selbstoptimierung wird der Sollwert durch den Anwender 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

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

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 so genannte Schaltperiodendauer (Summe aus Ein- und Ausschaltzeit) so klein eingestellt werden, dass sich bei konstantem Stellgrad durch das Ein- und Ausschalten keine Schwingung des Istwertes ergibt.

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

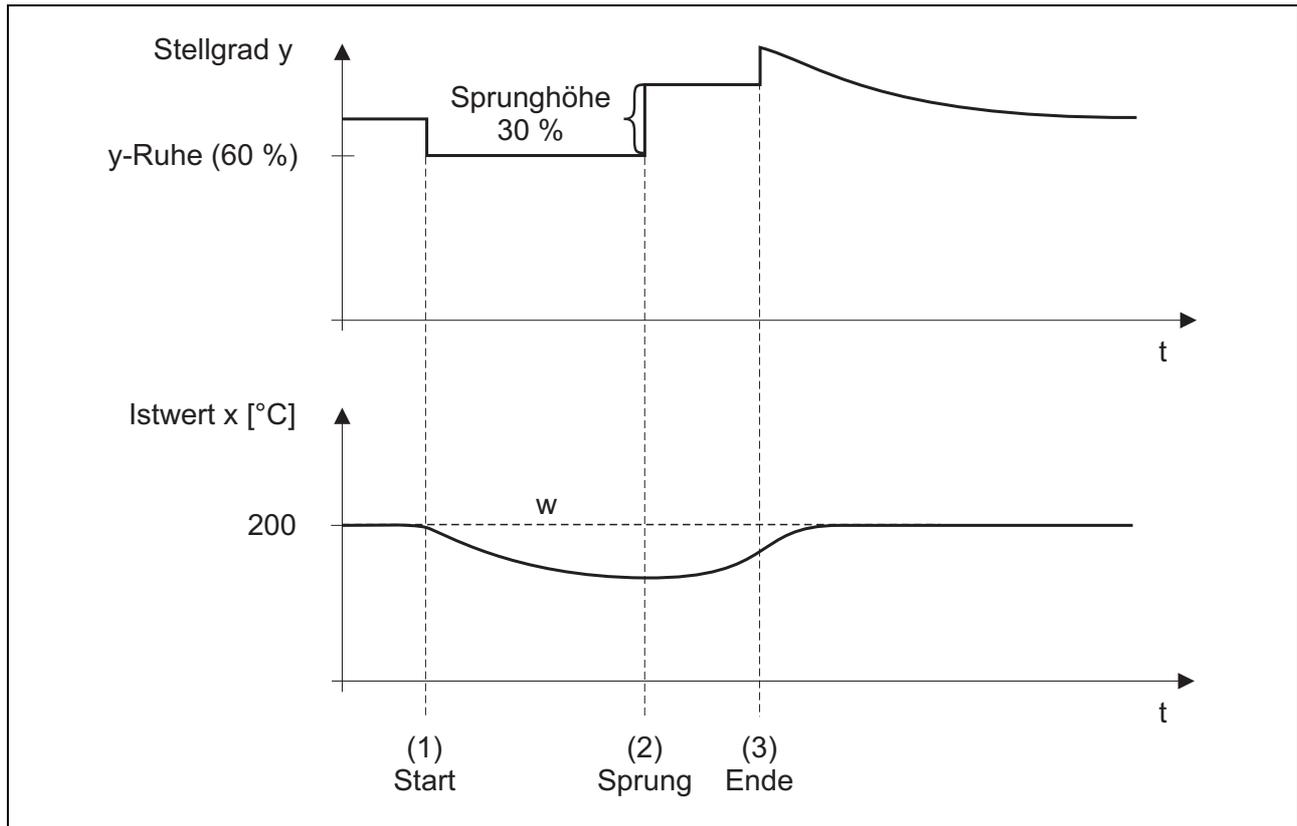


Abbildung 59: Durchführung des Stellgradsprunges im Bereich des Arbeitspunktes

Beispielhaft sei 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 60 % Stellgrad erreicht, die Ermittlung des Stellgrades kann beispielsweise im Handbetrieb erfolgen. Der Stellgradsprung wird um den Arbeitspunkt herum definiert (Ruhestellgrad 45 %, Sprunghöhe 30 %):

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

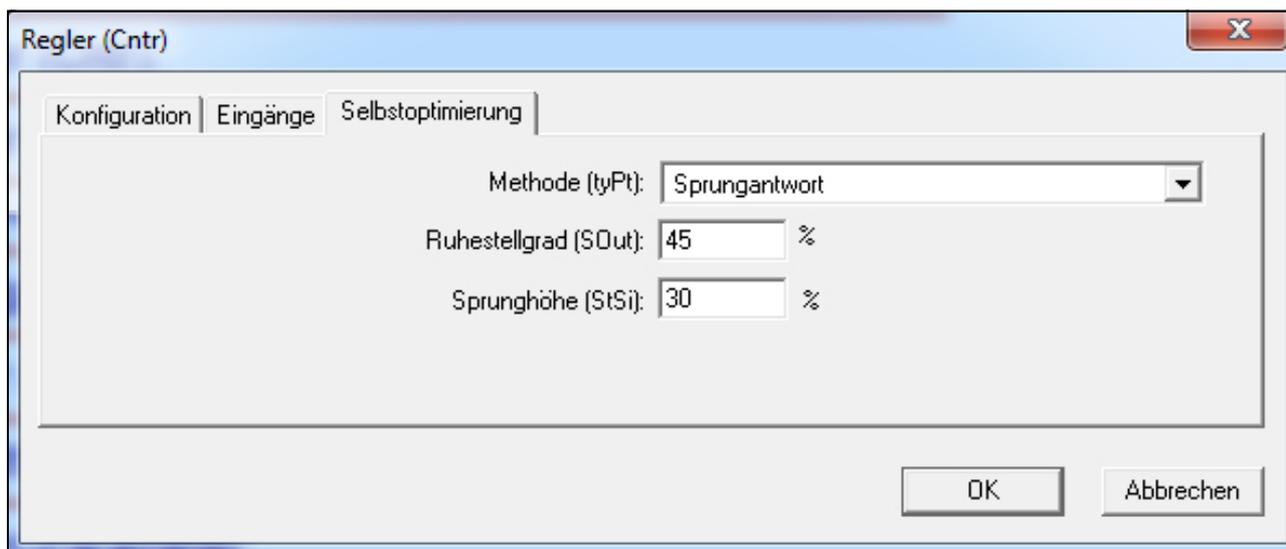


Abbildung 60: Einstellungen für die Selbstoptimierung im Konfigurationsprogramm eines JUMO-Reglers

Die Selbstoptimierung erfolgt im Automatikbetrieb des Reglers. Mit dem Start gibt der Regler den Ruhestellgrad von 45% aus (Abbildung 59), es erfolgt Abkühlung. Erkennt der Regler einen stabilen Istwert, erfolgt die Stellgraderhöhung um 30%. Mit dem Vorliegen der maximalen Istwertsteilheit ist die Selbstoptimierung beendet.

4.4.3 Weitere Informationen zu den Optimierungsverfahren

Beide Verfahren können nur für Strecken mit Ausgleich Verwendung finden.

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

Bei der Sprungantwortmethode gilt entsprechendes, jedoch findet diese beim Dreipunktschrittregler nur für einen Ruhestellgrad von 0% und einer Sprunghöhe von 100% Anwendung. Begründet ist dies in der Tatsache, dass der Dreipunktschrittregler keine Kenntnis bezüglich der tatsächlichen Stellgliedposition besitzt, siehe Kapitel 5.3.2 „Dreipunktschrittregler“.

Bei beiden Verfahren wird die Struktur nach der Selbstoptimierung automatisch auf PID gesetzt und die Parameter X_P , T_n und T_v 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 erfolgt keine Strukturumschaltung durch die Selbstoptimierung.

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

Neben 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:

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

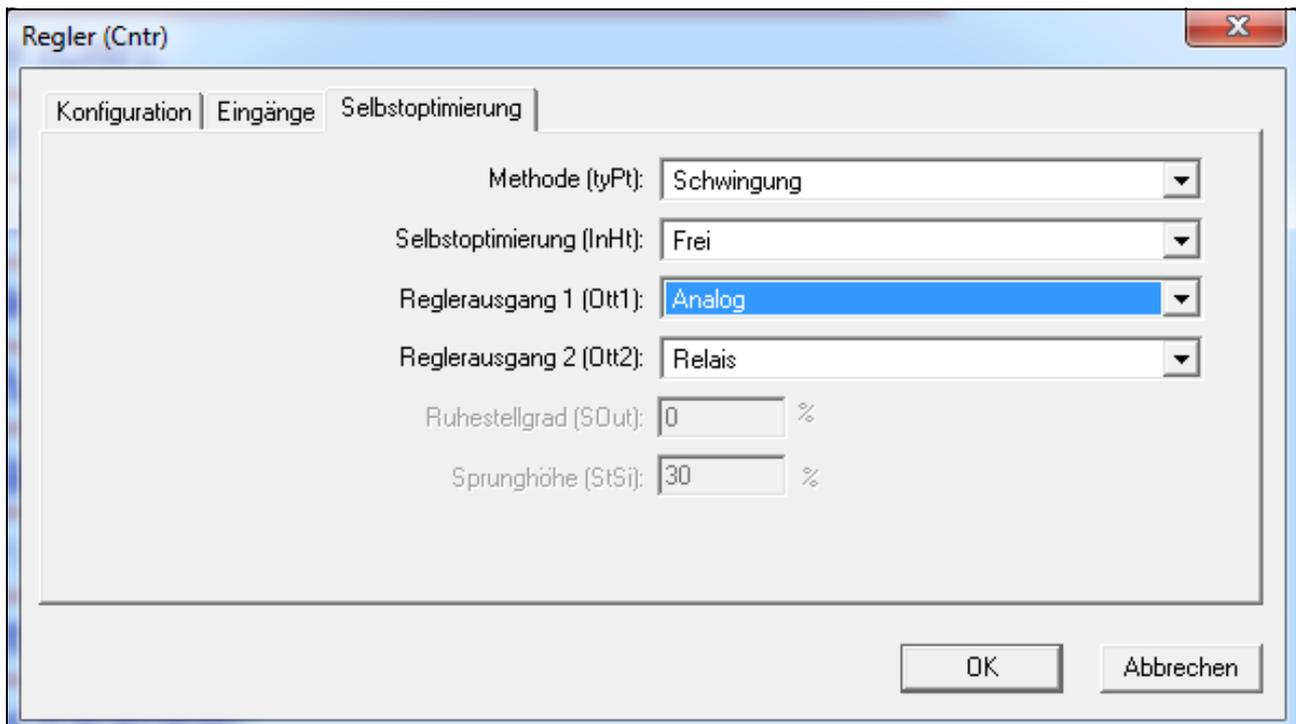


Abbildung 61: Art der Ausgänge für die Selbstoptimierung

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 bzw. Reglerausgang 2 einzustellen. In Frage kommen „Relais“ bzw. „Halbleiter + Logik“ aber auch „Analog“.

Unterscheidung der Einstellung „Relais“ und „Halbleiter + Logik“

Mit der Einstellung „Relais“ berechnet die Selbstoptimierung die Schaltperiodendauer so kurz wie nötig. Das Relais bzw. die nachgeschaltete Mechanik wird soweit als möglich geschont.

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

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

4.5 Kontrolle der Reglereinstellung für PID-Struktur

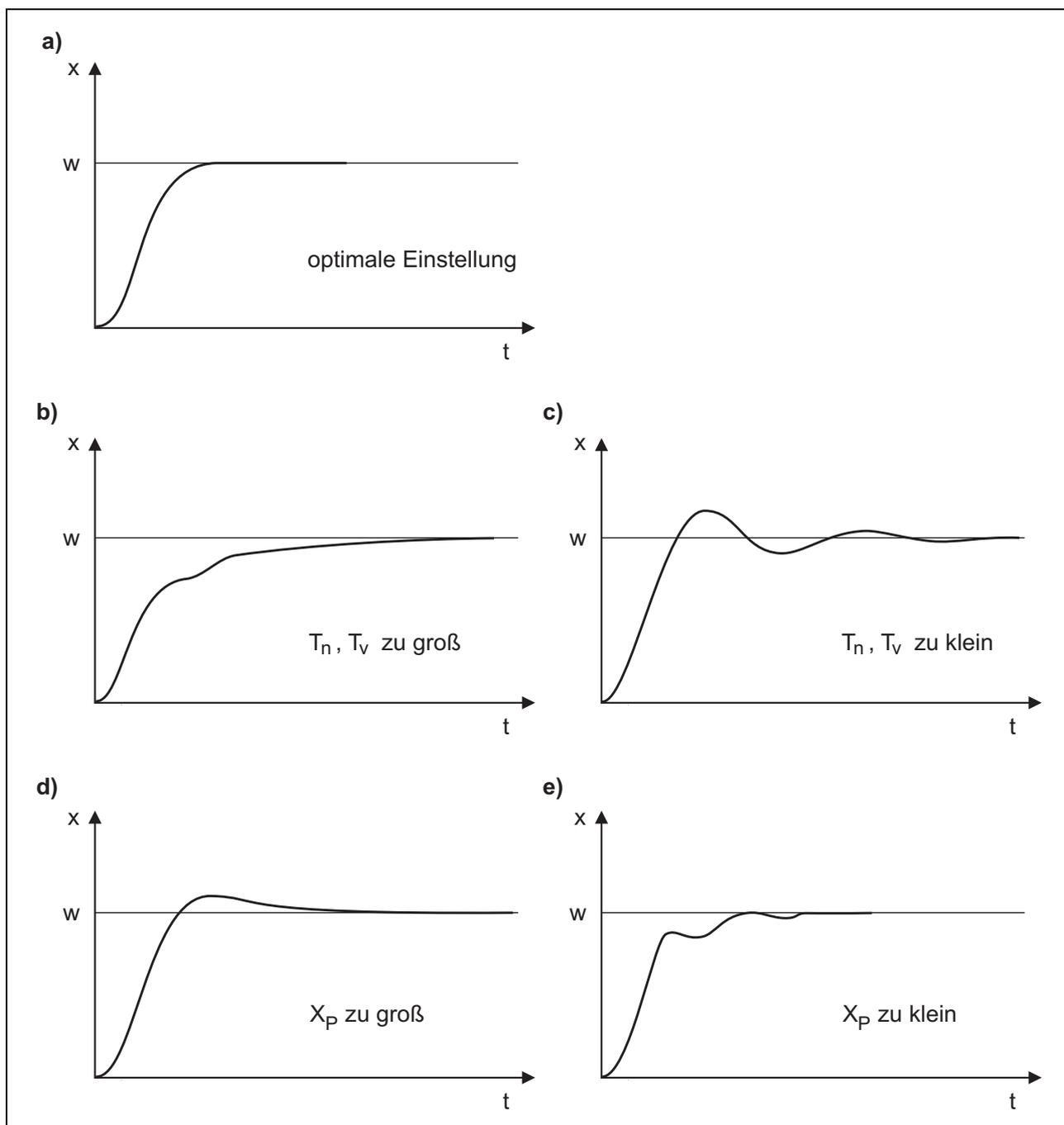


Abbildung 62: Hinweise auf mögliche Fehleinstellungen

Abbildung 62 zeigt das Regelverhalten von PID-Reglern mit Hinweisen zur Nachoptimierung.

- Das Diagramm zeigt ein optimales Verhalten für einen PID-Regler
- 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. Entsprechend dem Verhältnis $T_v / T_n = 1/4$ muss das T_v verkleinert werden.

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

- c) Mit dem Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich erhöht der I-Anteil den Stellgrad. Die Erhöhung 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. Bei 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. Entsprechend dem Verhältnis $T_v / T_n = 1/4$ findet ebenfalls ein zu kleines T_v Verwendung.
- 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 dem Aufbau seines 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 bei kleineren Regelabweichungen entsprechend langsamer mit dem Aufbau seines Stellgrades. Das dargestellte, einmalige Überschwingen wird unwahrscheinlicher.
- e) Bei einem 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. Es ergibt sich ein schwingendes Verhalten im Proportionalbereich.

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

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 entgegen wirkt.

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

Regelgröße	Meist (!) führt folgende Reglerstruktur zum besten Ergebnis
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 der wichtigsten Regelgrößen

4 Optimierung von Reglern/Auswahl der Reglerstruktur

5 Regler mit Binärausgängen

Dieses Kapitel behandelt Zweipunkt-, Dreipunkt-, Dreipunktschritt- 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-Ausgang ausgeführt sein.

Die Regler kommen für die Ansteuerung von binären Stellgliedern, wie Relais, Thyristor-Leistungsschaltern, 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:

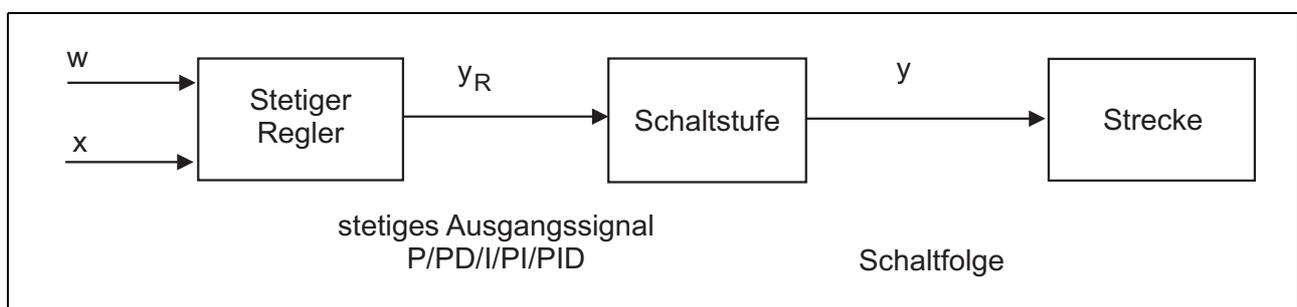


Abbildung 63: Zweipunktregler als stetiger Regler mit nachgeschalteter Schaltstufe

5.1.1 Zweipunktregler mit Impulslängenausgang

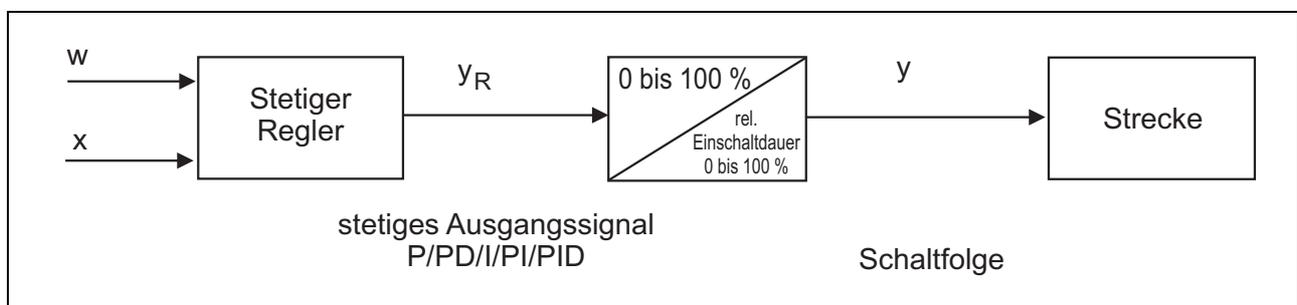


Abbildung 64: Zweipunktregler mit Impulslängenausgang

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

5 Regler mit Binärausgängen

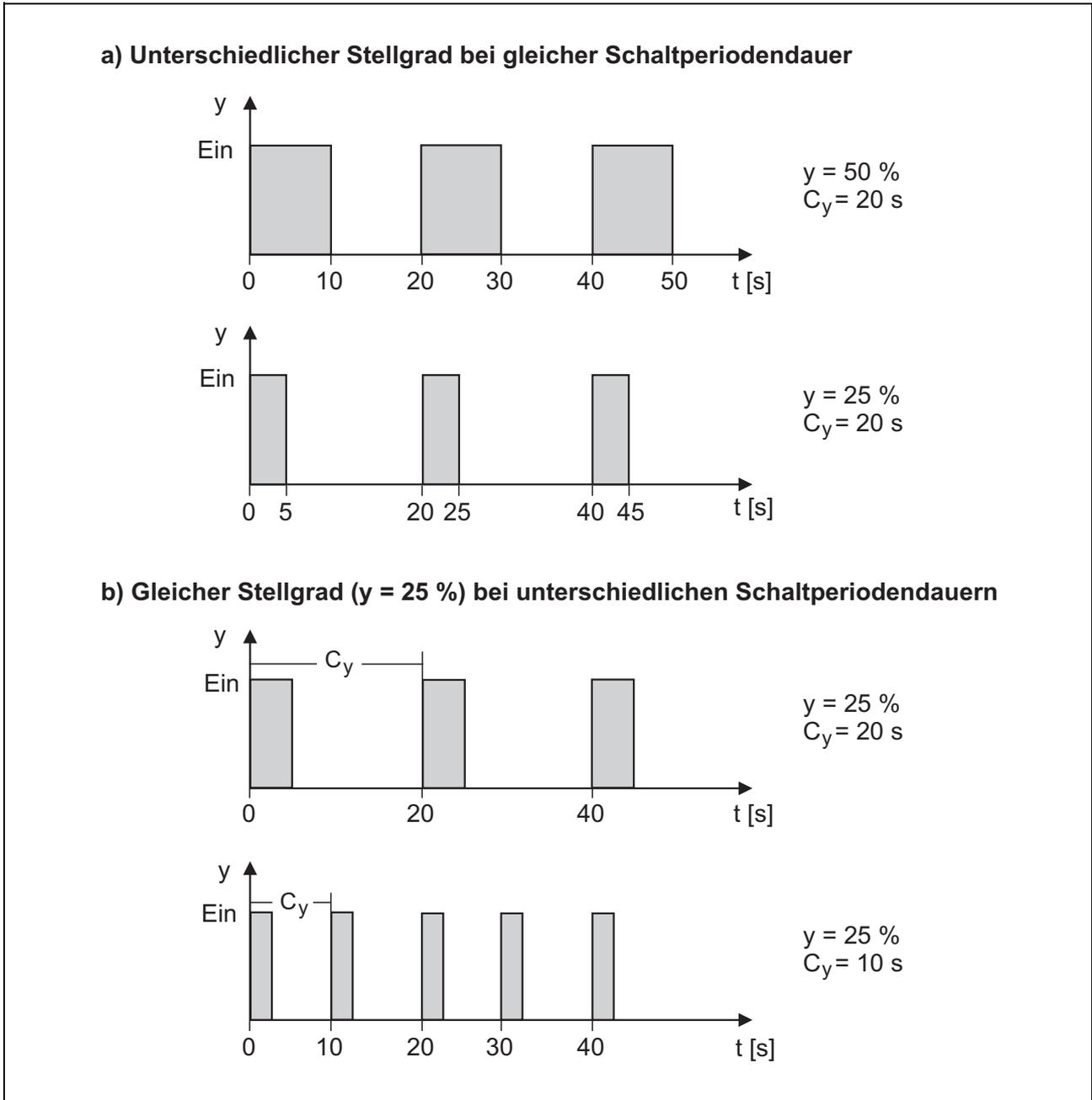


Abbildung 65: Zweipunktregler mit Impulslängenausgang

Abbildung 65 a) 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 so genannte Schaltperiodendauer C_y definiert. Innerhalb der Schaltperiodendauer schaltet der Ausgang einmal ein und aus, im Beispiel beträgt diese 20 s.

