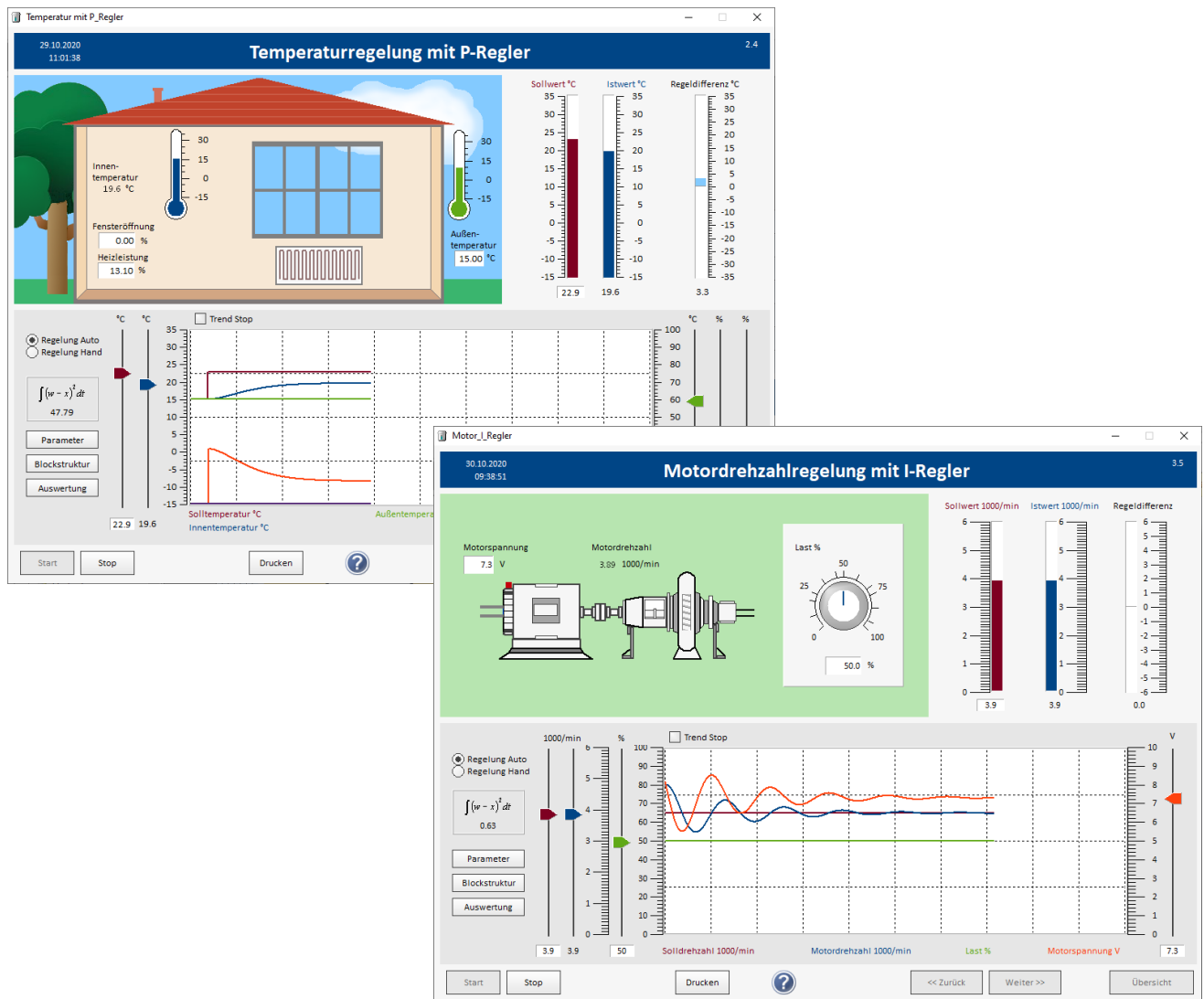


EINFÜHRUNG IN DIE REGELUNGSTECHNIK



Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schoop GmbH

Riechelmannweg 4

D-21109 Hamburg

Tel.: 040 / 754 922 30

E-Mail: info@schoop.de

Stand: 29.10.2020

Inhalt

1	EINFÜHRUNG REGELUNGSTECHNIK.....	4
1.1	REGELUNGSTECHNISCHE BEISPIELE AUS DEM TÄGLICHEN LEBEN	4
1.2	REGELUNGSTECHNISCHE BEISPIEL AUS DER TECHNIK.....	5
1.3	PRINZIP DER REGELUNGSTECHNIK.....	7
1.4	SIGNALFLUSSPLAN FÜR DIE REGELUNGSTECHNIKBEISPIELE	9
2	SIGNALFLUSSPLAN (BLOCKSTRUKTUR).....	11
2.1	STANDARDREGELKREIS	12
2.2	DER ERWEITERTE REGELKREIS	13
2.2.1	Regler	13
2.2.2	Stellglied	13
2.2.3	Strecke (Regelstrecke)	13
2.2.4	Messglied (Messeinrichtung).....	13
2.2.5	Aufgabe des Reglers	14
2.3	FÜHRUNGSREGELUNG UND STÖRWERTREGELUNG	14
2.3.1	Führungsregelung	14
2.3.2	Störwertregelung	14
2.3.3	Einschwingverhalten	14
3	ZEITVERHALTEN VON BLÖCKEN.....	19
3.1	STRECKENBLÖCKE	19
3.1.1	P-Block:.....	19
3.1.2	I-Block:.....	20
3.1.3	PT1-Block:.....	20
3.1.4	T_T -Block Totzeit-Block:.....	21
3.1.5	DT1-Block:	22
3.2	REGLERBLÖCKE	22
3.2.1	P-Regler:.....	22
3.2.2	I-Regler:.....	23
3.2.3	PI-Regler:.....	23
3.2.4	PID-Regler:.....	23
4	REGELKREISVERHALTEN MIT ZWEIPUNKTREGLER	25
4.1	BEISPIEL FÜR EINE TEMPERATURREGELUNG MIT ZWEIPUNKTREGLER	25
4.2	BEISPIEL FÜR EINE FÜLLSTANDSREGELUNG MIT ZWEIPUNKTREGLER	26
5	REGELKREISVERHALTEN MIT STANDARDREGLERN	28

5.1	P-REGLER.....	28
5.1.1	Beispiel: Temperaturregelung eines Durchlauferhitzers mit P- Regler.....	29
5.1.2	Beispiel Füllstandsregelung mit P-Regler	30
5.2	P-REGLER MIT P-BLOCK ALS STRECKE	32
5.3	P-REGLER MIT TOTZEIT-BLOCK ALS STRECKE.....	32
5.4	I-REGLER	35
5.4.1	Beispiel: Temperaturregelung eines Durchlauferhitzers mit I- Regler.....	36
5.4.2	Beispiel Füllstandsregelung mit I-Regler	37
5.4.3	Regelkreisverhalten eines Regelkreises mit I-Regler und beliebiger Strecke	38
5.5	PI-REGLER.....	38
5.5.1	Beispiel: Temperaturregelung eines Durchlauferhitzers mit PI- Regler.....	40
5.5.2	Beispiel Füllstandsregelung mit PI-Regler	41
5.5.3	Beispiel PI-Regler mit Pt3-Strecke: Verhalten des P- und des I-Anteils.....	42
5.6	PID-REGLER	45
5.6.1	Untersuchen des Zeitverhaltens des PID-Reglers	45
5.6.2	Beispiel: Temperaturregelung eines Durchlauferhitzers mit PID- Regler	46
5.6.3	Beispiel Füllstandsregelung mit PID-Regler:.....	47
5.6.4	Beispiel PID-Regler mit Pt3-Strecke: Verhalten des P-, I- und D-Anteils	48
6	REGLEREINSTELLVERFAHREN	51
6.1	VERFAHREN NACH CHIEN/HRONES/RESWICK	51
6.2	REGLEREINSTELLUNG DER FÜLLSTANDSREGELUNG NACH CHIEN/HRONES/RESWICK.....	53
6.3	REGLEREINSTELLUNG NACH FAUSTFORMELN FÜR STRECKEN OHNE AUSGLEICH	58
6.4	VERFAHREN NACH CHIEN/HRONES/RESWICK FÜR STRECKE MIT AUSGLEICH	59
6.5	REGLEREINSTELLUNG DER TEMPERATURREGELUNG NACH CHIEN/HRONES/RESWICK	60
6.6	REGLEREINSTELLUNG NACH FAUSTFORMELN FÜR STRECKEN MIT AUSGLEICH.....	66
6.7	REGLEREINSTELLVERFAHREN FÜR DIE TEMPERATURREGELUNG MIT VERZÖGERUNG NACH CHIEN/HRONES/RESWICK.....	68
6.8	REGLEREINSTELLVERFAHREN FÜR DIE TEMPERATURREGELUNG MIT VERZÖGERUNG NACH ZIEGLER UND NICHOLS	74
6.9	REGLEREINSTELLVERFAHREN FÜR DIE RÜHRKESSELKASKADE NACH CHIEN/HRONES/RESWICK	78
7	ANHANG: BLOCKSTRUKTURELEMENTE	86
7.1	P-BLOCK:	86
7.2	I-BLOCK:	86
7.3	IT1-BLOCK:	86
7.4	PT2-BLOCK (SCHWINGUNG):.....	87
7.5	PT1-BLOCK:	87
7.6	PT2-BLOCK:	88