Bei einer für den Prozess zu groß eingestellten Schaltperiodendauer ergeben sich auch bei unverändertem Stellgrad Istwertschwankungen. In Abbildung 65 b) 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.

5 Regler mit Binärausgängen

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 und damit die höchste Regelgüte erreicht werden.

5.1.2 Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang

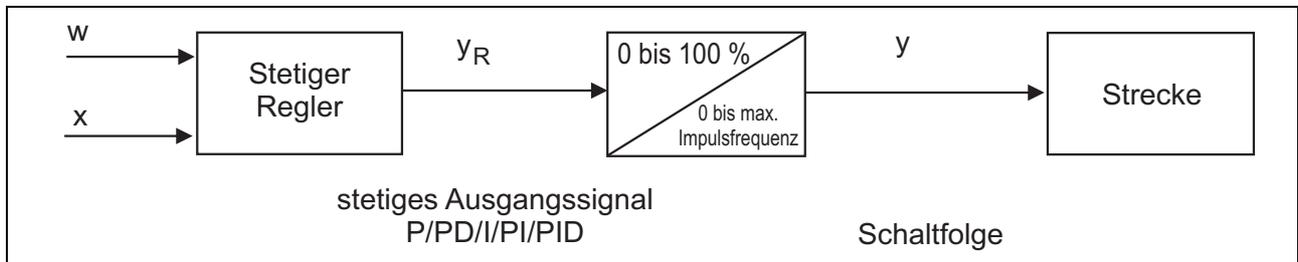


Abbildung 66: Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang

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 für die 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 neben der Schaltperiodendauer (C_y) die Einstellung der beschriebenen Mindestein- bzw. 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.

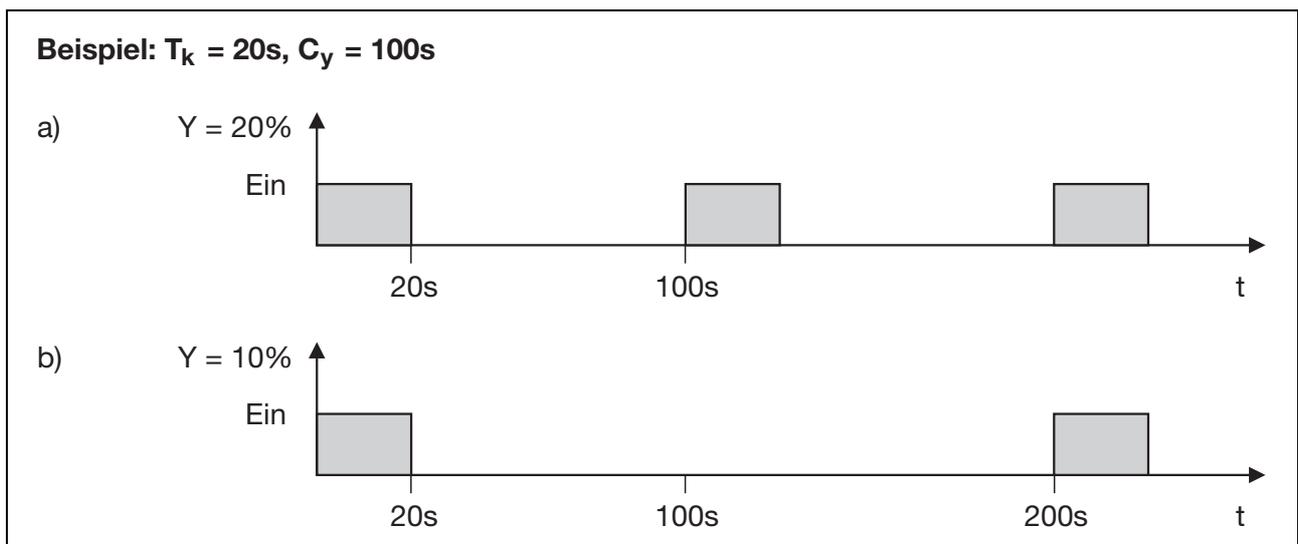


Abbildung 67: Ausgangssignal eines Zweipunktreglers $T_k = 20$ s

5 Regler mit Binärausgängen

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

In Abbildung 67 b) 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

Werden die in Kapitel 5.1.1 „Zweipunktregler mit Impulslängenausgang“ und Kapitel 5.1.2 „Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang“ beschriebenen Regler mit einem Proportionalbereich (X_p) von 0 betrieben, zeigt der Regler unstetiges Verhalten:

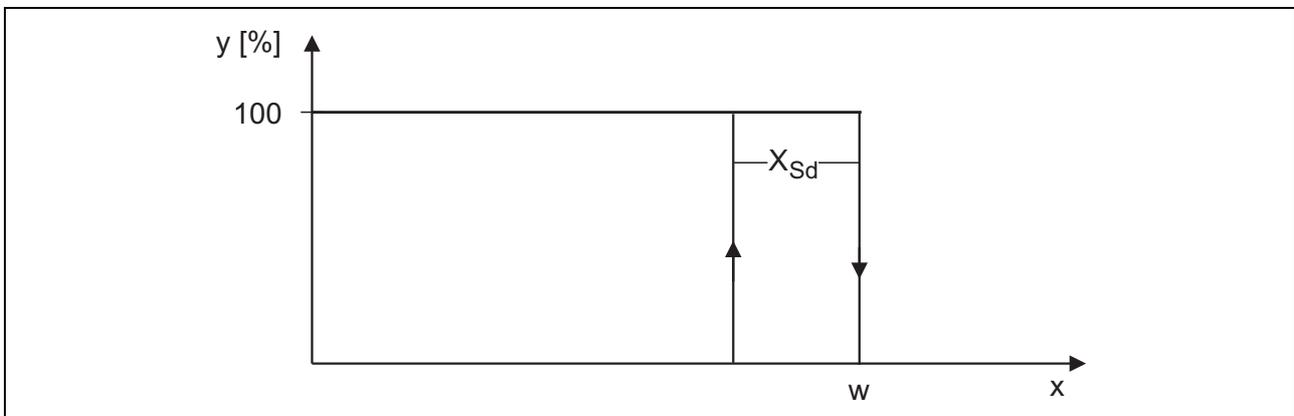


Abbildung 68: Kennlinie eines unstetigen Zweipunktreglers

Der Regler gibt 100 % Stellgrad aus bis bei steigendem Istwert der Sollwert erreicht wird. Liegt der Istwert über dem Sollwert beträgt der Stellgrad 0 %.

Bei 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.

Durch die Einstellung Proportionalbereich (X_p) = 0 arbeitet ein JUMO-Regler mit dem Parameter der Schaltdifferenz (X_{Sd}). Bei kleiner werdendem Istwert schaltet der Regler seinen Ausgang bei $x < (w - X_{Sd})$ ein.

5 Regler mit Binärausgängen

Regelverhalten eines unstetigen Zweipunktreglers an Strecken erster und höherer Ordnung

Verhalten beim Betrieb von Strecken erster Ordnung am Beispiel einer thermischen Anlage

Mit dem Einschalten der erkalteten Anlage wird sofort die Heizung aktiviert. Durch das Vorhandensein von nur einem Energiespeicher steigt die Temperatur sofort an (Abbildung 69). 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.

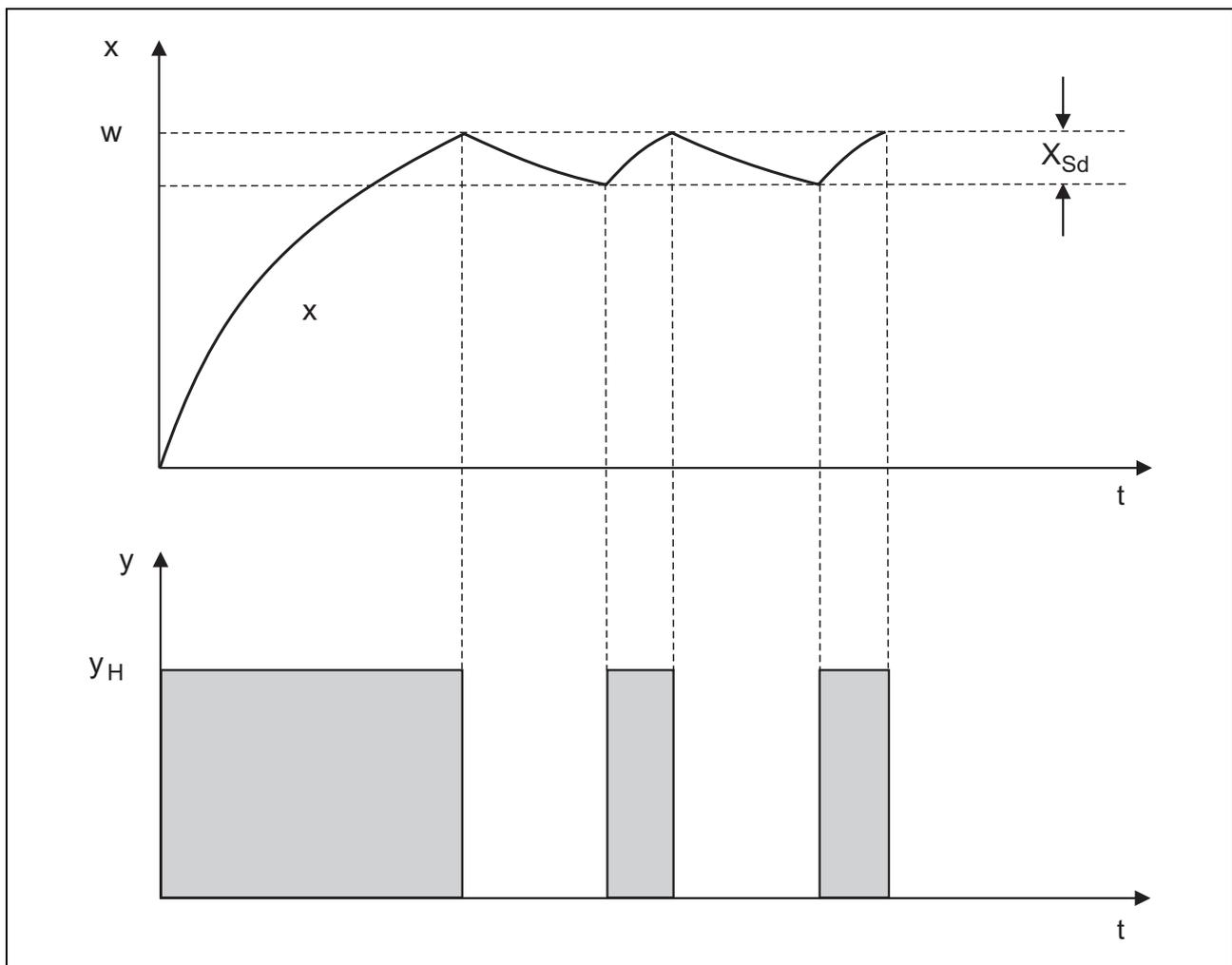


Abbildung 69: Unstetiger Zweipunktregler an einer Strecke 1. Ordnung

Verhalten beim Betrieb von Strecken höherer Ordnung am Beispiel einer thermischen Anlage

Mit dem Einschalten einer erkalteten Anlage schaltet die Heizung ebenfalls sofort ein (Abbildung 70). Da mehrere Energiespeicher vorhanden sind, steigt die Regelgröße erst nach einiger Zeit an (die Energiespeicher müssen erst geladen werden). Bei Erreichen des Sollwertes wird die Leistung auf 0 % zurückgenommen. Wegen der vorhandenen Verzugszeit T_u gelangt der Istwert über den Sollwert. Nach einiger Zeit fällt der Istwert ab und der untere Schalt­punkt wird erreicht. Die Heizung schaltet ein und der Istwert steigt zeitverzögert an.

5 Regler mit Binärausgängen

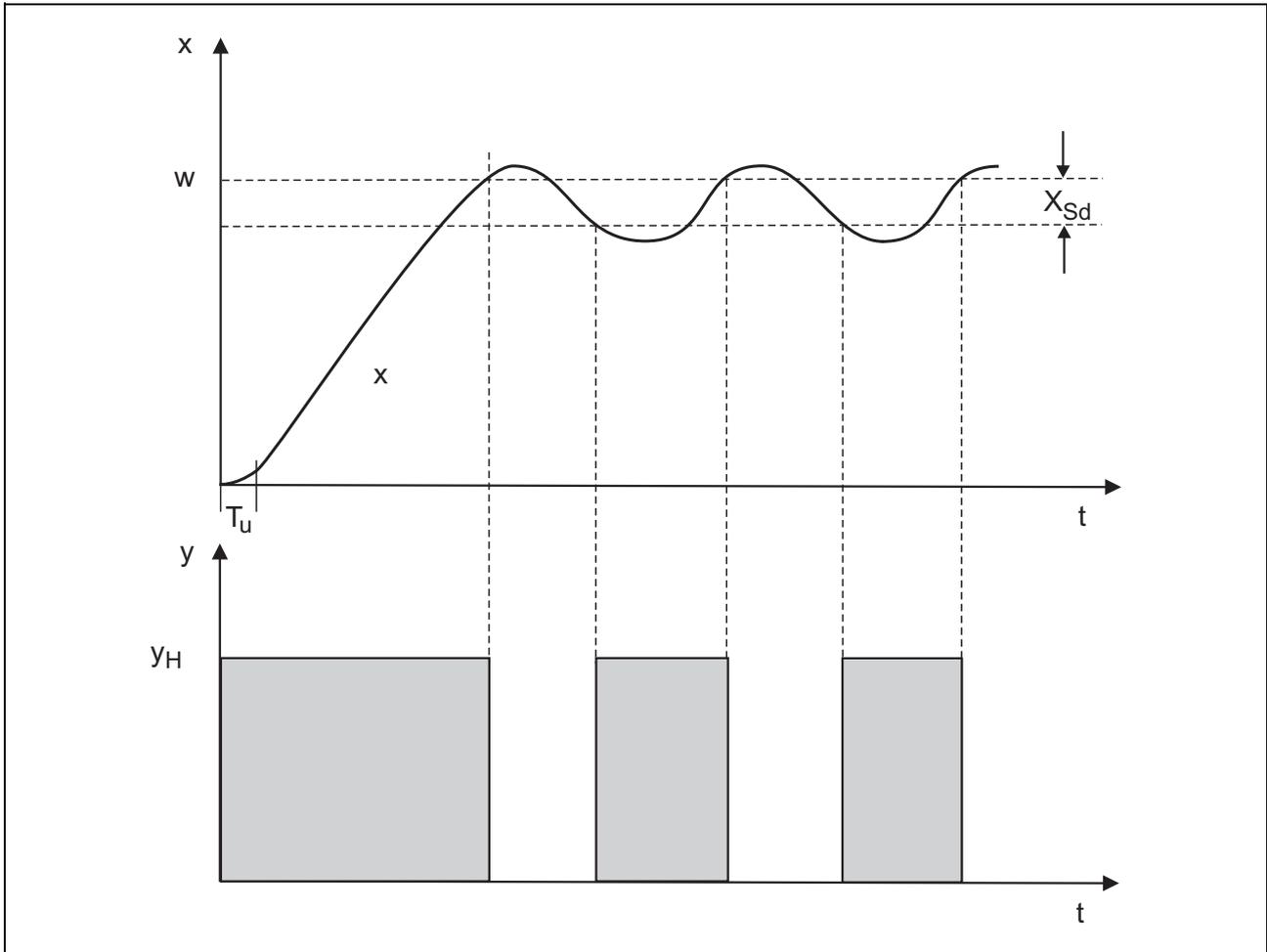


Abbildung 70: Unstetiger Zweipunktregler an einer Strecke höherer Ordnung

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

Fazit:

Regelungen mit einem unstetigen Regler sind z. B. in Form eines Thermostaten kostengünstig möglich. Diese Art der Regelung macht Sinn, wenn die resultierenden Schwankungen im Istwert nicht stören. Zweipunktregler werden in Kompaktreglern jedoch meist mit einem Proportionalbereich > 0 betrieben. Das Regelergebnis der Regler entspricht bei relativ trägen Regelstrecken dem von stetigen Reglern.

5.2 Dreipunktregler

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

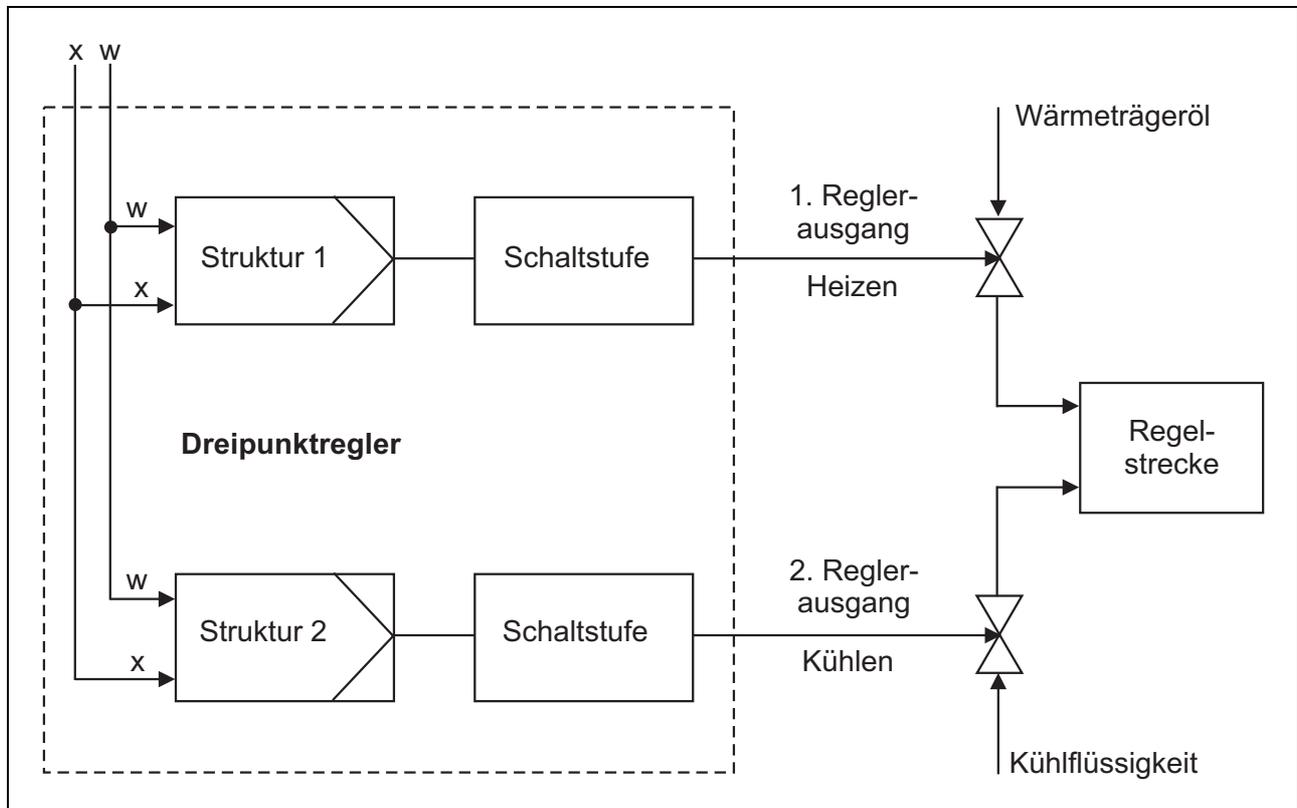


Abbildung 71: Aufbau eines Dreipunktreglers

Beim Dreipunktregler spricht man 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. Der Stellgrad wird direkt mit einem stetigen Ausgang ausgegeben oder bei Bedarf über eine Schaltstufe als Impulslängen- oder Impulsfrequenzausgang bereitgestellt.

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

Beide Strukturen sind unabhängig voneinander einstellbar (P, PD, I, PI und 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 Regler mit Binärausgängen

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 und der Istwert schwankt um den Sollwert. Das wechselhafte Ansteuern der Ausgänge für Heizen und Kühlen führt zu einem ineffektiven Betrieb der Anlage. Für Abhilfe kann hier der Kontaktabstand (X_{SH}) sorgen:

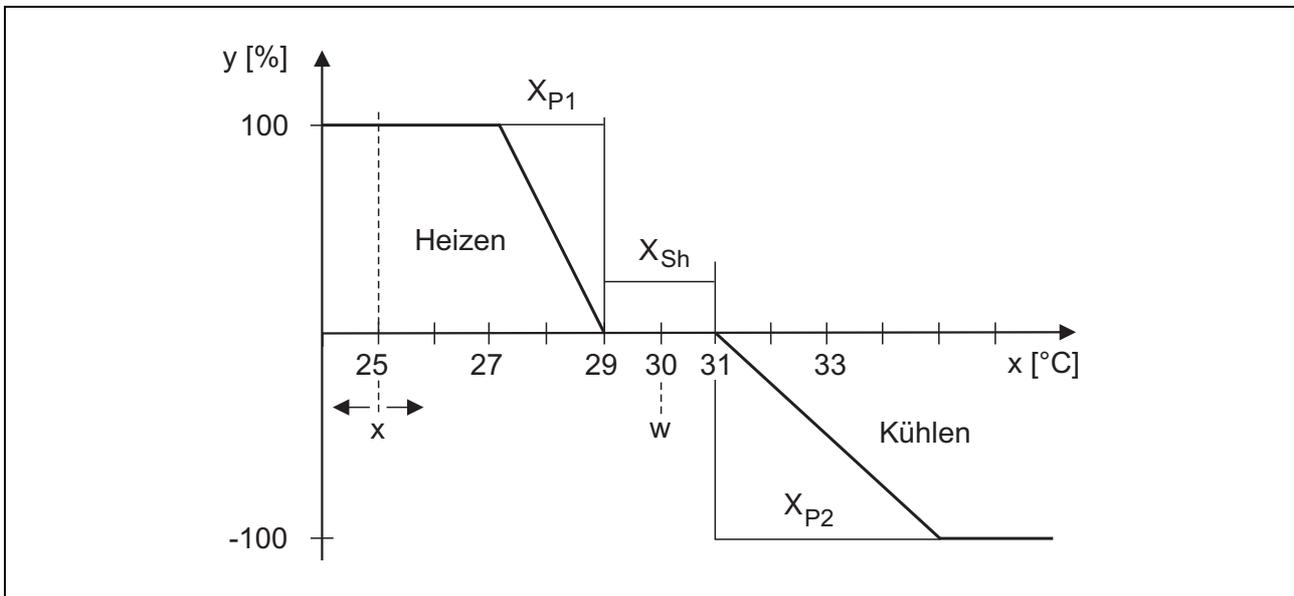


Abbildung 72: Dreipunktregler mit Kontaktabstand und P-Verhalten für Struktur 1 und 2

Abbildung 72 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 wurde 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 so genannten 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 72 den Stellgrad von 100 % (Reglerausgang 1 wird zu 100 % angesteuert) bis auf -100 % (Reglerausgang 2 wird zu 100 % angesteuert). Der Wirksinn ist invers.