7.7	PT3-BLOCK:	88
7.8	PT4-BLOCK:	89
7.9	PT5-BLOCK:	89
7.10	DT1-BLOCK:	90
7.11	D-BLOCK:	90
7.12	T _T -BLOCK / TOTZEIT-BLOCK:	90

Hinweis:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen daraus. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung der Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schoop GmbH in irgendeiner Form reproduziert, vervielfältigt oder verbreitet werden.

1 EINFÜHRUNG REGELUNGSTECHNIK

Dieser Abschnitt liefert eine kurze Einführung in die Regelungstechnik. Anhand von alltäglichen und auch technischen Beispielen wird das Prinzip der Regelungstechnik erklärt.

1.1 REGELUNGSTECHNISCHE BEISPIELE AUS DEM TÄGLICHEN LEBEN

GLEICHGEWICHTSORGAN:

Das Gleichgewichtsorgan des Menschen oder von Tieren arbeitet als Regler. Die vertikale Position des Menschen wird erfasst und durch Befehle an die Muskeln behält der Mensch seine aufrechte Position bei.

DUSCHEN:

Beim Duschen arbeitet der Mensch als Regler, wenn er warm duschen möchte. Er erfasst die tatsächliche Wassertemperatur und versucht, durch Verstellen des Mischventils eine angenehme Wassertemperatur einzustellen.

STEUERN BEIM AUTOFAHREN:

Wenn der Mensch Auto fährt, führt er mehrere Regelungen gleichzeitig aus. Um auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu kommen, erfasst er die momentane Geschwindigkeit und versucht durch Drücken des Gaspedals die gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen. Auch der Versuch auf der Straße zu bleiben und dem Straßenverlauf zu folgen, ist eine Regelungsaufgabe. Der Straßenverlauf wird erfasst und durch Betätigen des Steuerrads wird versucht dem Straßenverlauf zu folgen. Wenn man also am Steuerrad sitzt und steuert, führt man im Prinzip eine Regelung durch.

FOKUSSIEREN DES AUGES:

Das Fokussieren des Auges, ist eine unbewusst automatisch durchgeführte Regelungsaufgabe. Die Schärfe der Bilder wird erfasst und durch Verstellen der Linse im Auge wird versucht, einen scharfen Blick auf das ins Auge gefasste Objekt zu bekommen.