5 Regler mit Binärausgängen

Die beiden Strukturen können den jeweiligen Stellgrad mit stetigem Ausgang, Impulslängen- und Impulsfrequenzausgang ausgeben. Weiterhin arbeiten beide Strukturen mit X_{P1} bzw. $X_{P2} = 0$ un-stetig:

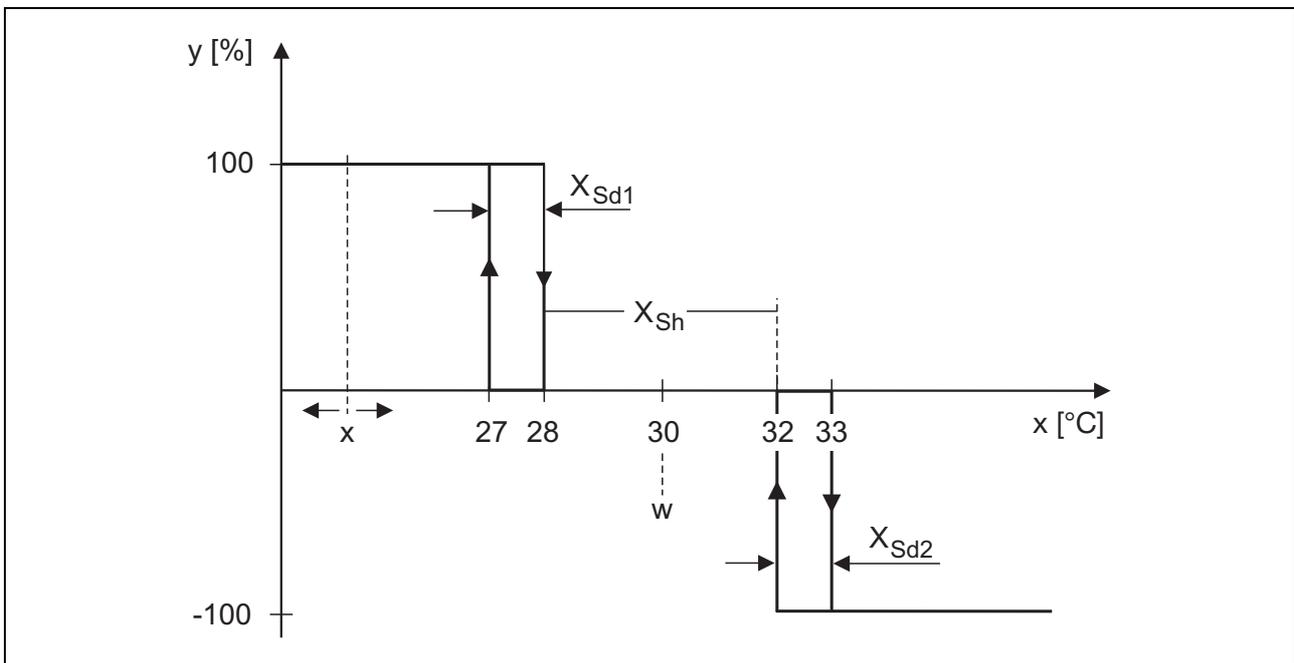


Abbildung 73: Dreipunktregler mit un stetigem Verhalten

Abbildung 73 zeigt das Regelverhalten für einen Dreipunktregler mit X_{P1} , $X_{P2} = 0$ K, X_{Sd1} , $X_{Sd2} = 1$ K und $X_{Sh} = 4$.

5 Regler mit Binärausgängen

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 Relais-Schließerkontakte auf die genannten Zuleitungen geschaltet:

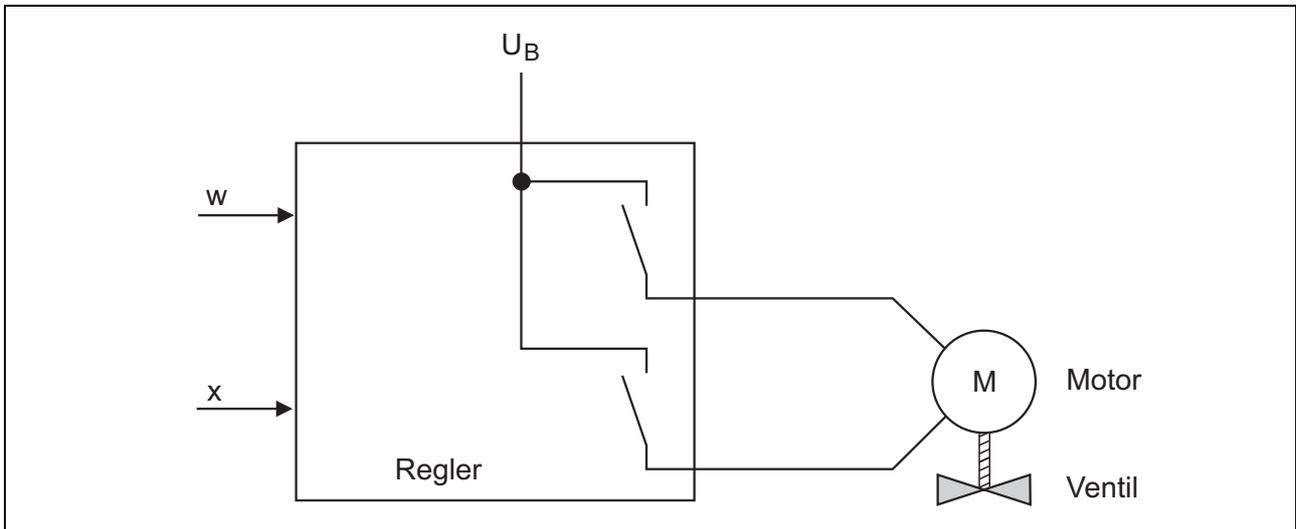
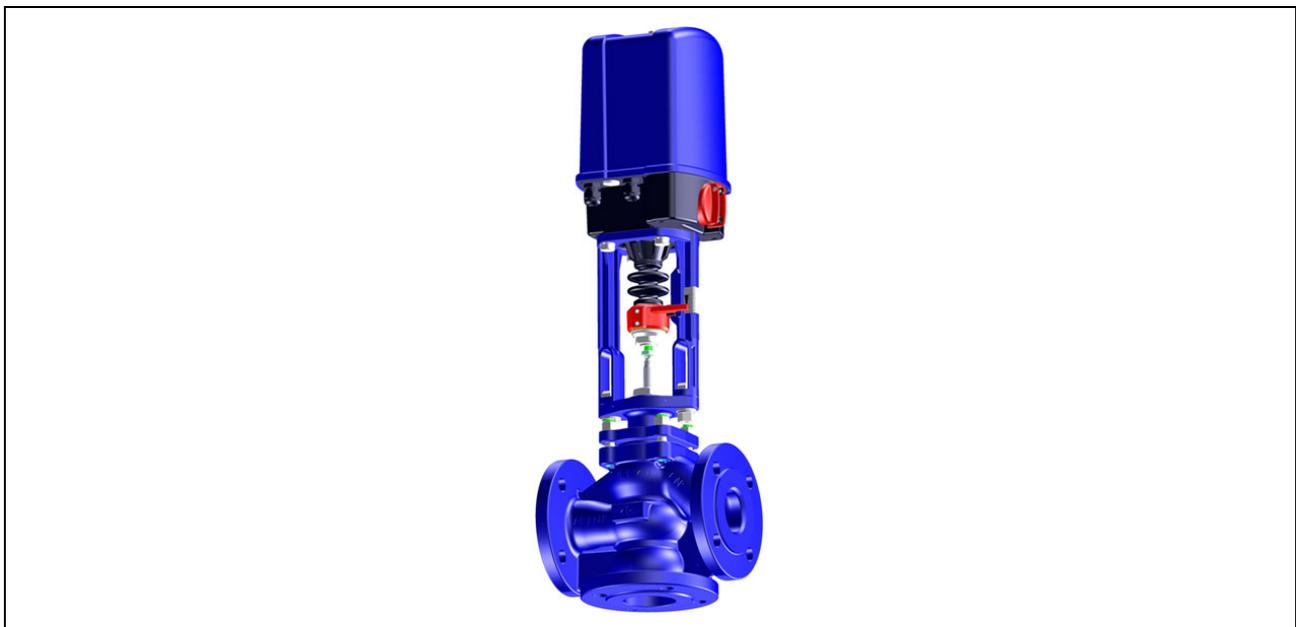


Abbildung 74: Ansteuerung eines Motorstellgliedes über zwei Relais-Schließerkontakte



**Abbildung 75: Motorstellglied bzw. Stellantrieb der Firma ARI-Armaturen
Albert Richter & Co. KG**

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

5 Regler mit Binärausgängen

5.3.1 Stellungsregler

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

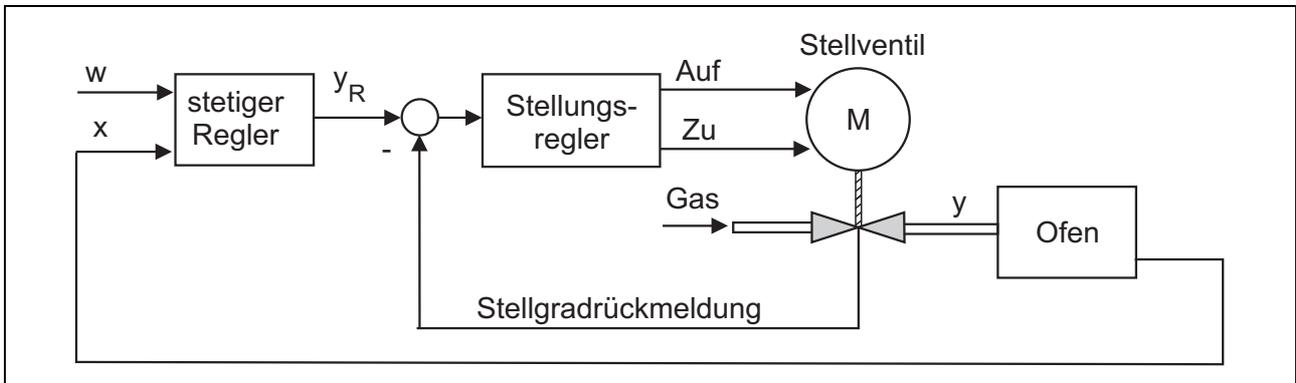


Abbildung 76: Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler im Regelkreis

Aufgrund der Regelparameter und Soll- bzw. Istwert liefert der Regler (Abbildung 76) 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. Diese geschieht beispielsweise über die in den Stellgliedern befindlichen Widerstandsfernegeber:

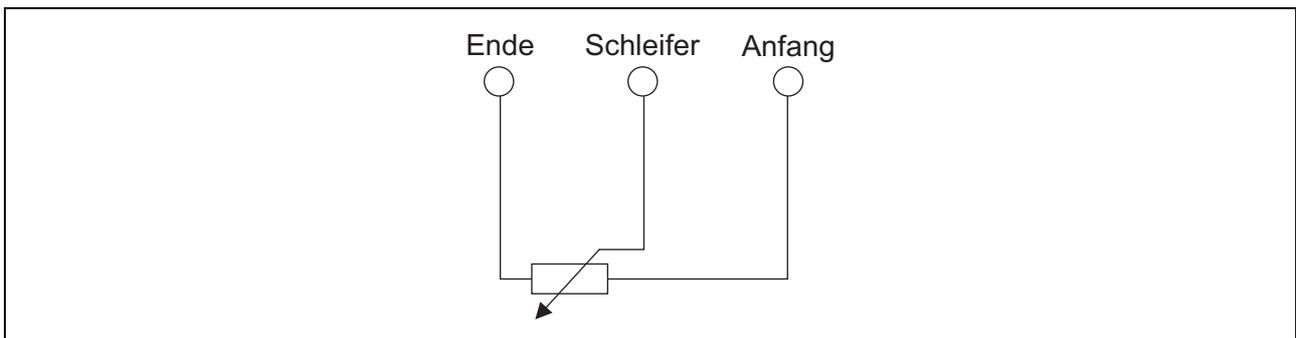


Abbildung 77: Prinzip Widerstandsfernegeber

Üblicherweise nimmt der 2. Analogeingang des Reglers die Stellgradrückmeldung auf. Der Istwert (in Abbildung 76 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.

5 Regler mit Binärausgängen

5.3.2 Dreipunktschrittregler

Im Vergleich zum Stellungsregler verzichtet der Dreipunktschrittregler auf die Stellgradrückmeldung. Der Regler kann keine definierten Positionen anfahren, sondern fährt das Stellglied nur weiter auf und zu:

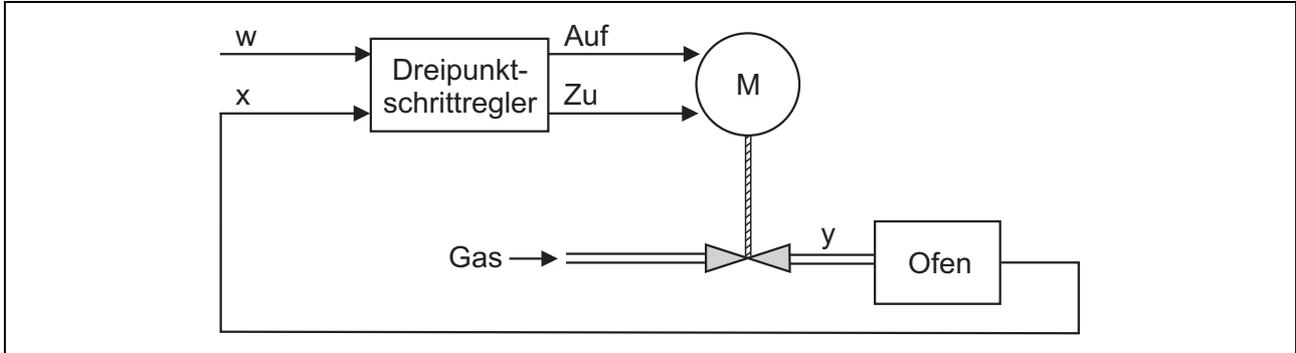


Abbildung 78: Der Dreipunktschrittregler mit Motorstellglied im geschlossenen Regelkreis

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 Dreipunktschrittregler mit PI-Struktur ($X_P = 25 \text{ K}$, $T_n = 120 \text{ s}$) und einer Stellgliedlaufzeit (TT) von 60 s beträgt Istwert = Sollwert = $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach der Erhöhung des Sollwertes beträgt die Regelabweichung 10 K (Abbildung 79).

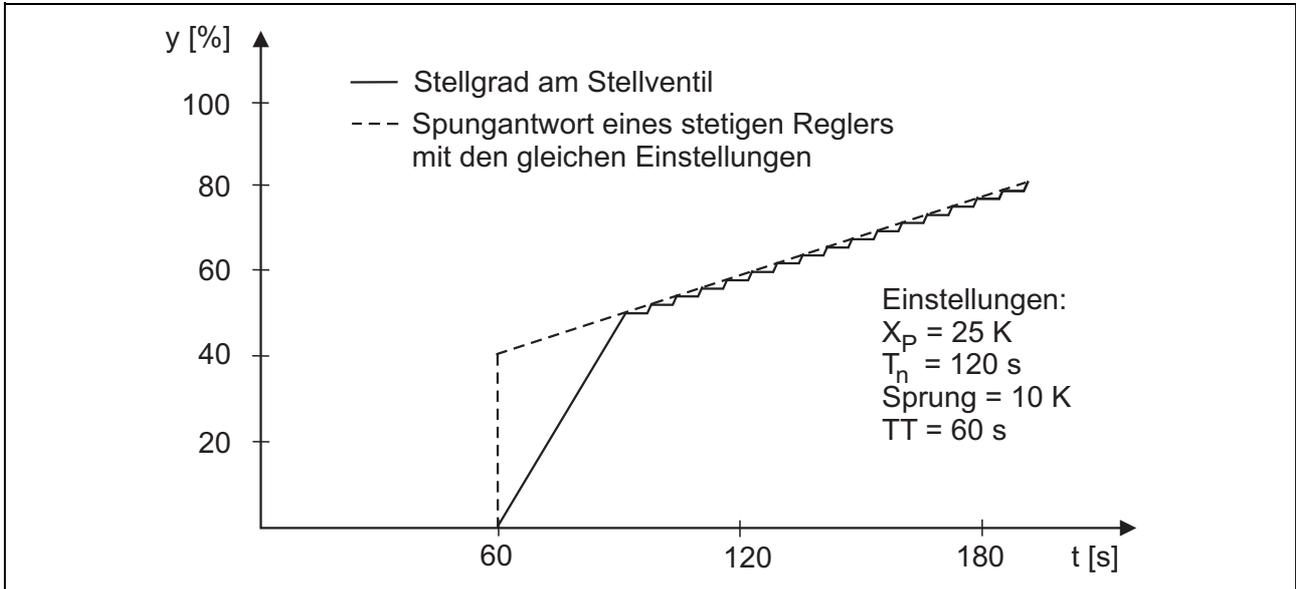


Abbildung 79: Sprungantwort des Systems Dreipunktschrittregler und Stellventil

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

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

5 Regler mit Binärausgängen

Aufgrund der Regelabweichung von 10 K und der Dimensionierung von $X_P = 25 \text{ K}$ und $T_n = 120 \text{ s}$ wird der I-Anteil mit einer Geschwindigkeit von $\frac{1 \%}{3 \text{ s}}$ erhöht.

Die genannte Stellgraderhöhung am Stellglied mit der Laufzeit von 60 s geschieht mit einer relativen Einschaltdauer des Relais von 20 %.

Während die Regelabweichung vorliegt, taktet der Regler das Stellglied immer weiter auf. Beim Dreipunktschrittregler kann es vorkommen, dass das Stellglied bereits offen ist, der Regler aber weiterhin auf steuert. Dieser Sachverhalt erfordert Endschalter in den Stellgliedern.

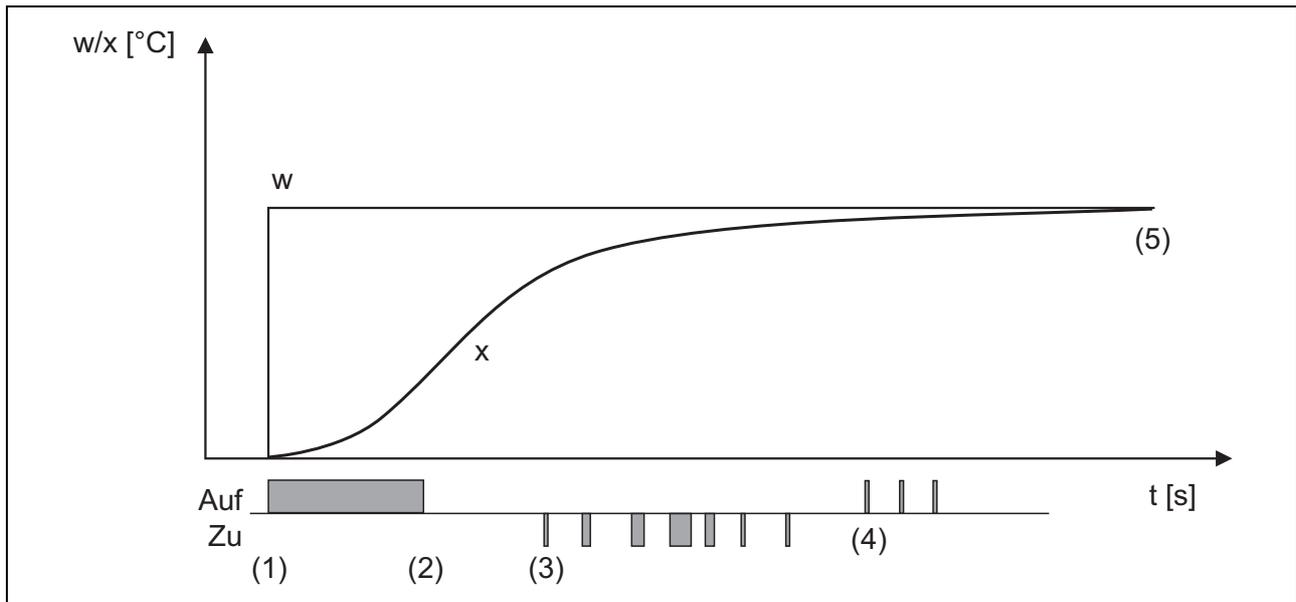


Abbildung 80: Führungsverhalten eines Dreipunktschrittreglers

Abbildung 80 zeigt Sollwert, Istwert und die beiden Reglerausgänge des Dreipunktschrittreglers: Bei (1) wird ein neuer Sollwert vorgegeben. 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 (3) 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. Der Dreipunktschrittregler steuert mit den beiden Reglerausgängen entsprechend der Stellgradveränderung und der Stellgliedlaufzeit das Ventil zu und später wieder auf. Ab (5) ist ausgeregelt, es erfolgt keine Ansteuerung der Reglerausgänge und das Ventil verharrt in seiner Position.

Der Handbetrieb

Wie mehrfach erwähnt, ist dem Dreipunktschrittregler 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 Regler mit Binärausgängen

5.3.3 Weitere Informationen zum Stellungs- und Dreipunktschrittregler

Kontaktabstand

Die Regler steuern ihre Ausgänge immer minimal für die Abtastzeit an, diese liegt bei JUMO-Reglern zwischen 50 und 250 ms. Mit diesem Sachverhalt begründet, kann der Dreipunktschritt- bzw. Stellungsregler die Regelabweichung nie ganz abbauen.

Beispielhaft ergibt sich für eine Stellgliedlaufzeit von 60 s und einer 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 auf- und zu gesteuert. 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 $w \pm 1/2 X_{Sh}$ einstellen.

Praktische Einstellung für den Kontaktabstand

Wird das Stellglied nach der Regleroptimierung im Bereich des Sollwertes wechselnd auf und zu gefahren, ist eine Einstellung für den Kontaktabstand von größer 0 erforderlich. Der Parameter wird solange vergrößert, bis im Bereich des Sollwertes kein wechselndes Auf- und Zufahren erfolgt. Das Stellglied wird somit nicht unnötig beansprucht.

Vergleich Stellungsregler - Dreipunktschrittregler

Vorteile Stellungsregler

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

Stellungsregler ermöglichen den relativ einfachen Aufbau von Split-Range-Regelungen.

Vorteile Dreipunktschrittregler

Aufgrund einer – von der Stellgradrückmeldung unabhängigen – Regelung bietet der Dreipunktschrittregler eine höhere Betriebssicherheit.

Die Regelung kann mit einem Dreipunktschrittregler kostengünstiger aufgebaut werden und ist für viele Applikationen ausreichend.

6 Spezielle Reglerschaltungen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Reglerschaltungen verfolgen hinsichtlich der Anlage folgende Ziele:

- kostenoptimierter Aufbau
- einfachere Regelbarkeit
- ressourcen- und kostenoptimierter Betrieb
- Konstanthalten von 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.

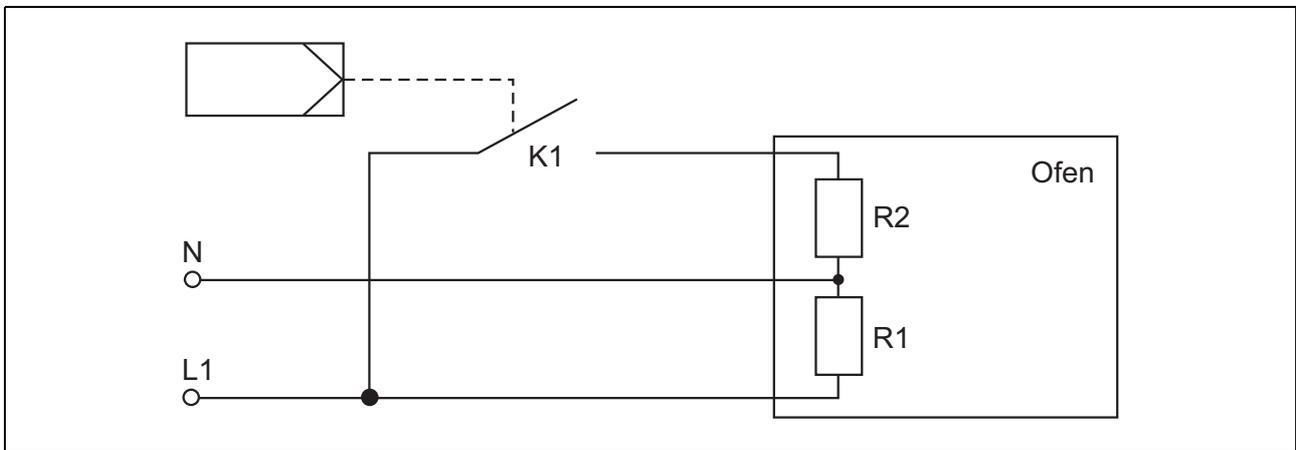


Abbildung 81: Grundlastvorgabe

Im Beispiel (Abbildung 81) wird Heizung 1 kontinuierlich eingeschaltet, der Regler steuert nur Heizung 2. Die Grundlastvorgabe ermöglicht eine kleinere Dimensionierung des Stellgliedes. Weiterhin ist bei elektrischer Beheizung und Verwendung von Zweipunktreglern die wechselnde Netzbelastung geringer. Sollte für den Regler eine Störung vorliegen, wird der Prozess weiterhin mit der Grundlast betrieben.

6 Spezielle Reglerschaltungen

6.2 Zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern

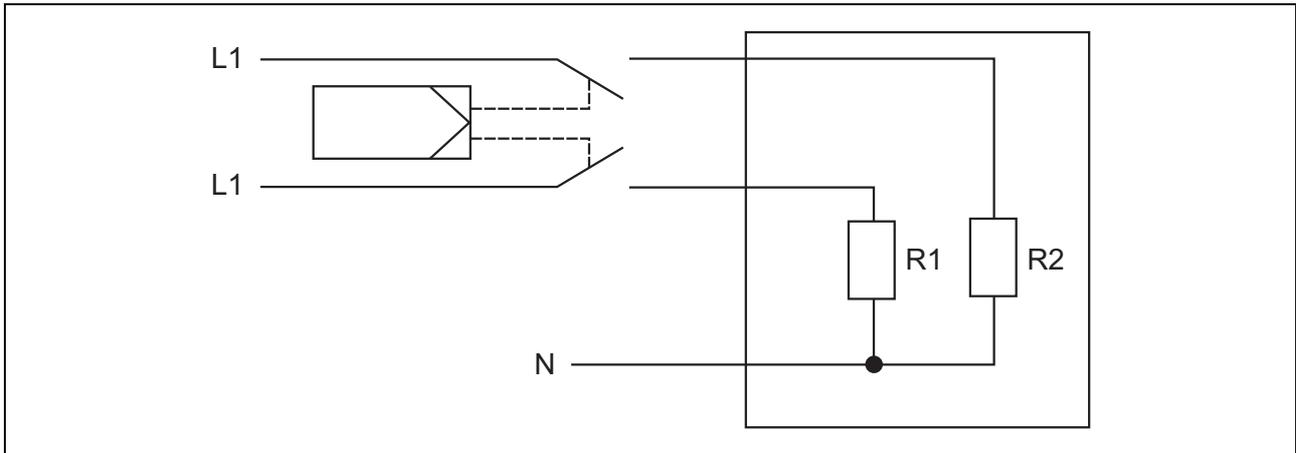


Abbildung 82: Zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern

Das Beispiel (Abbildung 82) zeigt die zweistufige Ansteuerung von Stellgliedern: Für den schematisch dargestellten Ofen werden zum Anheizen Heizung 1 + 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 Thyristor-Leistungssteller) oder binäre Stellglieder (wie Thyristor-Leistungsschalter) 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.

6 Spezielle Reglerschaltungen

Bei verhältnismäßig kleinen Sollwerten ist der Leistungsbedarf in den Anlagen generell gering. Entsprechend wird dem Stellglied eine relativ kleine Leistung abverlangt. Ein Zweipunktregler variiert die mit einem binären Stellglied ausgegebene Leistung über Taktung. Das Stellglied gibt im Wechsel volle, bzw. keine Heizleistung an das System. Ein überschwingungsfreies Anfahren an den relativ kleinen Sollwert und generell das Erreichen eines stabilen Istwertes ist nur schwer möglich. Die Verwendung von zwei Stellgliedern bietet hier ggf. die Lösung (Struktur wie in Abbildung 82). Im Fall eines relativ kleinen Sollwertes wird nur Stellglied 1 getaktet (Abbildung 83), der Leistungsüberschuss ist relativ gering. Bei Überschreiten eines definierten Sollwertes werden beide Stellglieder getaktet.

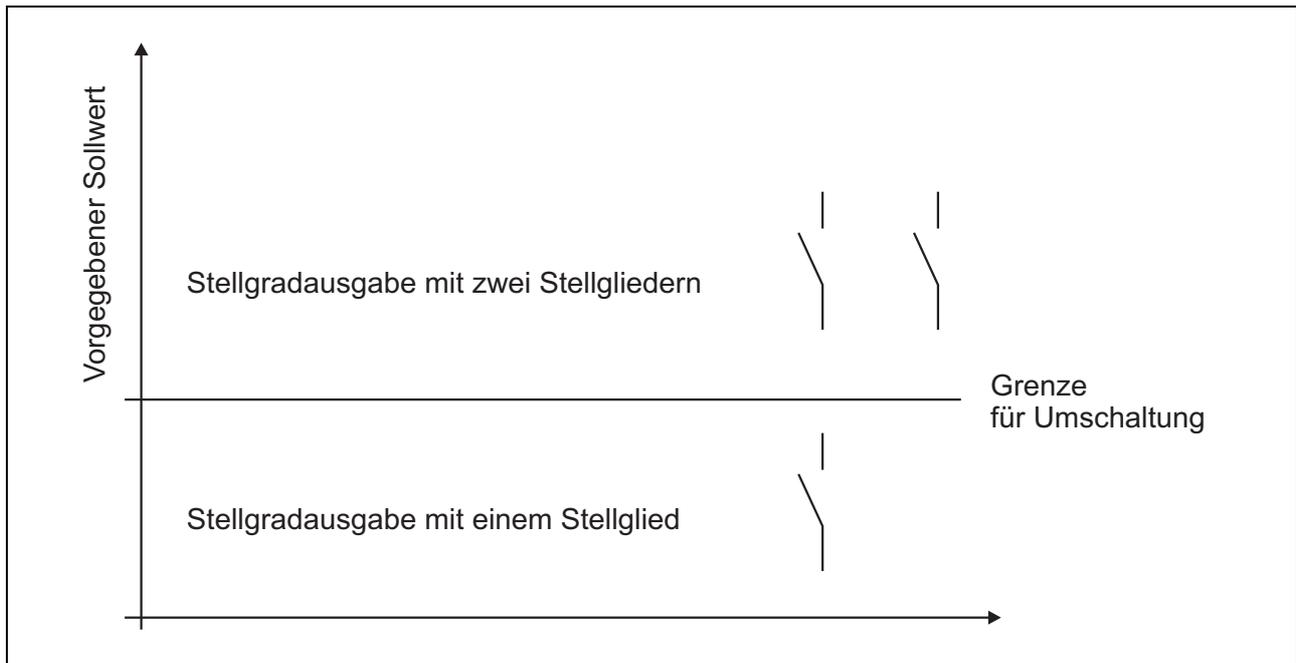


Abbildung 83: Ansteuerung von einem oder zwei Stellgliedern – je nach Höhe des eingestellten Sollwertes

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).

6 Spezielle Reglerschaltungen

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. Im dargestellten Schema ermöglicht der Split-Range-Betrieb den energieeffizienten Betrieb einer Kühlanlage:

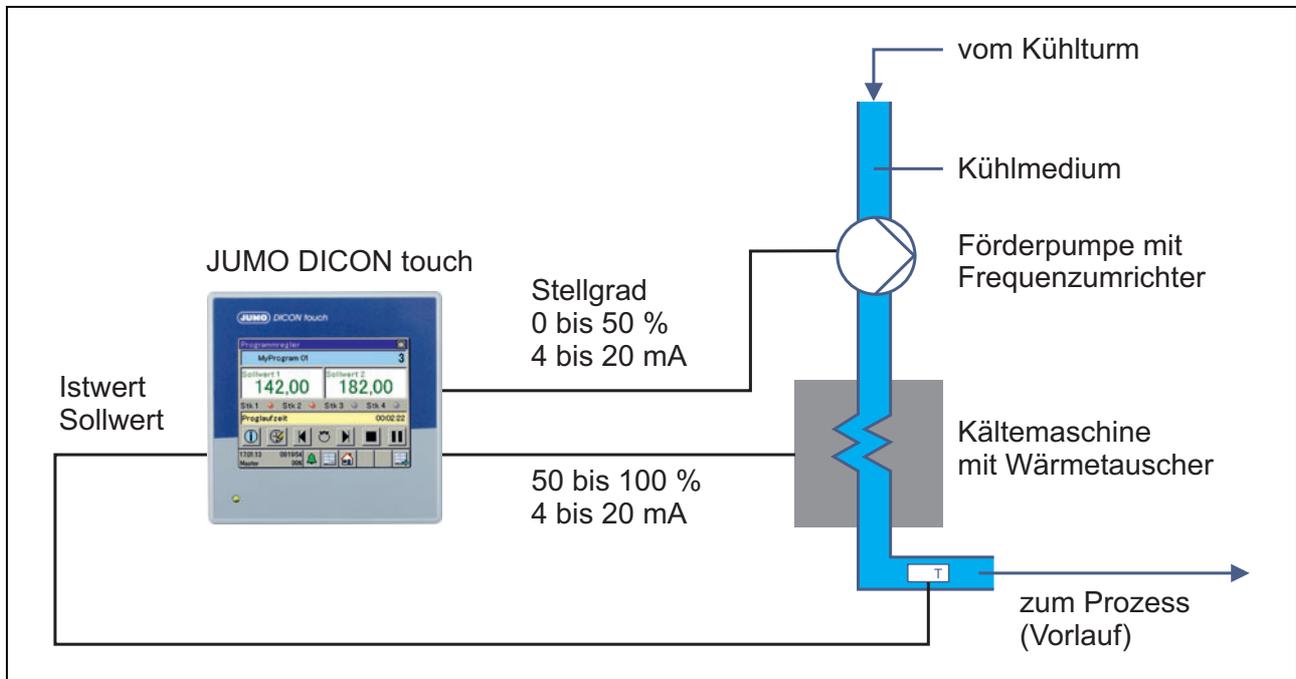


Abbildung 84: Split-Range-Betrieb einer Kühlanlage

Die Kühlanlage stellt Kühlflüssigkeit mit einer geforderten Vorlauftemperatur für einen Prozess bereit. Bei niedrigen Außentemperaturen erfolgt die Kühlung ressourcenschonend und kostengünstig mit Hilfe 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 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 es resultiert Übergangsweise eine Regelabweichung. In der Folge variiert der Regler seinen Stellgrad und regelt den Istwert wieder auf den Sollwert. Insbesondere bei häufigen Störgrößenänderungen kann der beschriebene Sachverhalt zu einem unbefriedigendem Regelergebnis führen. Im dargestellten Fall wird eine Störgröße konstant gehalten:

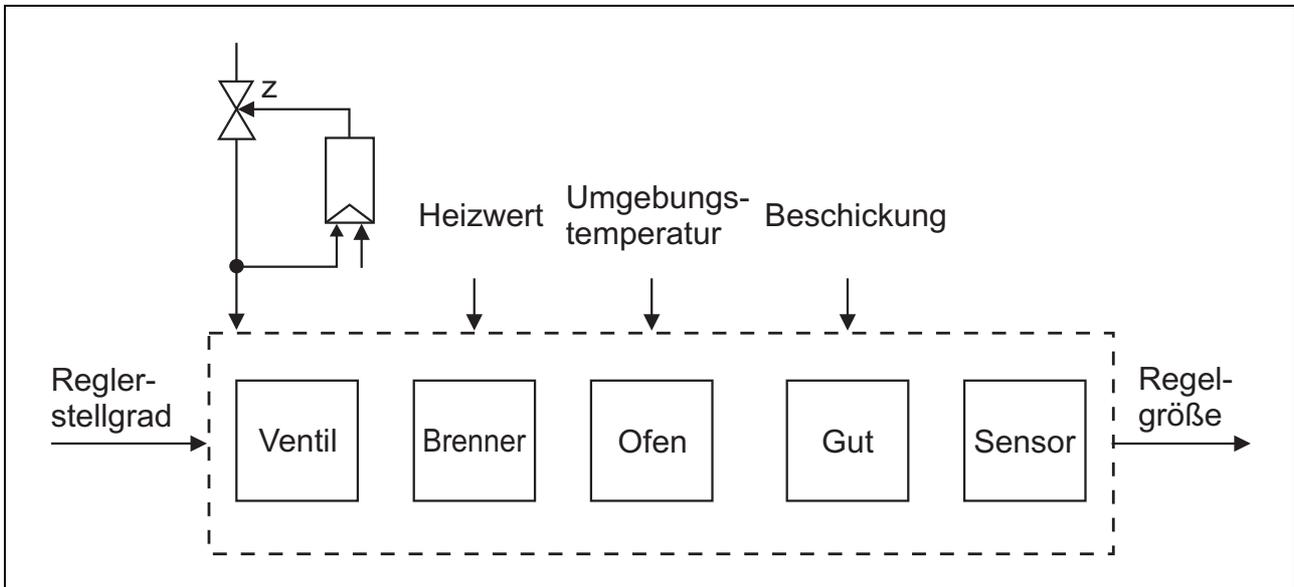


Abbildung 85: Konstanthalten der Störgröße Gasdruck in einem gasbetriebenen Ofen

Wie in Kapitel 2.1 „Allgemeines zur Regelstrecke“, Seite 19, beschrieben, ist im Fall eines gasbetriebenen Ofens der Gasdruck eine der Störgrößen (Abbildung 85). 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. Das Konstanthalten des Versorgungsdruckes für das Ventil beseitigt den Einfluss auf die Ofentemperatur. Die Realisierung kann über einen Druckminderer (in Abbildung 85 als Regler mit Ventil dargestellt) erfolgen.

6 Spezielle Reglerschaltungen

6.5 Störgrößenaufschaltung

Wie beschrieben, führt die Veränderung von Störgrößen zu einer temporären Regelabweichung. Der Regler reagiert mit einer Stellgradänderung und regelt den Istwert wieder auf den Sollwert.

Der Reglerstellgrad kann in Abhängigkeit der Störgröße zusätzlich beeinflusst werden. Diese Stellgradänderung verkleinert die auftretende Regelabweichung bei Störgrößenänderung. Möglich ist diese so genannte 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:

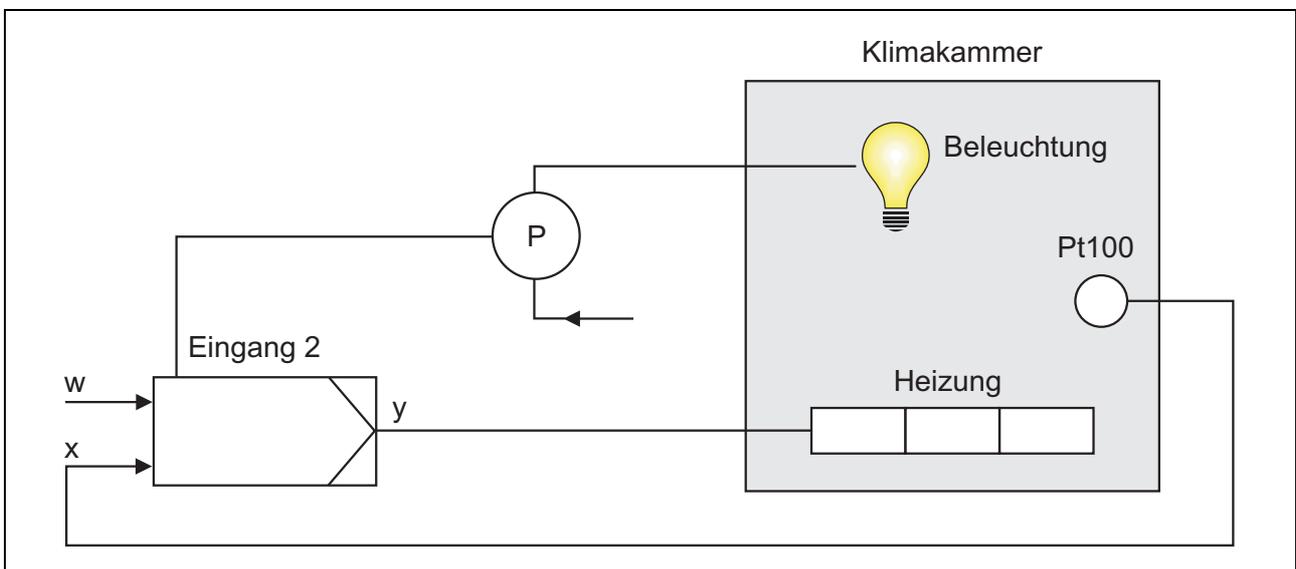


Abbildung 86: Beispiel für eine Additive Störgrößenaufschaltung

In der Klimakammer (Abbildung 86) 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:

6 Spezielle Reglerschaltungen

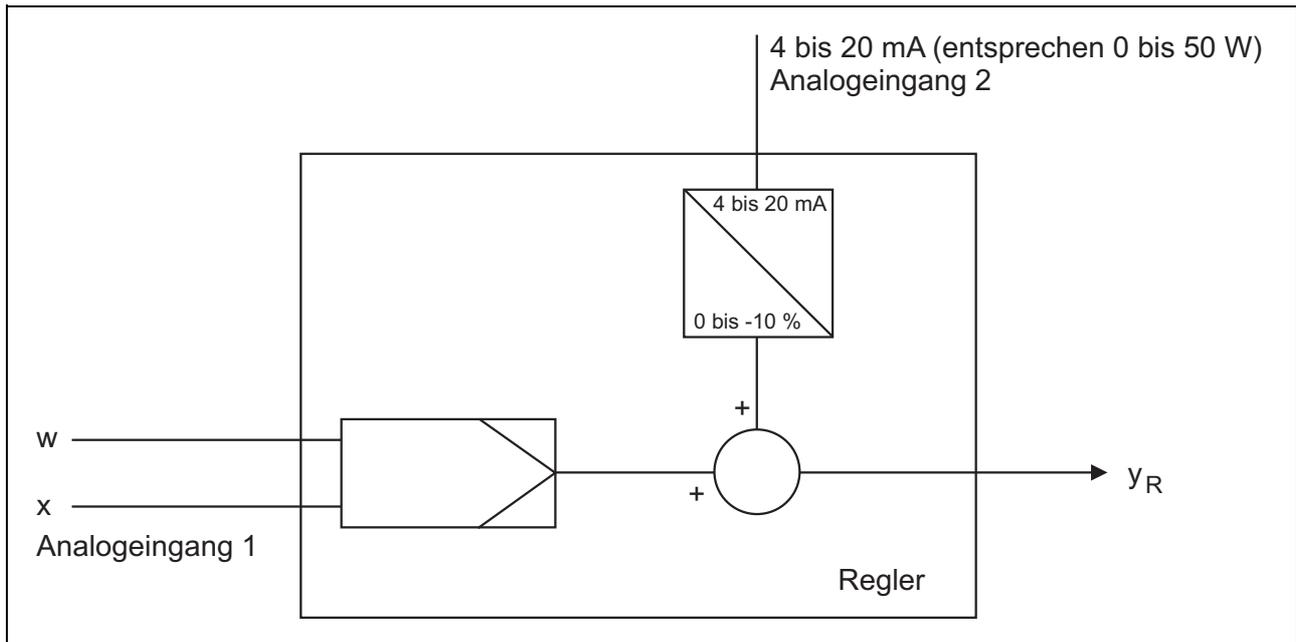


Abbildung 87: Verwendung der Additiven Störgrößenaufschaltung

Im Beispiel (Abbildung 87) 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. Bei Erhöhung der Beleuchtungsstärke wird der Vergrößerung des Istwertes entgegen gewirkt.