LEITZINSERHÖHUNG DURCH DIE EUROPÄISCHEN ZENTRALBANK (EZB):

Die Europäische Zentralbank versucht durch Ändern des Leitzinssatzes, Einfluss auf die Inflationsrate zu nehmen. Dies ist im Prinzip auch eine Regelungsaufgabe. Die Bundesbank erfasst die Inflationsrate. Ihre Aufgabe ist, die Inflation nicht zu groß werden zu lassen. Durch Verändern des Leitzinssatzes wird versucht, die Inflation zu beeinflussen.

UMSATZSTEIGERUNG:

Marketing-Abteilungen versuchen durch Verändern des Preises Ihrer Produkte oder durch Erhöhen des Werbeetats den Absatz bestimmter Produkte zu erhöhen. Dies ist wieder eine Regelungsaufgabe. Der Absatz des Produktes wird erfasst. Durch Senken des Preises oder durch Erhöhen des Werbeetats wird versucht den Anreiz des Produktes zu erhöhen und damit den Absatz zu steigern. Allerdings ist der Erfolg dieser Regelungsaufgabe, wie man sich vorstellen kann, nicht so gesichert, wie bei technischen Anwendungen.

1.2 REGELUNGSTECHNISCHE BEISPIEL AUS DER TECHNIK

ZIMMERTEMPERATURREGELUNG:

Regelung der Temperatur in einem Zimmer mit einem Thermostatventil. Abhängig von der Temperatur im Zimmer dehnt sich der Stift im Thermostatventil aus oder verkleinert sich. Dadurch verändert das Ventil die Wärmemenge, die durch den Heizkörper fließt und beeinflusst damit die Zimmertemperatur. Störungen, wie eine Änderung der Außentemperatur oder Öffnen eines Fensters würden ebenfalls ausgegelt werden, da durch die damit verbundene Änderung der Zimmertemperatur das Thermostatventil wieder anfängt zu reagieren.

DURCHLAUFERHITZER:

Regelung der Temperatur in einem Durchlauferhitzer. Mit einem Durchlauferhitzer wird versucht die Temperatur des Wassers am Ablauf auf eine Solltemperatur einzustellen. Die Solltemperatur wird eingestellt oder vorgegeben. Die Isttemperatur wird gemessen und durch Verstellen der elektrischen Heizleistung wird versucht, die Isttemperatur so zu verändern, dass die Solltemperatur erreicht wird. Verändert sich der Durchfluss des Wassers durch den Durchlauferhitzer, so wirkt die Änderung wie eine Störung. Wenn mehr Wasser durchfließt, wird die Temperatur fallen und die Heizleistung muss steigen, damit wieder die Isttemperatur die Solltemperatur erreicht.

TEMPERATURREGELUNG MIT EINEM MISCHVENTIL:

Regelung der Temperatur von Wasser mithilfe eines Mischventils. Die Aufgabe bestehe darin, Kalt- und Warmwasser mit dem Mischventil so zu mischen, dass sich am Ablauf eine vorgegebene Wassertemperatur einstellt. Die Solltemperatur wird vorgegeben, die Isttemperatur wird gemessen und durch Verstellen des Mischventils wird versucht, die Isttemperatur so zu ändern, dass sich die vorgegebene Solltemperatur einstellt. Sollten Vordruckschwankungen in den Zuleitungen für das Warm- oder Kaltwasser auftreten, so wirken diese wie Störungen und die Wassertemperatur wird sich ändern. Ein Regler muss dann wieder versuchen durch Verstellen des Mischventils diese Störung auszugleichen, das heißt der Regler versucht, durch Verstellen des Mischventils zu erreichen, dass die Isttemperatur wieder die Solltemperatur erreicht.

FÜLLSTANDSREGELUNG IM BEHÄLTER:

Füllstandsregelung in einem Behälter. Über einen Zulauf kommt diskontinuierlich Flüssigkeit in den Behälter. Die Aufgabe besteht darin, den Füllstand über ein Stellventil im Ablauf auf einem vorgegebenen Sollniveau zu halten. Der tatsächliche Füllstand, das Istniveau wird gemessen, mit dem Sollniveau verglichen und durch Verstellen des Ventils im Ablauf wird versucht das Istniveau auf das Sollniveau zu bekommen. Wenn der Füllstand zu hoch ist, muss das Stellventil im Ablauf weiter öffnen, damit mehr Flüssigkeit aus dem Behälter herausfließt als hineinfließt. Ist der Füllstand zu niedrig, muss das Stellventil schließen um zu erreichen, dass in den Behälter mehr Flüssigkeit hineinfließt als herausfließt. Dadurch steigt der Füllstand. Sollte sich der Zufluss ändern, so wirkt dies wie eine Störung. Das Stellventil im Abfluss muss reagieren, um die Störung auszugleichen, damit sich das Istniveau wieder auf das Sollniveau einstellt.