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.

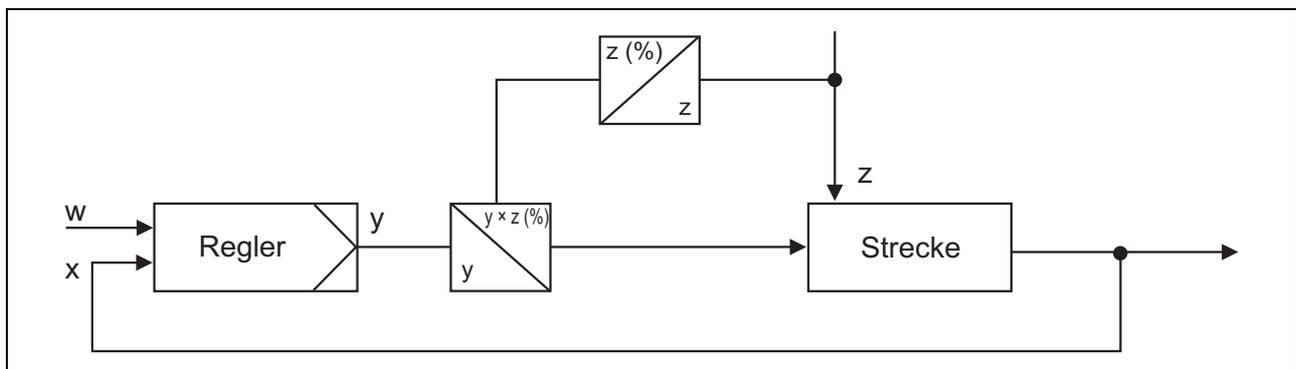


Abbildung 88: Schema der Multiplikativen Störgrößenaufschaltung

Aus der Störgröße (z) wird ein Prozentwert gebildet [z (%)], siehe Abbildung 88. Der Reglerstellgrad wird mit z (%) multipliziert.

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

6 Spezielle Reglerschaltungen

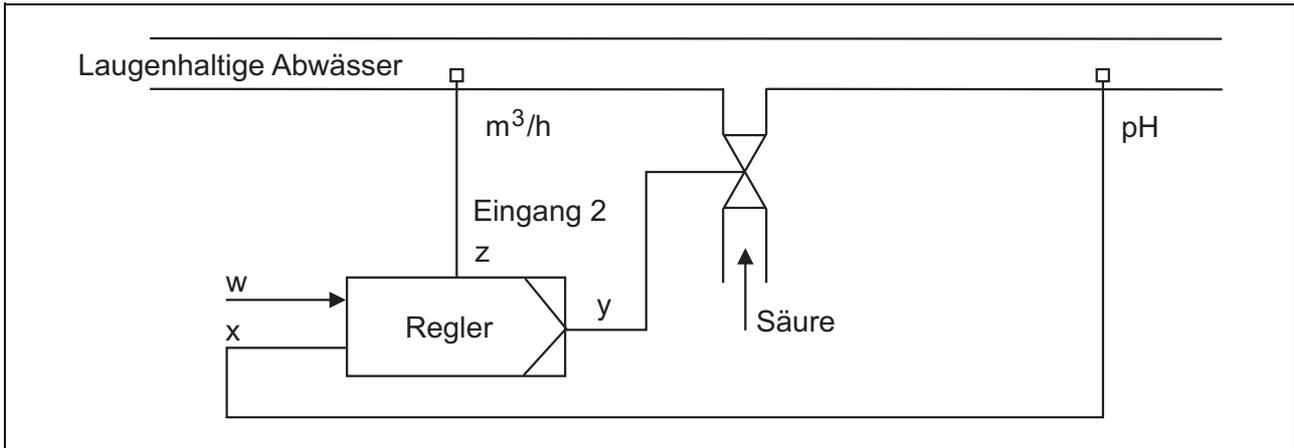


Abbildung 89: Neutralisationsanlage

Als Beispiel dient eine Neutralisationsanlage (Abbildung 89), in dieser wird zur Neutralisation von laugenhaltigen Abwässern Säure zugegeben. Ziel ist die Erreichung eines Sollwertes von pH 7 für die Abwässer.

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“. Eingang 2 wird beispielsweise skaliert auf 4 bis 20 mA/0 bis 100 %. 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 der Störgröße Durchfluss.

Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke wird im Beispiel stark von der Störgröße Durchfluss beeinflusst: Beeinflusst eine Stellgradänderung bei kleinem Durchfluss die Regelgröße stark, ist die Beeinflussung bei großem Durchfluss gering. Für einen großen Durchfluss ergibt sich eine geringe Streckenverstärkung, bei einem kleinem Durchfluss ist die Streckenverstärkung hoch. Die Gesamtverstärkung von Regler und Regelstrecke ergibt sich aus:

$$K_p \cdot K_S \quad (31)$$

K_p Proportionalverstärkung des Reglers
 K_S Übertragungsbeiwert der Regelstrecke

Wurde der Regler für einen relativ großen Durchfluss optimiert, liegt ein relativ großes K_p vor (das K_S relativ klein). Bei Vorliegen eines kleineren Durchflusses wird durch den höheren Übertragungsbeiwert die Gesamtverstärkung größer, möglicherweise wird der Regelkreis instabil. Die Störgrößenaufschaltung verändert proportional zur Störgröße die Proportionalverstärkung des Reglers. Verändert sich der Übertragungsbeiwert antiproportional zur Störgröße, bleibt bei beliebiger Störgröße die Gesamtverstärkung $K_p \times K_S$ konstant und der Prozess bei veränderter Störgröße beherrschbar.

6.6 Kaskadenregelung

Die Kaskadenregelung teilt Zeitglieder einer Regelstrecke auf mindestens zwei Regler auf. Generell kann die Struktur eingeführt werden, wenn in einer Regelstrecke ein Hilfsistwert (x_H) mess-technisch erfasst und dieser proportional zum Reglerstellgrad ausgeregelt werden soll.

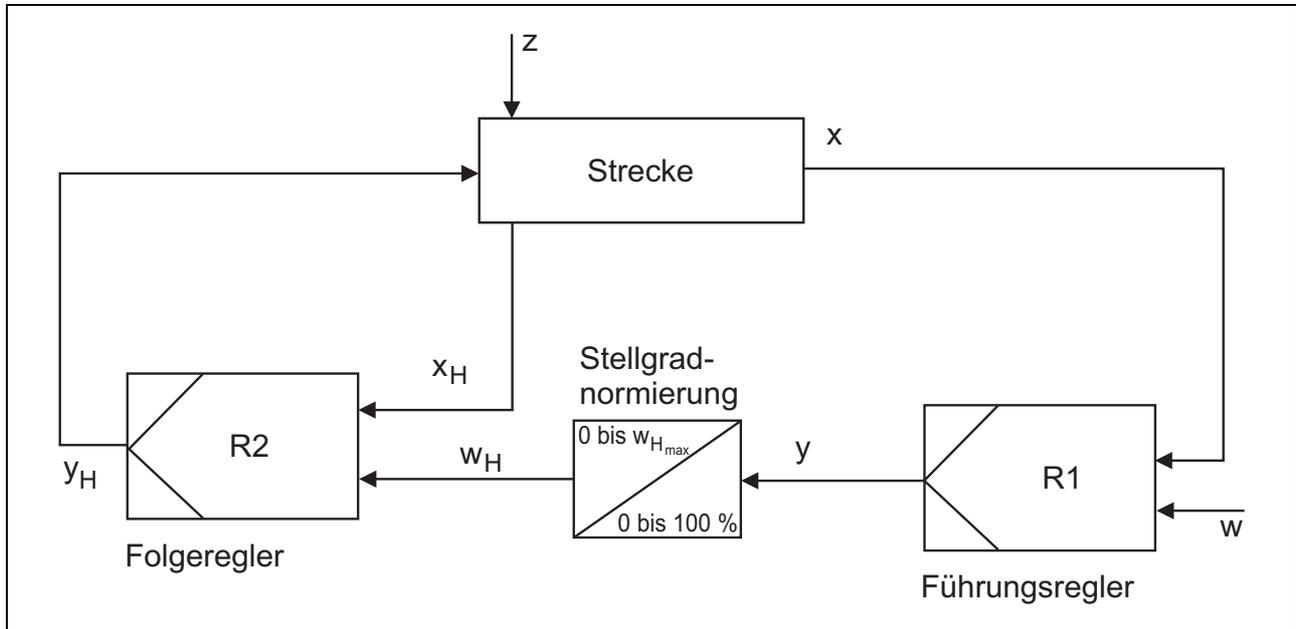


Abbildung 90: Kaskadenregelung

Der eigentliche Sollwert und der Anlagen-Istwert werden dem Führungsregler aufgeschaltet. Aus dem vom Führungsregler ermittelten Stellgrad wird durch die Stellgradnormierung der Sollwert für den Folgeregler gebildet. Der Folgeregler regelt auf einen Hilfssollwert (w_H) proportional zum Stellgrad des Führungsreglers.

Gründe für die Einführung der Kaskadenregelung:

- Beherrschung des Prozesses bzw. Erreichung einer höheren Regelgüte bei Strecken höherer Ordnung
- Begrenzung der Leistung in der Regelstrecke bzw. des Hilfsistwertes
- Kompensation von Störgrößen

Beherrschung des Prozesses bzw. Erreichung einer höheren Regelgüte bei Strecken höherer Ordnung

In Folge von Stellgradänderungen gelangt die Leistungsänderung über mehrere Zeitglieder (Energiespeicher und Elemente mit Totzeit) zum Sensor. Ein Prozess ist umso schwerer beherrschbar, je höher die Anzahl der Energiespeicher bzw. die Ordnung der Regelstrecke ist. Der ungünstigste Fall liegt vor, wenn sich die Zeitkonstanten der Regelstrecke in der gleichen Größenordnung befinden (kleines Verhältnis T_g/T_u). Eine Lösung bietet möglicherweise die Aufteilung der Zeitglieder auf zwei Regelkreise:

6 Spezielle Reglerschaltungen

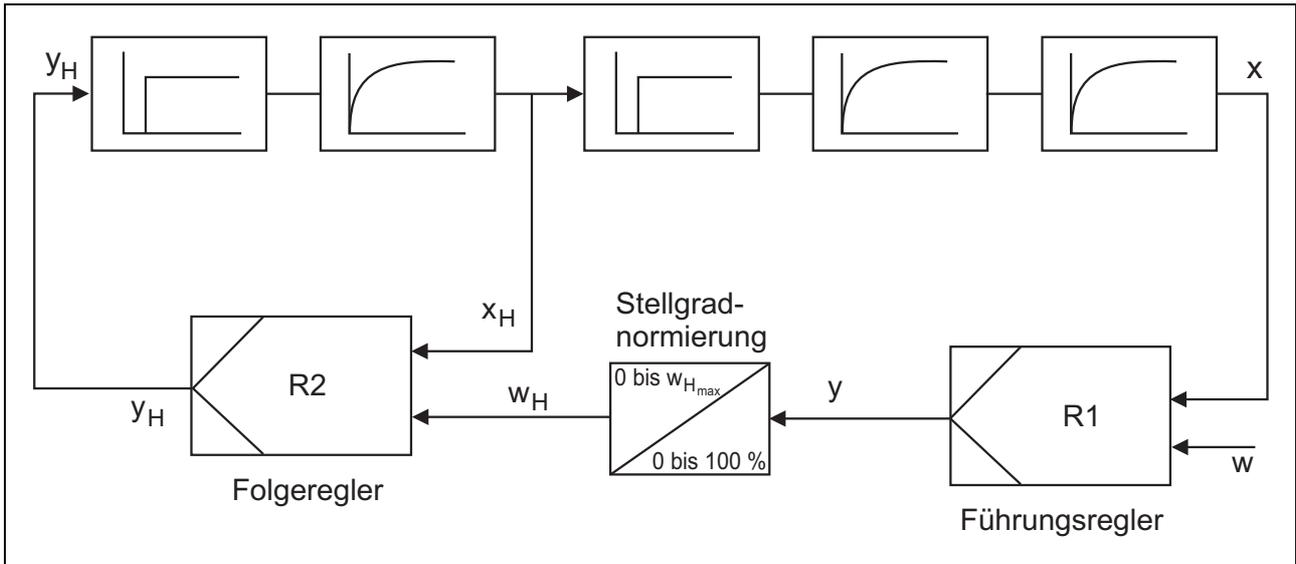


Abbildung 91: Aufteilung von Zeitgliedern auf mehrere Regelkreise

Durch die Aufteilung der Zeitglieder vergeht nicht mehr die gesamte Verzugszeit, bis ein Regler auf eine Störung am Streckeneingang reagieren kann. Nach Veränderung der Störgröße reagiert der Folgeregler bereits nach dem Verstreichen der Verzugszeit der Regelstrecke des inneren Regelkreises. Der Folgeregler kann die Störung bedeutend schneller kompensieren. Das 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.

Begrenzung der Leistung in der Regelstrecke bzw. des Hilfsistwertes

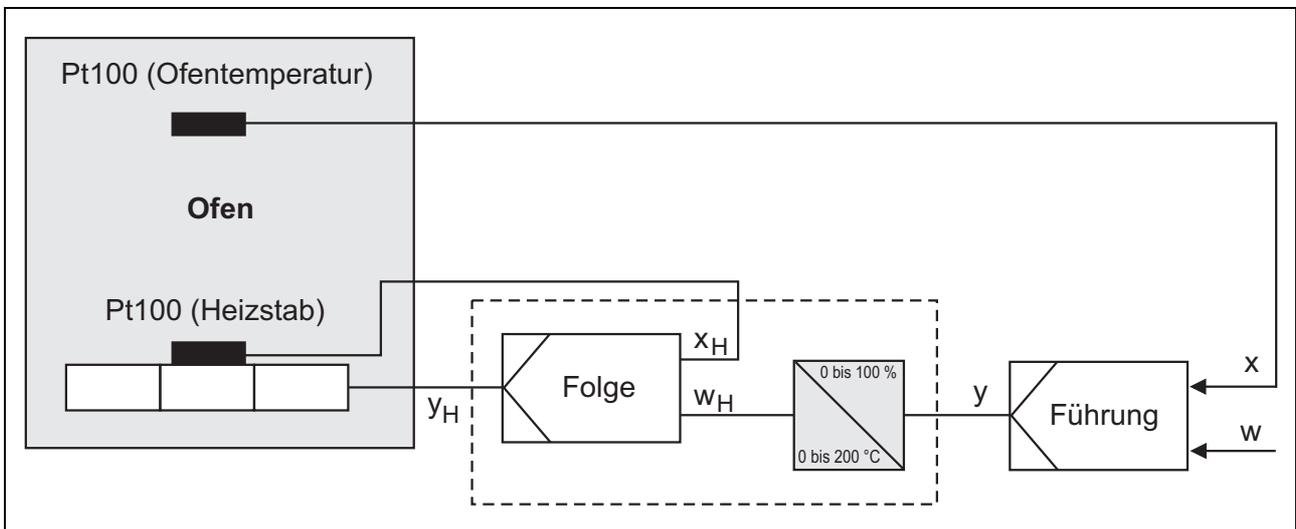


Abbildung 92: Kaskadenregelung an einem Ofen

Im Beispiel (Abbildung 92) 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

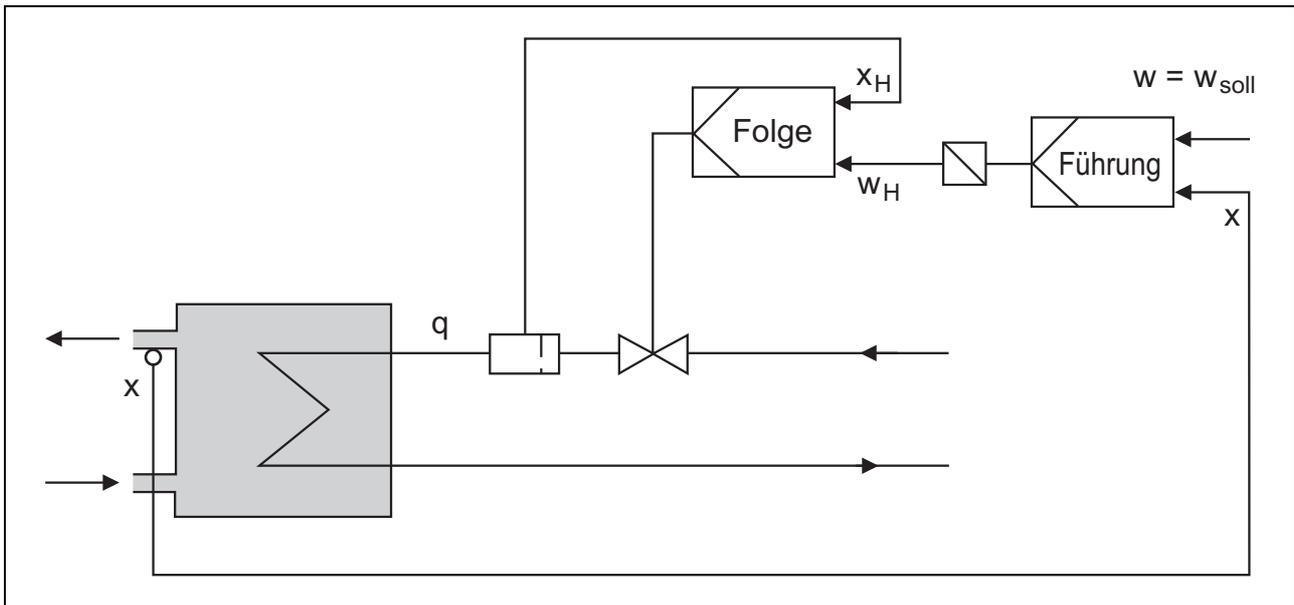


Abbildung 93: Kaskadenregelung an einem dampfbetriebenen Durchlauferhitzer

In dem Durchlauferhitzer (Abbildung 93) wird die Temperatur einer Flüssigkeit mit Hilfe 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 Führungsregler“ – „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.

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 vorgegeben. Durch die Stellgradnormierung ergibt sich am Folgeregler ein typischer Sollwert und die Optimierung kann erfolgen. Nach der Optimierung des Folgereglers auf PD-Struktur wird auch der Führungsregler in den Automatikbetrieb geschaltet und optimiert.

6 Spezielle Reglerschaltungen

6.7 Verhältnisregelung

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

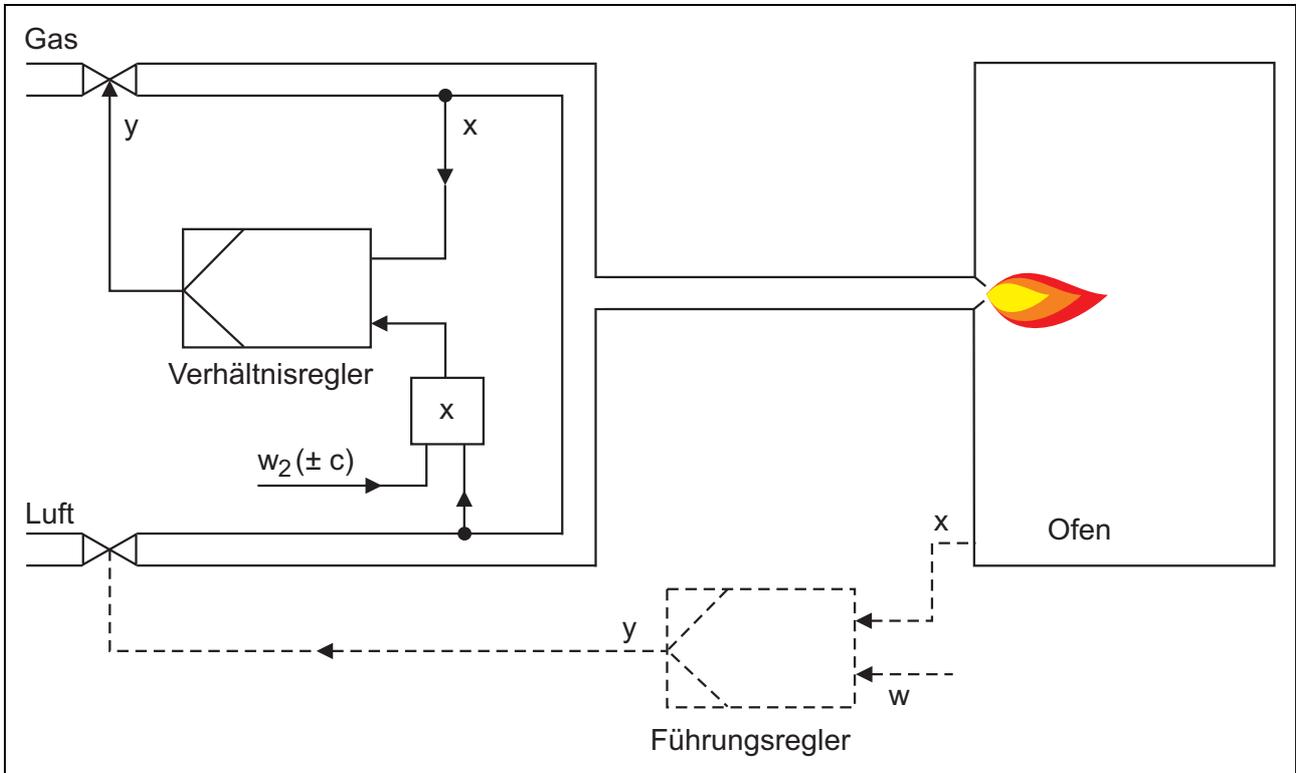


Abbildung 94: Verhältnisregelung für die Bereitstellung eines Luft-/Gasgemisches

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 Führungsregler seinerseits regelt die geforderte Ofentemperatur aus.

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 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Neben dem eigentlichen Regeln können JUMO-Regler eine Vielzahl von Zusatzfunktionen übernehmen und dem Anwender dadurch viele Vorteile bieten. Dieses Kapitel beschreibt einige dieser Funktionalitäten.

7.1 Weitere Einstellungen eines JUMO-Reglers hinsichtlich der Reglerfunktion

Zur Einrichtung der Reglerfunktion wird im Konfigurationsmenü „Eingänge“ der Eingang auf den verwendeten Sensor eingerichtet (Widerstandsthermometer, Thermoelement, 4 bis 20 mA etc.).

Im Konfigurationsmenü „Regler“ erfolgt die Angabe der Reglerart (Zweipunktregler, Stetiger Regler etc.) und des Wirksinns. Im gleichen Menü wird die Quelle für den Istwert definiert (Abbildung 95):

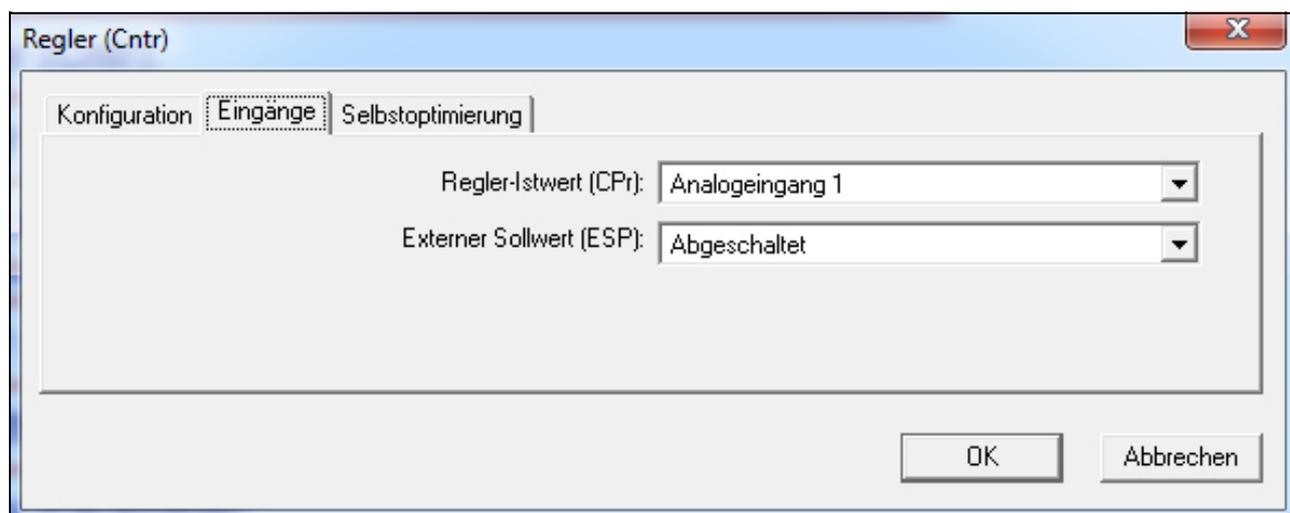


Abbildung 95: Quellen für Regler-Istwert und externer Sollwert

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 95).

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

Weitere Einstellungen hinsichtlich der Reglerfunktion werden im Konfigurationsmenü „Regler“ vorgenommen:

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

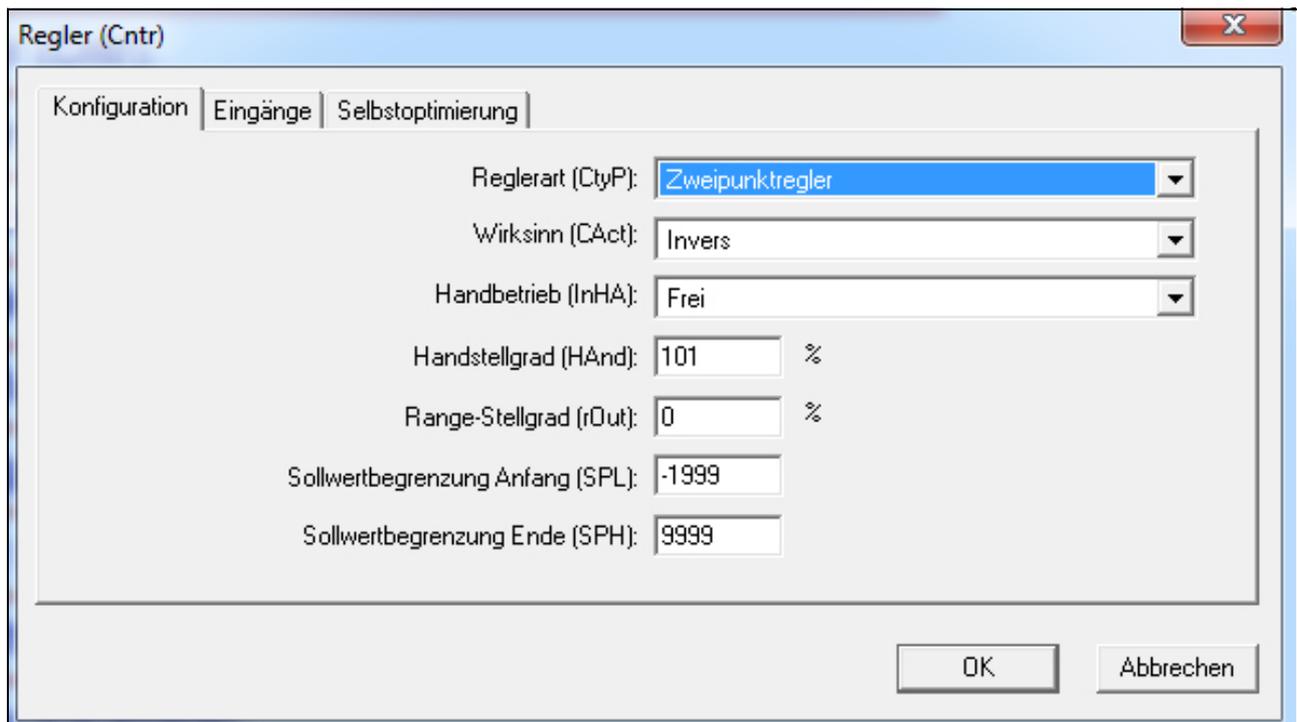


Abbildung 96: Einstellungen im Konfigurationsmenü „Regler“

Mit der Einstellung „Handbetrieb – Frei“ ist die Aktivierung des Handbetriebs möglich. Der Regler übernimmt mit der Einstellung „Handstellgrad 101 %“ im Handbetrieb den Stellgrad aus dem Automatikbetrieb. Generell kann im Parameter Handstellgrad auch ein beliebiger Stellgrad für die Umschaltung in den Handbetrieb definiert werden. Mit der Einstellung „Handbetrieb – gesperrt“ ist keine Aktivierung des Handbetriebs möglich.

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

Mit Sollwertbegrenzung Anfang und Ende wird der am Regler einstellbare Sollwertbereich definiert.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.2 Rampenfunktion

JUMO-Regler arbeiten werkseitig als Festwertregler. Auf den jeweiligen Sollwert wird so lange geregelt, bis dieser durch den Anwender verändert wird. Die Sollwertänderung erfolgt sprunghaft. Diverse Prozesse benötigen eine rampenförmige Sollwerterhöhung. Die in JUMO-Reglern standardmäßig vorhandene Rampenfunktion erfüllt die Anforderung:

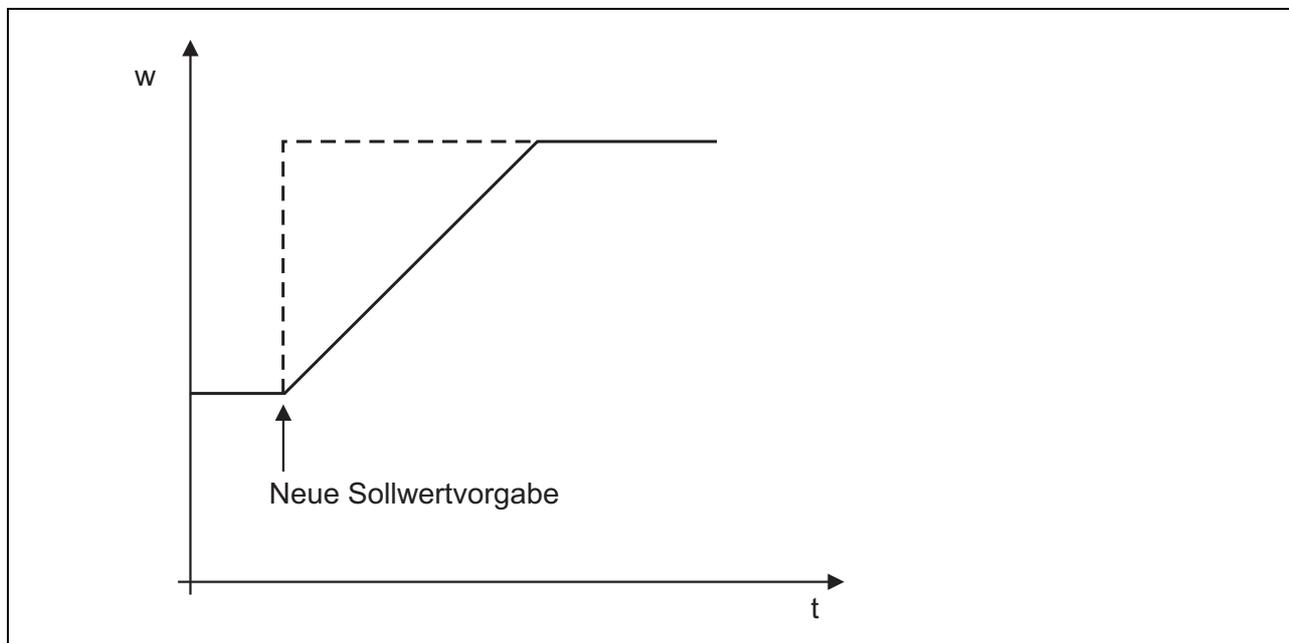


Abbildung 97: Rampenförmige Sollwertvorgabe

Mit der Aktivierung der Rampe erfolgt die Vorgabe der Steilheit in z. B. Kelvin/Minute.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.3 Programmgeberfunktion

Programmgeber ermöglichen die Vorgabe von Sollwertprofilen. Diese Sollwertprofile werden bei Bedarf dem Regler vorgegeben, welcher seinerseits den Istwert auf den jeweils aktuellen Sollwert ausregelt.

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 98).

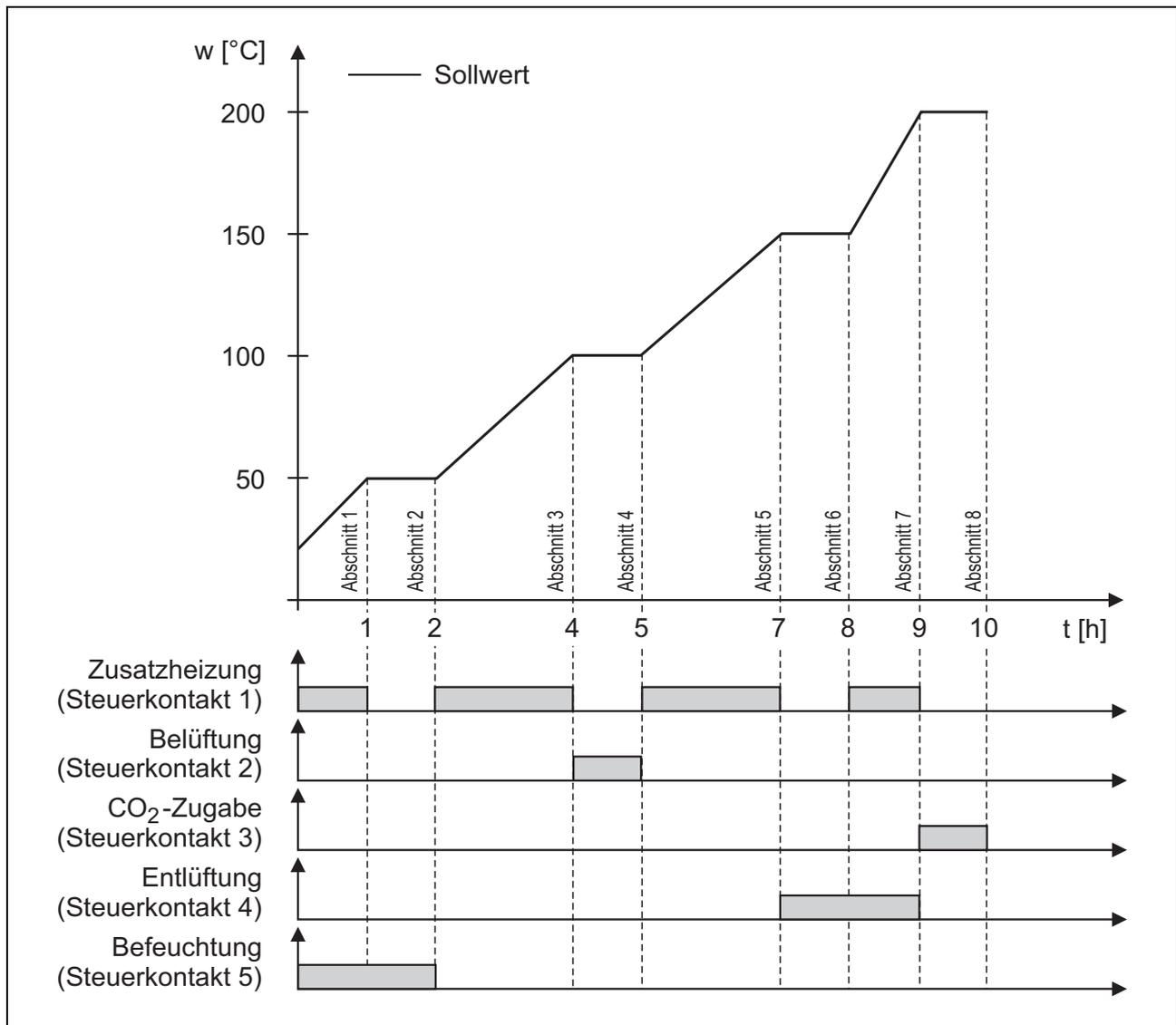


Abbildung 98: Programm eines Programmreglers

In vielen Fällen werden in den Abschnitten Kontakte gesteuert, beispielsweise für Zusatzheizung, Belüftung etc. 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 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.4 Grenzwertüberwachung

Die Funktion Grenzwertüberwachung ermöglicht den Vergleich von Prozessgrößen und die Überwachung von analogen Größen auf Grenzwerte.

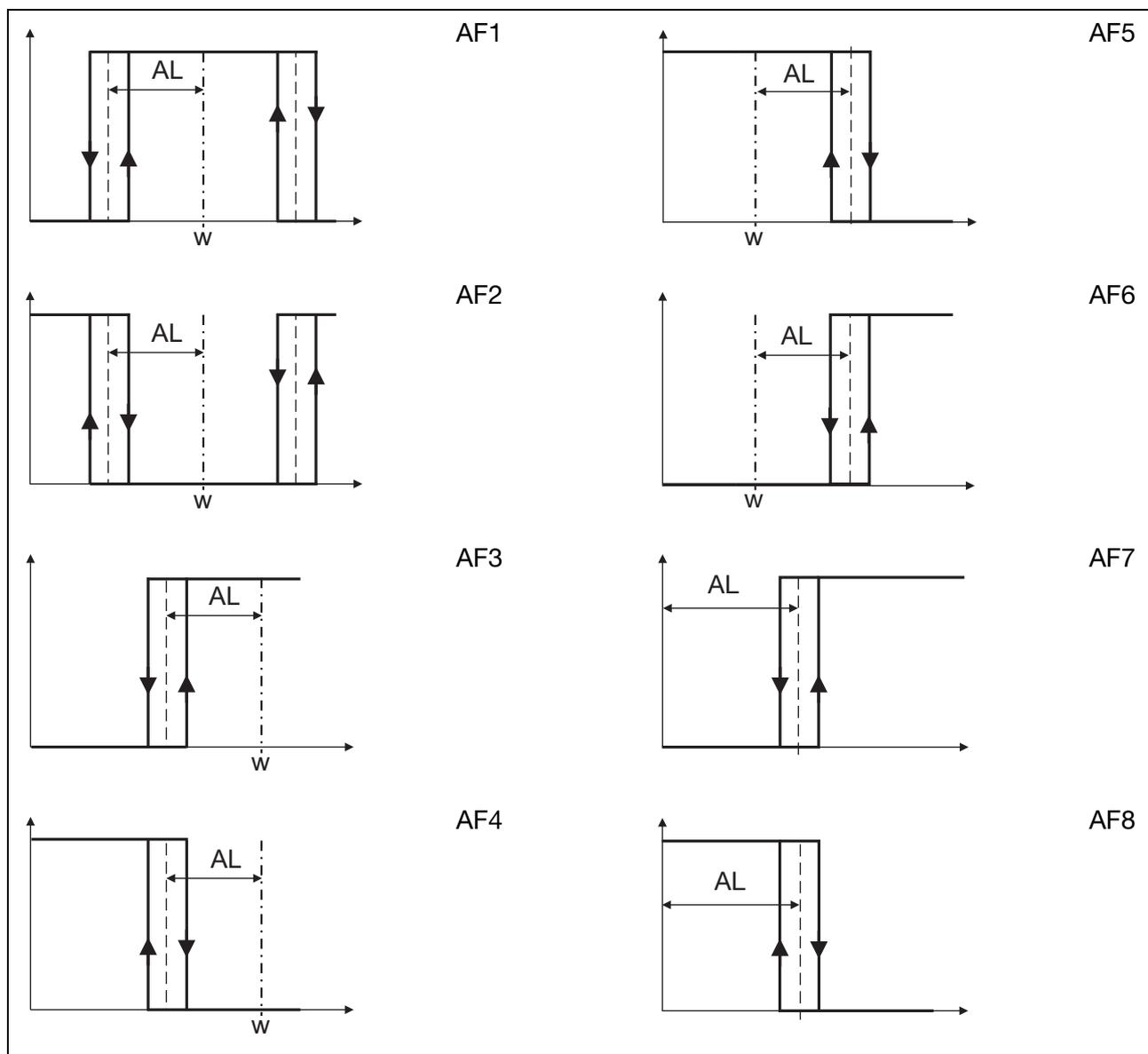


Abbildung 99: Alarmfunktionen für die Grenzwertüberwachung

In JUMO-Reglern können mehrere Grenzwertüberwachungen Verwendung finden. Für die Grenzwertüberwachungen existieren wiederum unterschiedliche Alarmfunktionen (Abbildung 99). Es existieren vier generell unterschiedliche Alarmfunktionen (AF1, AF3, AF5, AF7), weiterhin stellt die jeweils folgende Alarmfunktion die invertierte Funktion dar (AF2, AF4, AF6, AF8).

Alarmfunktion 1 (AF1) definiert 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, die Signalquelle für den Sollwert kann frei definiert werden. 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. Die Quelle für den Istwert der Grenzwertüberwachung kann

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

ebenfalls frei gewählt werden.

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

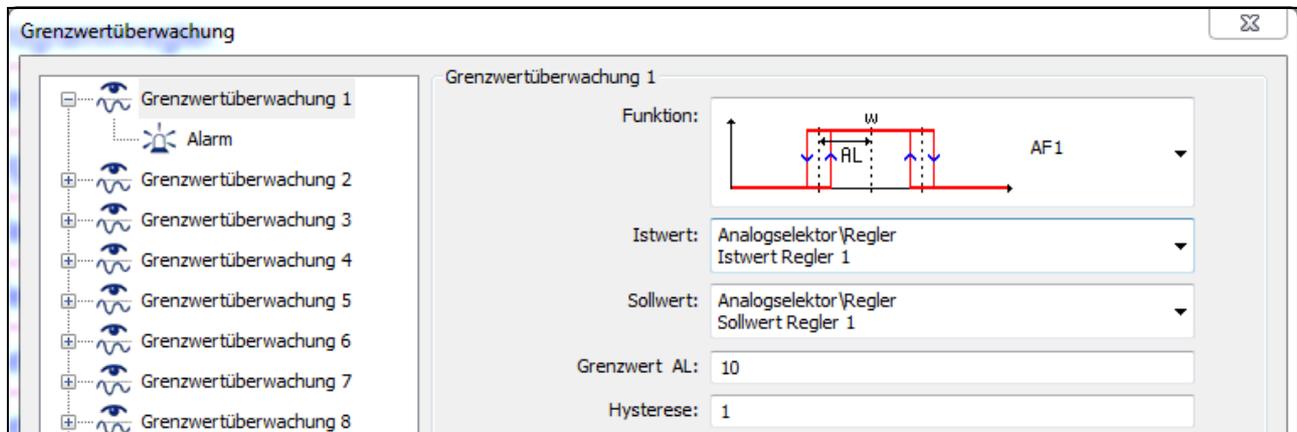


Abbildung 100: Einstellung für die Überwachung der Regelabweichung < 10 (Konfigurationsprogramm)

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

AF2 ist die invertierte Funktion von AF1 (Abbildung 99).

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

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.

AF6 ist die invertierte Funktion von AF5.

AF7 bietet die Überwachung des Istwertes auf einen maximalen Wert AL.