DURCHFLUSSREGELUNG:

Regelung des Durchflusses in einem Rohr. Über ein Stellventil im Rohr kann der Durchfluss beeinflusst werden. Ist der gemessene Istdurchfluss kleiner als der vorgegebene Solldurchfluss, muss das Stellventil weiter aufgehen, damit der Durchfluss vergrößert wird. Ein Regler versucht also wieder durch Verstellen des Stellventils im Rohr zu erreichen, dass der gemessene Istdurchfluss den eingestellten Wert des Solldurchflusses erreicht. Störungen können durch Druckschwankungen im Rohr auftreten. In diesem Fall muss der Regler versuchen, diese Störung wieder auszugleichen, so dass der Istdurchfluss wieder den Solldurchfluss erreicht.

MOTORDREHZAHIREGELUNG:

Regelung einer Motordrehzahl. Über die Eingangsspannung kann die Drehzahl eines Gleichstrommotors verändert werden. Die Drehzahl wird über einen Impulszähler gemessen und als Spannungssignal ausgegeben. Soll die Drehzahl mit einem Regler geregelt werden, so nimmt der Regler die gemessene Istdrehzahl (Istwert) auf, vergleicht die Istdrehzahl mit der vorgegebenen Solldrehzahl (Sollwert) und verändert die Eingangsspannung des Motors (Stellsignal), um die Drehzahl zu erhöhen oder zu verringern. Wird an den Motor eine Last angeschlossen, z.B. ein Generator der Strom erzeugt, so wirkt die angeschlossene Last wie eine Störung für die Regelung. Durch die Abnahme von unterschiedlich viel Strom durch verschiedene Verbraucher, wird sich die Drehzahl des Generators und damit die Drehzahl des Motors verändern. Die Abnahme von Strom wirkt sich also als Störung (Störgröße) auf die Drehzahl des Motors aus. Der Regler muss versuchen diese Störgröße aus zu regeln, d.h. er versucht, durch Verstellen der Stellgröße (Eingangsspannung des Motors) zu erreichen, dass der gemessene Istwert (Istdrehzahl) den Sollwert (vorgegebene Solldrehzahl) wieder erreicht.

FOLGERUNG AUS DEN BEISPIELEN:

Diese Beispiele zeigen, dass die Regelungstechnik kein Teilgebiet einer bestimmten Fachrichtung, wie Elektrotechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Biologie oder Wirtschaft ist, sondern eine fachübergreifende Disziplin.

1.3 PRINZIP DER REGELUNGSTECHNIK

Das Prinzip der Regelungstechnik lässt sich aus diesen Beispielen ansehen. Ein vorgegebener Wert, der Sollwert, wird mit einem gemessenen Wert, dem Istwert, verglichen. Durch Verstellen einer Stellgröße, wird versucht den Prozess oder das System so zu beeinflussen, dass sich der gemessene Wert verändert und den Wert des Sollwertes annimmt. Abhängig von den Systemen oder Prozessen kann es unterschiedlich lange dauern, bis der Istwert wieder den Sollwert erreicht. Das Ausregeln der Zimmertemperatur dauert sicherlich wesentlich länger als das Regeln einer Motordrehzahl. Wirken Störungen in einem System oder auf den Prozess, so kann sich der Istwert ändern. Auch in diesem Fall muss durch Verändern der Stellgröße versucht werden, den Istwert wieder auf den Sollwert einzustellen und damit die Störung aus zu regeln.