AF8 ist die invertierte Funktion von AF7.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.5 Binärfunktionen

In JUMO-Reglern liegen eine Vielzahl binärer Signale vor, wie zum Beispiel der Zustand von binären Eingängen und das Ergebnis der Grenzwertüberwachung. Mit der Zustandsänderung des jeweiligen Binärsignals können Funktionen aktiviert werden. Mit Hilfe der beispielhaften Konfigurationsmaske können Funktionen für Binäreingang 1 eingerichtet werden:

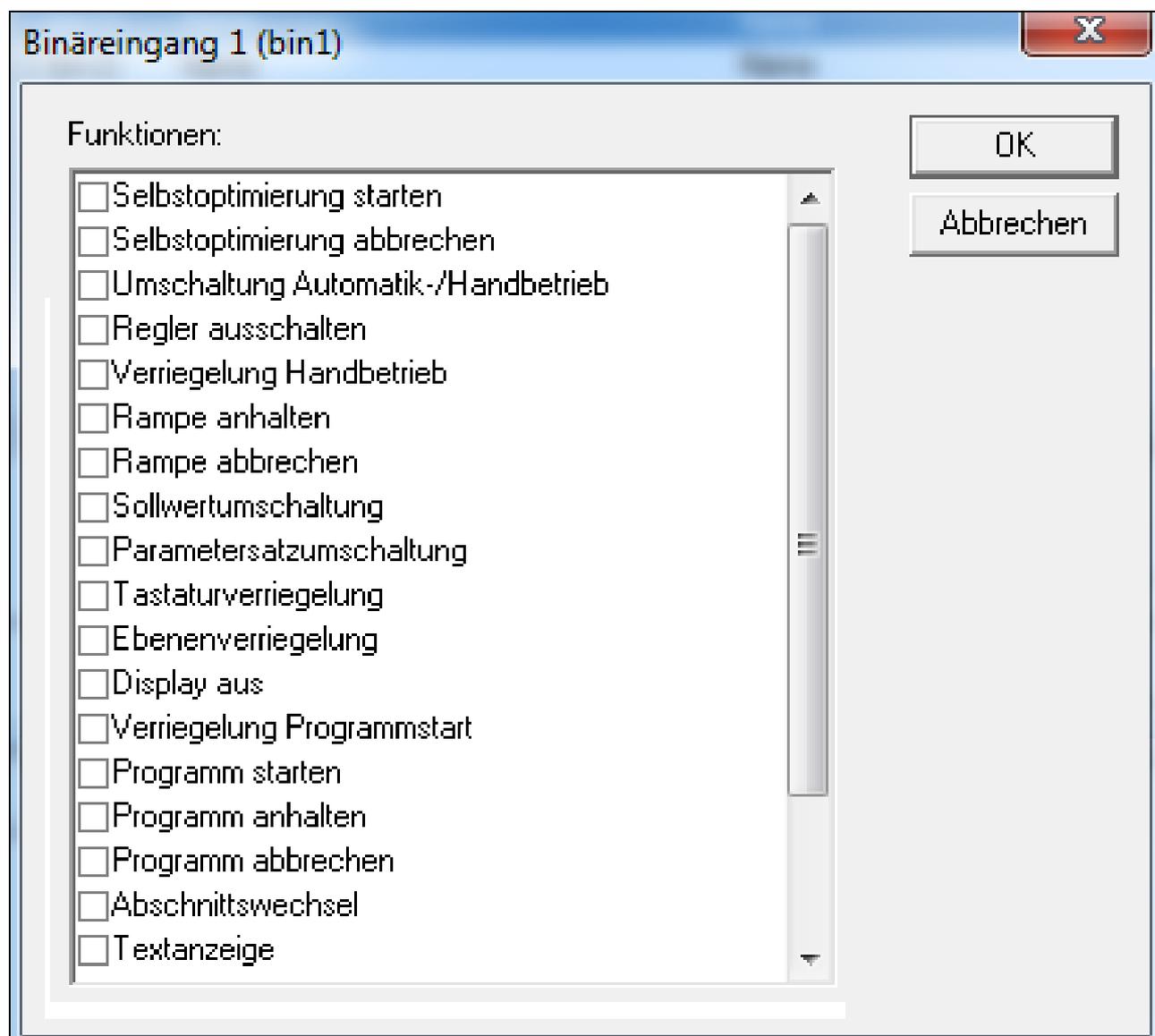


Abbildung 101: Binärfunktionen für Binäreingang 1 (Konfigurationsprogramm)

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

Üblicherweise befindet sich der Regler im Automatikbetrieb und regelt auf den eingestellten Sollwert. Durch **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.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Ist bei aktiver Rampenfunktion (Kapitel 7.1 „*Weitere Einstellungen eines JUMO-Reglers hinsichtlich der Reglerfunktion*“) der definierte Sollwert noch nicht erreicht, kann der **Rampensollwert angehalten** werden. **Rampe abbrechen** ermöglicht auch bei aktivierter Rampenfunktion die sprungförmige Sollwertvorgabe.

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

Die Regelparameter (X_p , T_n , T_v etc.) liegen im Parametersatz 1 in der Parameterebene der Regler. Unter Umständen verändern sich die Bedingungen im Prozess so stark, dass mit den Parametern kein zufriedenstellendes Regelergebnis mehr erreicht werden kann. Dieser Betriebszustand erfordert eine andere Dimensionierung der Regelparameter. Parametersatz 2 enthält die gleiche Auswahl von Regelparametern wie Parametersatz 1, hier können die erforderlichen Parameter eingestellt werden. Eine Umschaltung zwischen Parametersatz 1 und 2 erfolgt durch **Parametersatzumschaltung**.

Tastaturverriegelung sperrt die Tastatur während ein Binärsignal eingeschaltet 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 Programmreglerfunktion.

Programm starten und **Programm abbrechen** (beide flankengetriggert) ermöglicht Start und Stopp eines Programms.

Programm anhalten hält das Programm an (der Programmsollwert wird so lange angehalten, wie das Binärsignal aktiv ist).

Abschnittswechsel (flankengetriggert) schaltet das Programm in den nächsten Abschnitt.

Textanzeige zeigt einen definierbaren Text am Display des Reglers, während das Binärsignal aktiv ist.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.6 Startup und Diagnosefunktion

Die Regloptimierung erfordert in vielen Fällen die Aufzeichnung wichtiger Prozessgrößen wie Istwert, Sollwert und Stellgrad. Die Aufzeichnung mit einem Registriergerät ist relativ aufwändig: Anschaffung Registriergerät, Bereitstellung der Prozessgrößen über analoge Ausgangssignale des Reglers oder möglicherweise sogar die Platzierung eines weiteren Fühlers.

Das Konfigurationsprogramm von JUMO-Reglern bietet für diese Anwendung die Softwarekomponente Startup. Diese kann wichtige Analog- und Binärsignale aufzeichnen. Für den Zeitraum der Aufzeichnung muss eine Verbindung zwischen PC und JUMO-Regler bestehen.

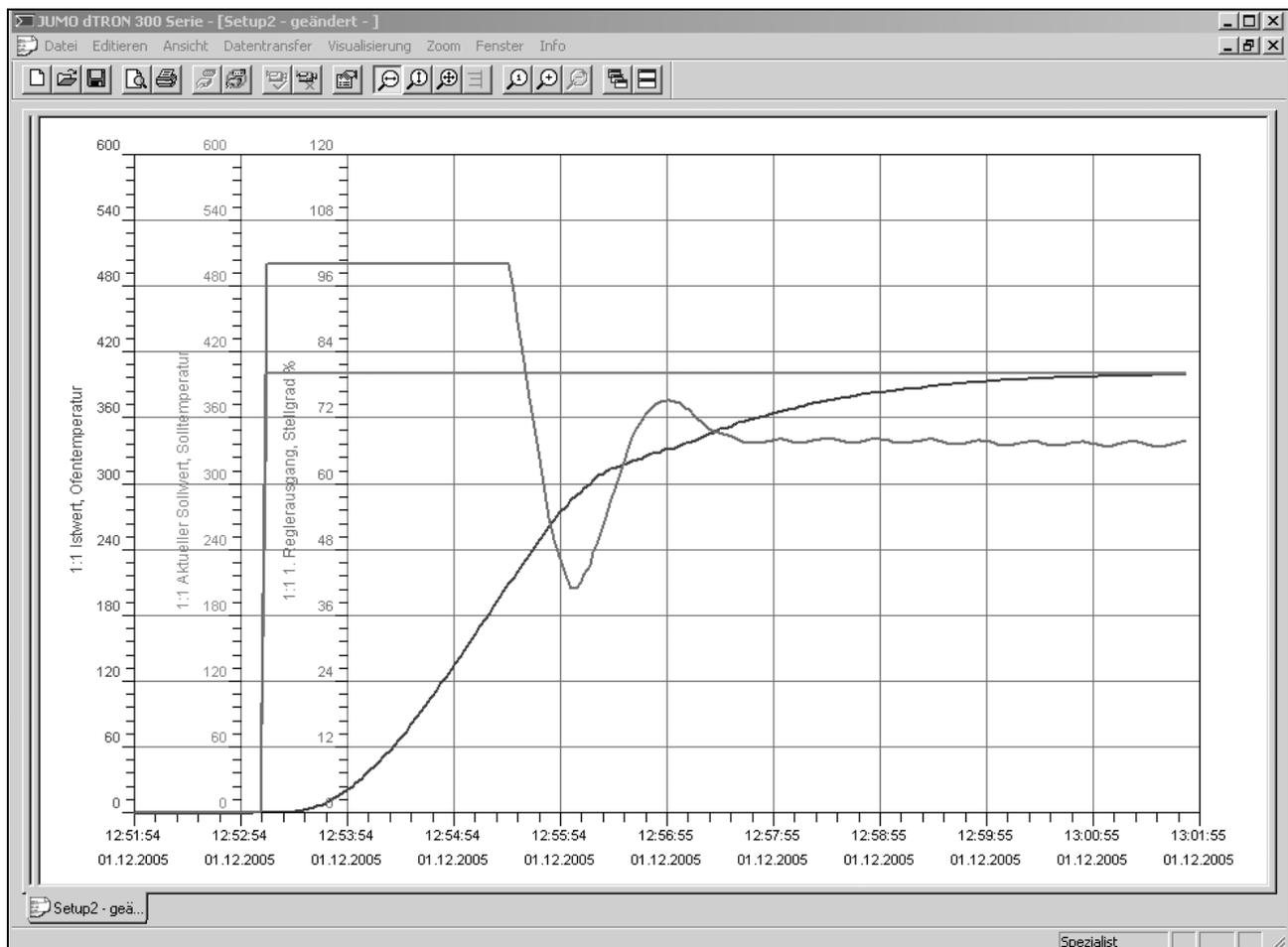


Abbildung 102: Online aufgezeichnete Daten eines JUMO-Reglers mit Startup

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

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Die **Diagnosefunktion** zeigt den Zustand von Ein- und Ausgängen und gibt wichtige Informationen zum Status des Reglers:

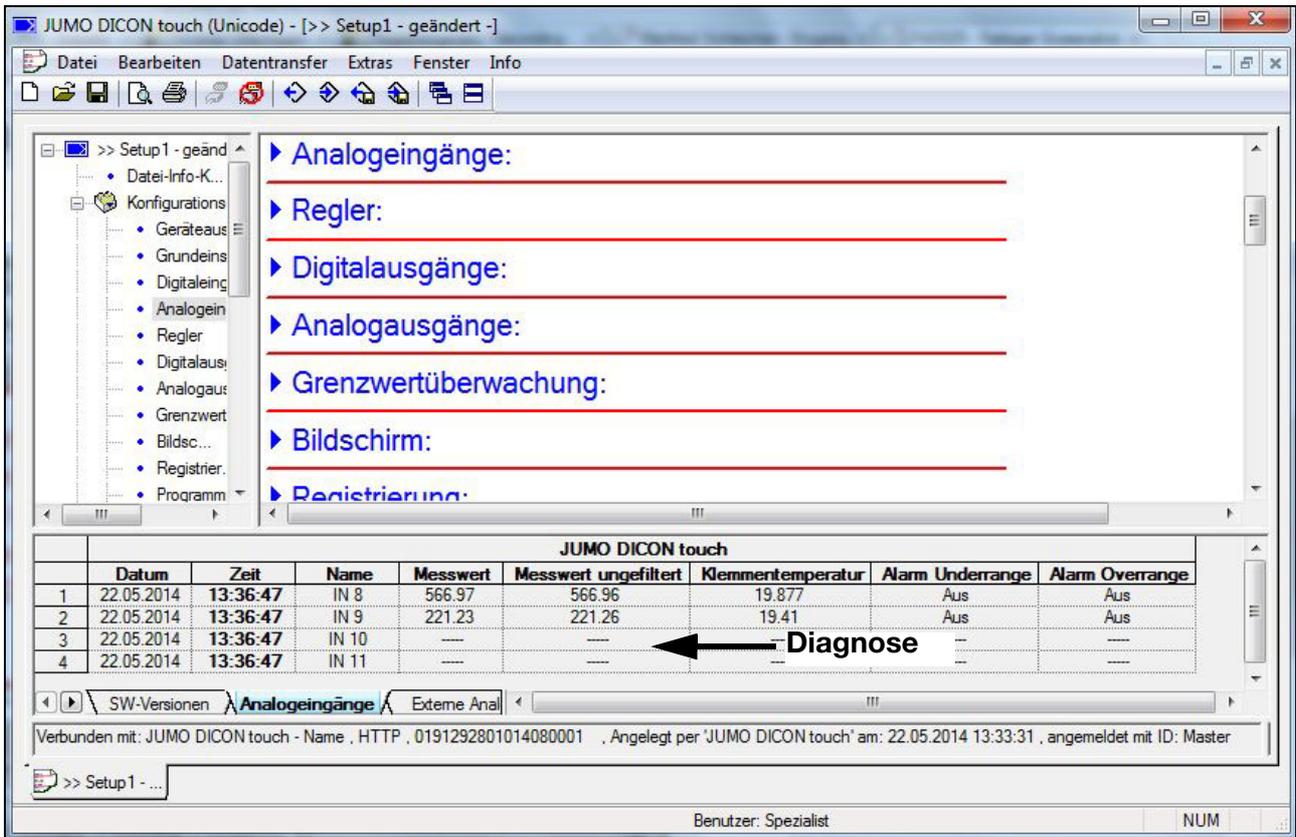


Abbildung 103: Diagnose im Fall eines JUMO DICON touch

Die Funktion unterstützt bei der Fehlersuche und allgemein bei Wartungsarbeiten.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

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.



Abbildung 104: Registrierung im JUMO IMAGO 500

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 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 PCA3000.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.8 Mathematik- und Logikfunktion

Mit der in einigen JUMO-Reglern vorhandenen Mathematik- und Logikfunktion finden mathematische Berechnungen und Boolesche Operatoren Verwendung. Zur Eingabe der Formel steht der Formel-Editor zur Verfügung:

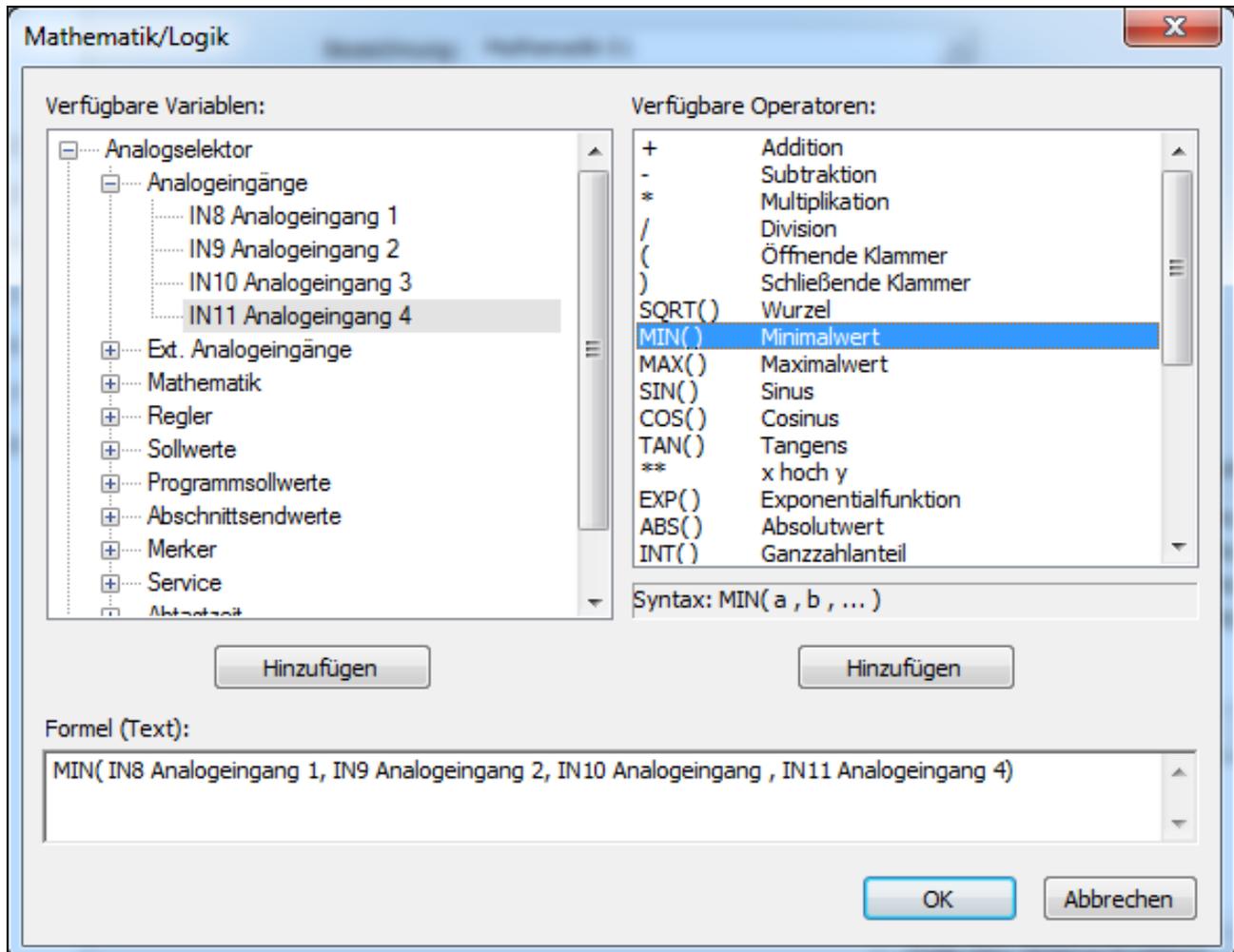


Abbildung 105: Mathematik- und Logikfunktion des JUMO DICON touch

Im Formel-Editor befinden sich auf der linken Seite die nutzbaren Variablen, auf der rechten Seite die zulässigen Funktionen inklusive einem Hinweis zur zu verwendenden Syntax. Mit Hilfe der beiden Fenster wurde eine Formel zur Bestimmung des Minimalwertes der Analogeinträge 1 bis 4 definiert. Bei den vier Prozessgrößen könnte es sich um vier Temperaturen eines Ofens handeln und die Mathematikfunktion ermittelt deren Minimalwert. 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.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

7.9 Schnittstellen

JUMO-Regler sind mit unterschiedlichen Schnittstellen ausgestattet: Je nach Modell existieren **Konfigurationsschnittstellen** (TTL oder USB-Device), **serielle Schnittstellen**, **Ethernet-Schnittstellen** und **PROFIBUS-DP-Schnittstellen**.

Abgesehen von PROFIBUS-DP können über alle Schnittstellen die Konfiguration und die aufgezeichneten Messdaten übertragen werden.

Zur Verbindung der **TTL-Schnittstelle** mit einem PC wird das PC-Interface USB/TTL-Umsetzer eingesetzt. Für die meisten JUMO-Regler wird weiterhin der Adapter Buchse zwischen dem PC-Interface und der TTL-Schnittstelle benötigt:

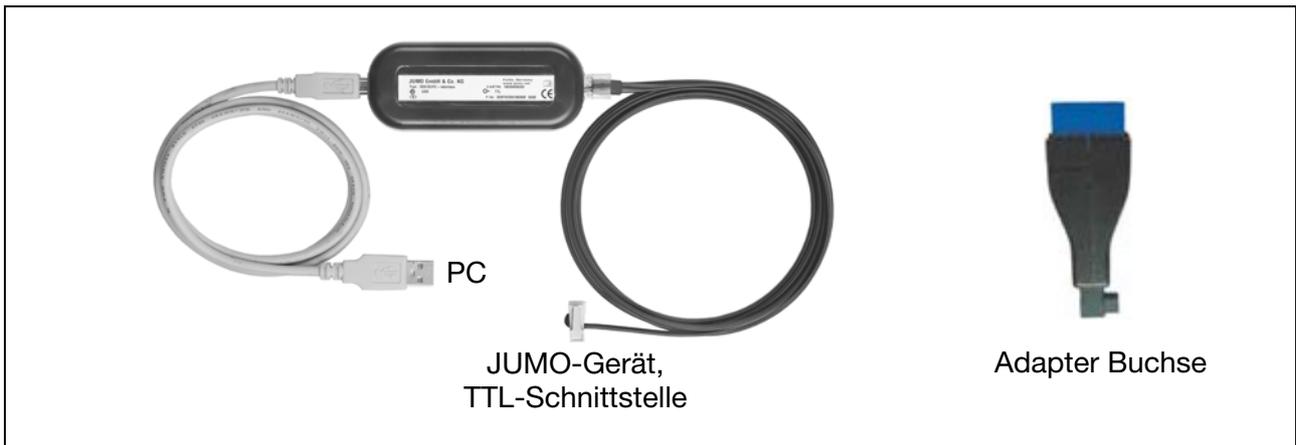


Abbildung 106: PC-Interface USB/TTL-Umsetzer mit Buchse

Anstelle der TTL-Schnittstelle verfügen Neuentwicklungen über eine **USB-Device-Schnittstelle**. Für die Verbindung findet ein Standard-USB-Kabel Verwendung.



Abbildung 107: JUMO DICON touch mit USB-Device und USB-Host-Schnittstelle

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Die Hauptanwendung für die im Bild ebenfalls dargestellte **USB-Host-Schnittstelle** ist die Speicherung von registrierten Daten auf einen USB-Stick.

Nahezu alle JUMO-Regler bieten die Möglichkeit von mindestens einer **seriellen Schnittstelle**. Über die Zweidraht-Schnittstelle RS485 können bis zu 31 Feldgeräte an einen PC angeschlossen werden. Alternativ findet die Vierdraht-Schnittstelle RS422 Verwendung. Für die seriellen Schnittstellen kommt das Protokoll Modbus-RTU zum Einsatz.

Ein typischer Einsatz von seriellen Schnittstellen ist die Anbindung der Regelgeräte an SCADA-Systeme. JUMO bietet die komfortable Visualisierungssoftware SVS3000 an. Mit dieser können JUMO-Geräte aus einem Katalog ausgewählt und ohne Programmieraufwand angebunden werden.



Abbildung 108: Gruppenbild der JUMO SVS3000

Generell kann die Anbindung von JUMO-Reglern an alle Systeme mit einer Modbus-Master-Schnittstelle erfolgen.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Mit Relaisbaugruppen erfolgt eine Erweiterung der verfügbaren Hardware von JUMO-Reglern, die Anbindung geschieht ebenfalls über eine serielle Schnittstelle:

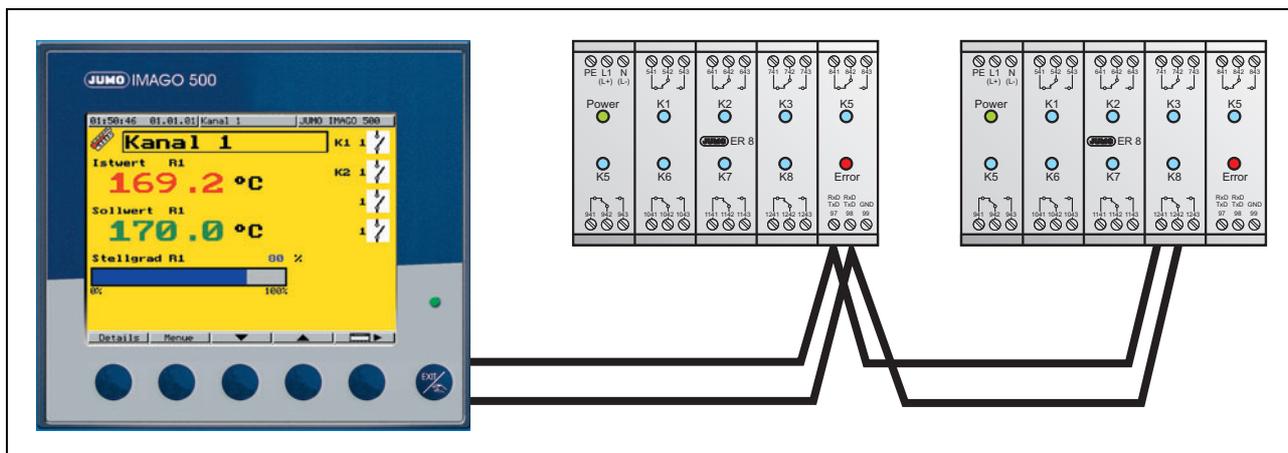


Abbildung 109: JUMO IMAGO 500 mit zwei externen Relaisbaugruppen ER8

Weiterhin kommen serielle Schnittstellen für Modemübertragungen zum Einsatz – über die Schnittstellen geschieht die Verbindung beispielsweise mit einem Schaltschrankmodem.

Serielle Schnittstellen arbeiten in der Regel als Slaves – sie beantworten Anfragen oder folgen Anweisungen eines Masters. Aufgrund des verwendeten Modbus-Protokolls spricht man von einem Modbus-Slave. Die Schnittstellen ausgewählter JUMO-Regler können alternativ als Master arbeiten (Modbus-Master): Feldgeräte mit serieller Schnittstelle (meist RS485) und Modbus-RTU-Protokoll werden an den jeweiligen JUMO-Regler angeschlossen.

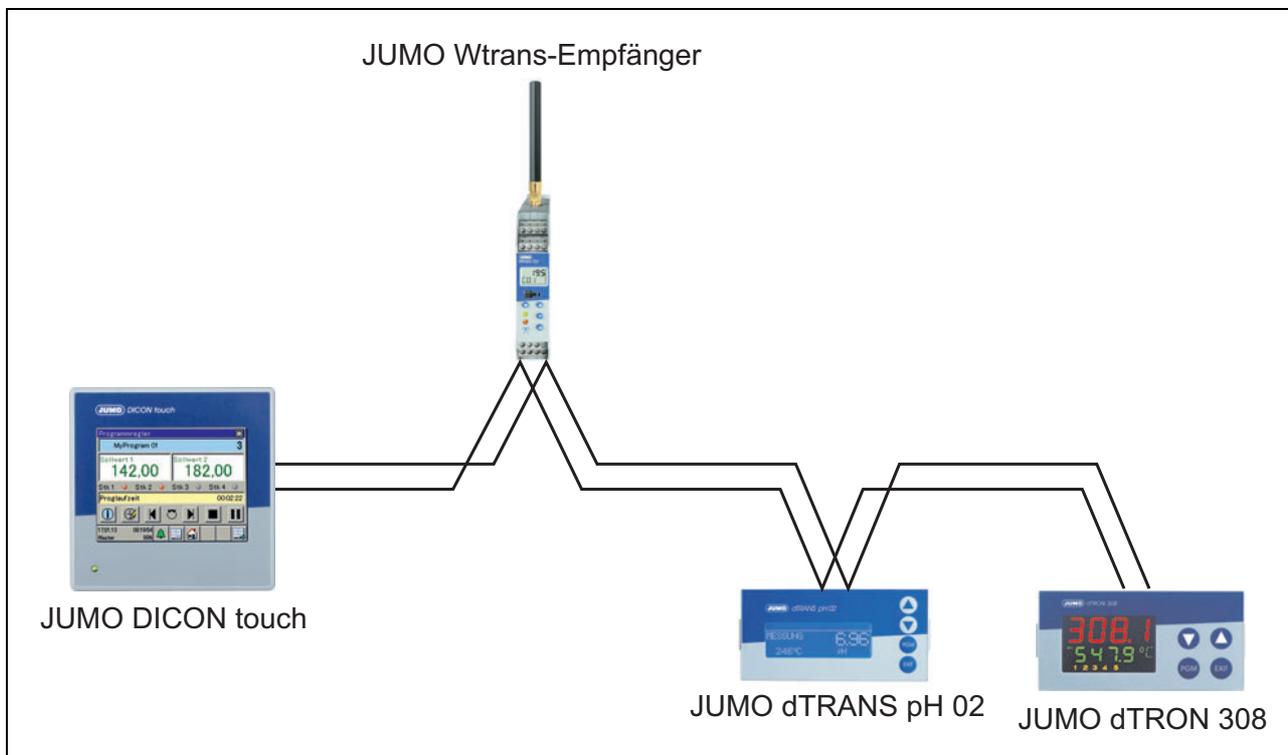


Abbildung 110: JUMO DICON touch mit Modbus-Master-Schnittstelle und Feldgeräte mit Modbus-Slave-Schnittstelle

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Über die **Ethernet-Schnittstelle** können JUMO-Regler an ein LAN (Local Area Network) angeschlossen werden und über dieses z. B. die registrierten Daten übertragen werden. Wie bereits erwähnt, kann über diese Verbindungsart auch die Konfiguration übertragen werden.

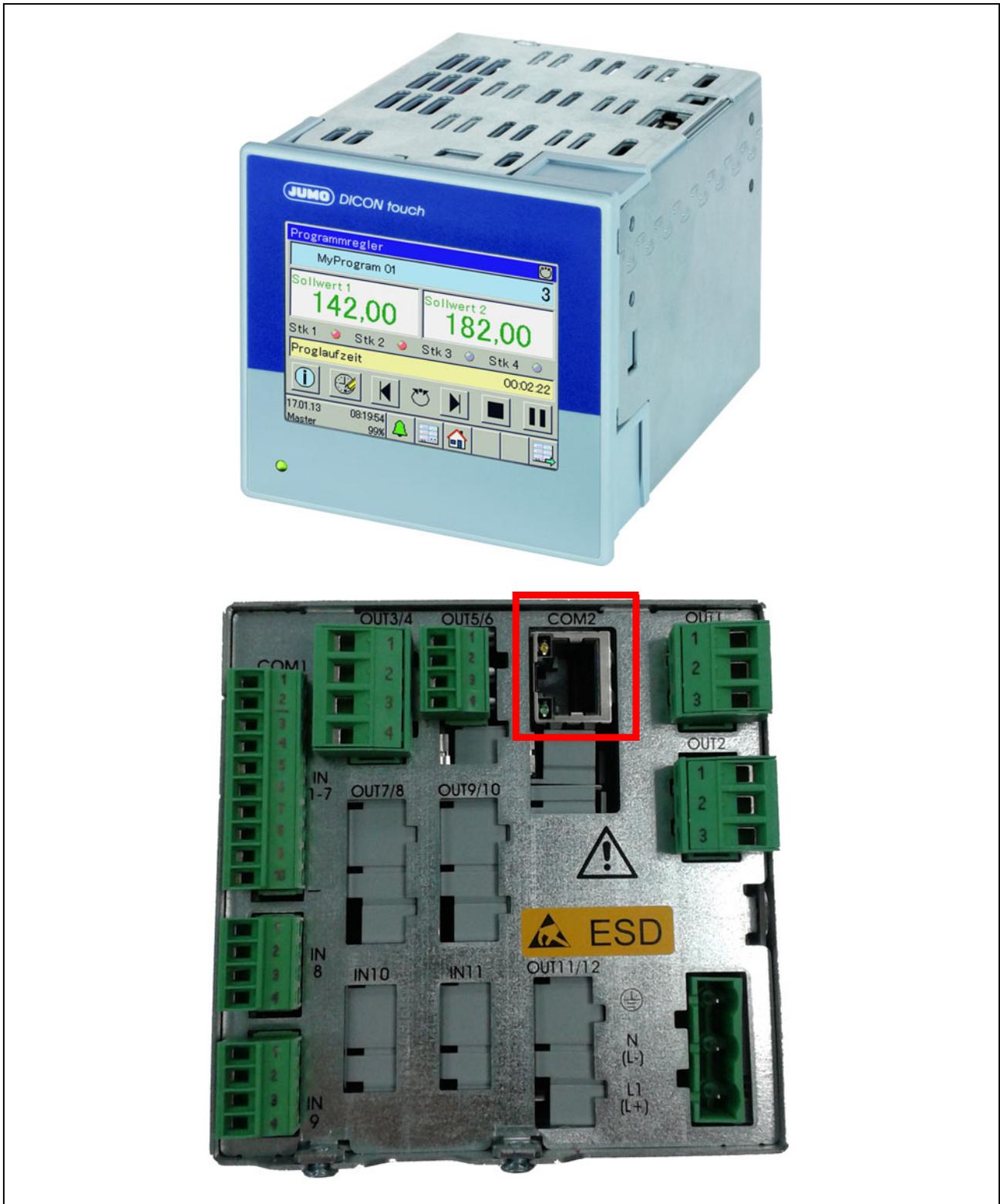


Abbildung 111: JUMO DICON touch mit Ethernet-Schnittstelle

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Das auf Ethernet basierende Protokoll ist Modbus-TCP. Über dieses Protokoll werden ebenfalls Anfragen und Anweisungen an den Regler gesendet.

Alternativ zur Anbindung von Slaves an den Modbus-Master über die serielle Schnittstelle (Abbildung 110) kann eine Verbindung über Ethernet erfolgen: Die Schnittstelle arbeitet in diesem Fall als Modbus-TCP-Master und sendet Anfragen und Anweisungen an Feldgeräte, welche sich ebenfalls im Ethernet befinden.

Die **PROFIBUS-DP-Schnittstelle** wird für den schnellen Prozessdatenaustausch (Istwert, Sollwert, Stellgrad etc.) mit einer SPS eingesetzt. Die von der SPS unabhängige Regelung bietet unterschiedliche Vorteile wie höhere Prozesssicherheit, Vorortanzeige, einfache Modifikation von Regelparametern etc. Zur Anbindung des Reglers benötigt das Konfigurationswerkzeug der SPS eine so genannte GSD-Datei. In der GSD-Datei sind unter anderem die zu übertragenden Prozessdaten definiert. Zur Reduzierung des Datenaufkommens werden in einem so genannten JUMO-GSD-Generator die zu übertragenden Prozessdaten ausgewählt.

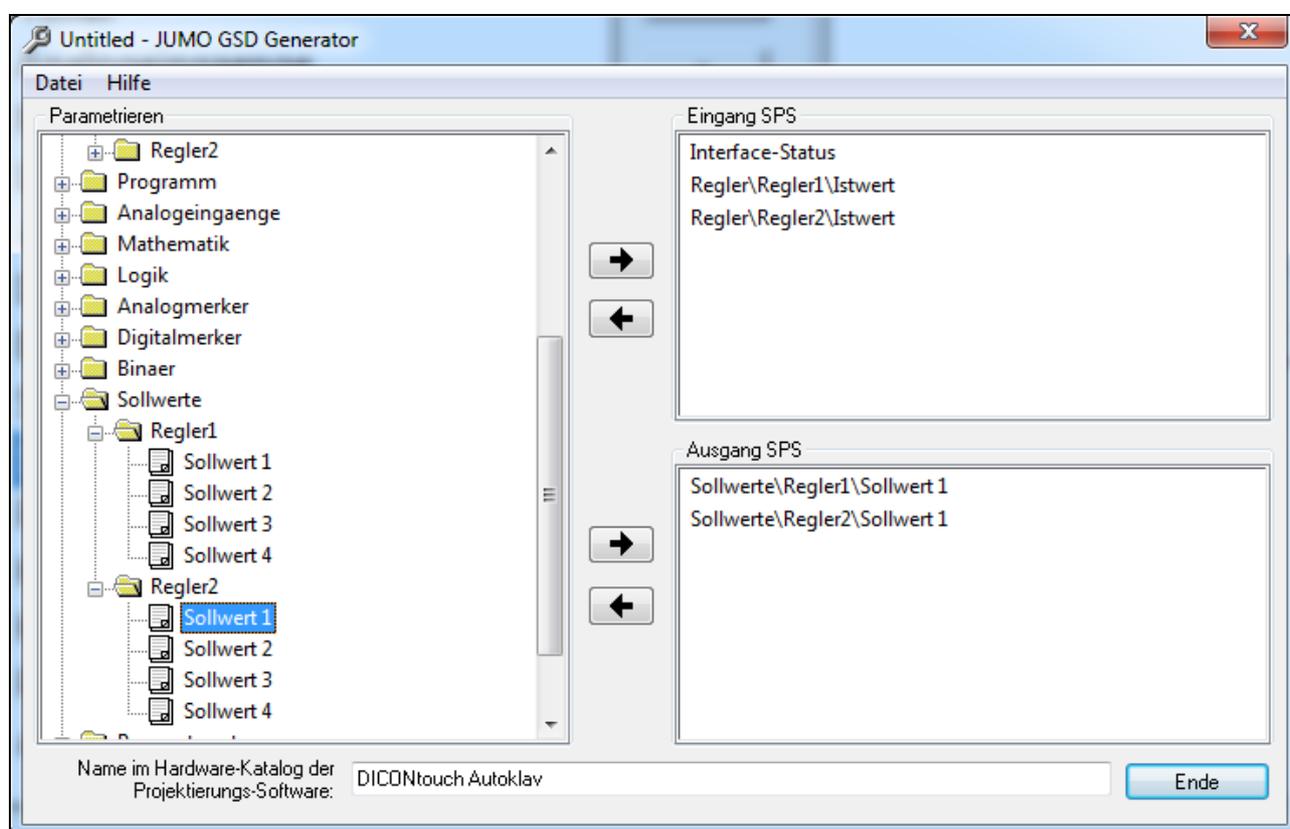


Abbildung 112: Erstellung einer GSD-Datei mit dem JUMO GSD-Generator

Im Beispiel sollen zwei Regleristwerte in die SPS gelesen und zwei Sollwerte in den Regler geschrieben werden.

7 Weitere Funktionalitäten von JUMO-Reglern

Parameter des Reglers

An dieser Stelle sind alle Parameter eines JUMO-Reglers (von der Funktion geordnet) aufgezeigt, welche die eigentliche Reglerfunktion betreffen. Sie sind im JUMO-Regler in der Parameterebene oder im Setup-Programm im Menü „Regelparameter“ zu finden.

PID-Verhalten

X_P	Proportionalbereich des P-Anteils; englisch: Pb
T_n	Nachstellzeit des I-Anteils; englisch: rt
T_v	Vorhaltezeit des D-Anteils; englisch: dt

Allgemeine Parameter

Y1	Obere Stellgradbegrenzung des Reglerausgangssignal (Verwendung nicht bei Dreipunktschrittregler)
Y2	Untere Stellgradbegrenzung des Reglerausgangssignals (Verwendung nicht bei Dreipunktschrittregler)
Y0	Arbeitspunktkorrektur eines P-Reglers (nur sinnvoll bei P-Regler)

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

C_{y1}	Schaltperiodendauer des ersten binären Ausgangs (wirksam bei Zwei- und Dreipunktregler, $X_{P1} > 0$)
C_{y2}	Schaltperiodendauer des zweiten binären Ausgangs (wirksam bei Dreipunktregler, $X_{P2} > 0$)
T_{k1}	minimale Einschaltdauer des ersten binären Reglerausgangs (wirksam bei Zwei- und Dreipunktregler, $X_{P1} > 0$)
T_{k2}	minimale Einschaltdauer des zweiten binären Reglerausgangs (wirksam bei Dreipunktregler, $X_{P2} > 0$)
X_{Sd1}	Schaltdifferenz des ersten binären Ausgangs (wirksam bei Zwei- und Dreipunktregler, $X_{P1} = 0$)
X_{Sd2}	Schaltdifferenz des zweiten binären Ausgangs (wirksam bei Dreipunktregler, $X_{P2} = 0$)
X_{Sh}	Kontaktabstand; englisch: db Der Kontaktabstand liegt symmetrisch um den Sollwert. Bei Dreipunktreglern werden die P-Anteile um diesen auseinander geschoben, bei Dreipunktschritt- und Stellungsreglern erfolgt in diesem Bereich keine Ansteuerung des Motorstellgliedes.
TT	Laufzeit des Motorstellgliedes, Einstellung bei Dreipunktschritt- und Stellungsreglern

Verwendete Abkürzungen

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 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

Fachliteratur von JUMO - Lehrreiches für Einsteiger und Praktiker

Nicht nur bei der Herstellung von JUMO-Produkten, auch beim späteren Einsatz ist Know-How gefragt. Deshalb bieten wir unseren Anwendern eigene Publikationen zu Themen der Mess- und Regelungstechnik an.

Die Publikationen sollen Einsteigern und Praktikern die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete schrittweise näher bringen. Hierbei werden überwiegend allgemeine Themenbereiche, zum Teil auch JUMO-spezifische Anwendungen, erläutert.

Zusätzlich zur JUMO-Fachliteratur, bieten wir Ihnen neben unseren Software-Downloads die Möglichkeit der direkten Online-Bestellung von Prospekten und CD-ROM-Katalogen.



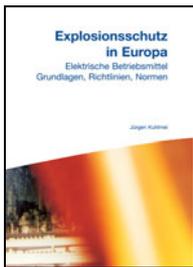
**Elektrische Temperaturmessung
mit Thermoelementen
und Widerstandsthermometern**
Matthias Nau

FAS 146
Teile-Nr.: 00074750
ISBN: 978-3-935742-06-1
zum Preis von 14,- EUR netto



**Regelungstechnik
Grundlagen für den Praktiker**
Manfred Schleicher

FAS 525
Teile-Nr.: 00314836
ISBN: 978-3-935742-00-9
zum Preis von 14,- EUR netto



**Explosionsschutz in Europa
Elektrische Betriebsmittel
Grundlagen, Richtlinien, Normen**
Jürgen Kuhlmei

FAS 547
Teile-Nr.: 00324966
ISBN: 978-3-935742-08-5
zum Preis von 9,- EUR netto



Reinstwassermessung
Reinhard Manns

FAS 614
Teile-Nr.: 00369643
kostenfrei



Messung der Redoxspannung
Ulrich Braun

FAS 615
Teile-Nr.: 00373848
kostenfrei



**Amperometrische Messung
von freiem Chlor, Chlordioxid
und Ozon**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 619
Teile-Nr.: 00394969
kostenfrei



**Elektronische Leistungssteller
von JUMO
Grundlagen und Tipps für den Prakti-
ker**
Manfred Schleicher, Winfried Schneider

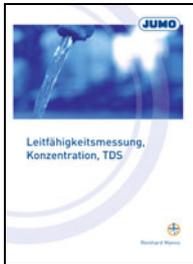
FAS 620
Teile-Nr.: 00398728
ISBN: 978-3-935742-04-7
zum Preis von 9,- EUR netto



Messung des pH-Wertes
Matthias Kremer

FAS 622
Teile-Nr.: 00403231
kostenfrei

Fachliteratur von JUMO - Lehrreiches für Einsteiger und Praktiker



Leitfähigkeitsmessung, Konzentration, TDS

Reinhard Manns

FAS 624
Teile-Nr.: 00411335
kostenfrei



Messunsicherheit einer Temperaturmesskette mit Beispielrechnungen

Gerd Scheller

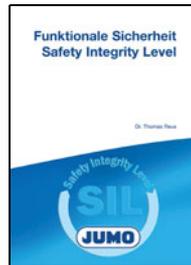
FAS 625
Teile-Nr.: 00413510
ISBN: 978-3-935742-12-2
zum Preis von 3,- EUR netto



Messung von Wasserstoffperoxid/ Peressigsäure

Dr. Jürgen Schleicher

FAS 628
Teile-Nr.: 00420695
kostenfrei



Funktionale Sicherheit SIL

Dr. Thomas Reus

FAS 630
Teile-Nr.: 00463374
kostenfrei



Messung von Ammoniak

Dr. Jürgen Schleicher

FAS 631
Teile-Nr.: 00481786
kostenfrei



Analysemesstechnik in flüssigen Medien Ein Handbuch für Praktiker

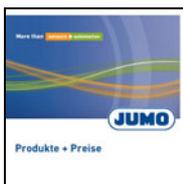
Dr. Öznur Brandt, Ulrich Braun,
Matthias Kremer, Reinhard Manns,
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 637
Teile-Nr.: 00526103
ISBN: 978-3-935742-16-0
zum Preis von 19,- EUR netto

Besuchen Sie unsere deutsche Website auf www.jumo.de (für Österreich www.jumo.at, für die Schweiz www.jumo.ch) und überzeugen Sie sich von der umfangreichen Produktpalette für die verschiedensten Einsatzgebiete. Dort finden Sie weitere Informationen und die dazugehörigen Ansprechpartner für Ihre Wünsche, Fragen, Anregungen und Bestellungen.

Kataloge auf CD-ROM

Unsere Kataloge sind - außer in gedruckter Version - auch in digitaler Form erhältlich. Die CD-ROM mit deutschen oder englischen Daten enthalten strukturierte Kataloge im PDF-Format, das Produktspektrum, die International Locations sowie den kostenlosen Download des Acrobat Readers.



JUMO Produkte + Preise

deutsche Ausgabe
Teile-Nr.: 00397668
kostenfrei



JUMO Products

englische Ausgabe
Teile-Nr.: 00404116
kostenfrei



More than **sensors + automation**

ISBN: 978-3-935742-00-9

www.jumo.net