PRINZIP REGELUNGSTECHNIK

Ein vorgegebener Sollwert wird fortlaufend mit einem gemessenen Istwert verglichen. Abhängig vom Vergleich wird eine Stellgröße verändert, die wiederum den Prozess oder das System beeinflusst. Dadurch ändert sich der Istwert, somit der Vergleich zwischen Istwert und Sollwert und damit wiederum die Stellgröße, usw. Man erhält also einen geschlossenen Wirkungskreislauf.

REGELUNG NACH DIN IEC 60050-351:

Die Regelung bzw. das Regeln ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.

Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.

Zur Darstellung von Regelungen und Systemen / Prozessen wird die Blockstruktur (Blockschaltbild) oder der Signalfussplan eingesetzt.

Bei der Regelung wird der Sollwert mit dem Istwert verglichen. Die Differenz geht in einen Regler, der eine Stellgröße berechnet, die wiederum auf den Prozess oder das System wirkt und damit den Istwert verändert. Dadurch erhält man einen geschlossenen Wirkungsablauf, wie in der Abbildung 1-1 gezeigt wird.

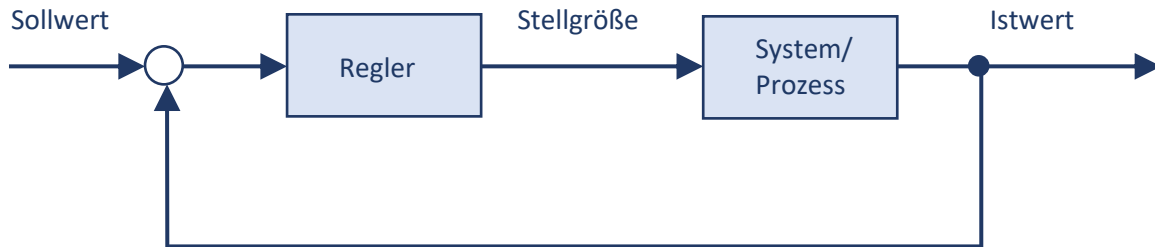


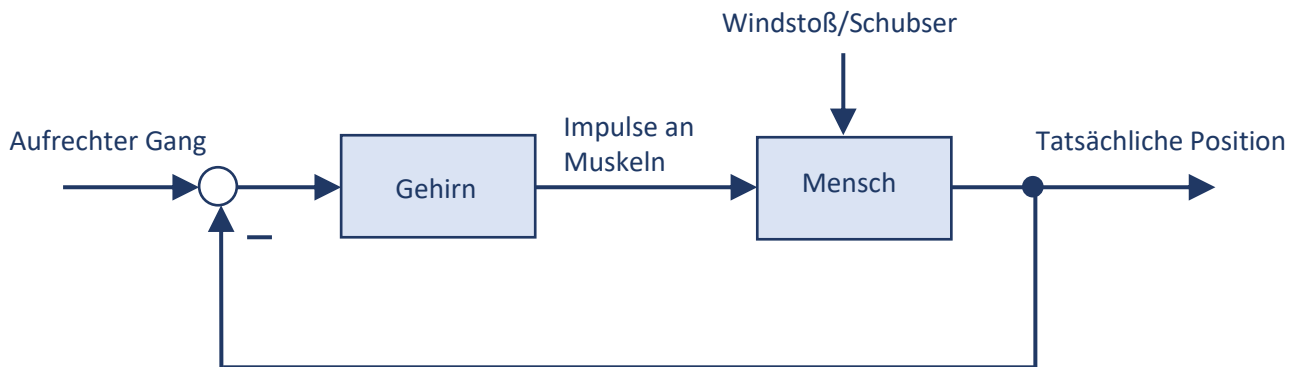
Abbildung 1-1: Regelkreis, gekennzeichnet durch einen geschlossenen Wirkungsweg

Mit dem Signalflussplan steht eine vereinfachte Darstellung von Wirkungszusammenhängen in technischen Systemen zur Verfügung. In Blöcken werden einzelne Elemente des Systems dargestellt oder Funktionseinheiten zusammengefasst. Oft wird das Verhalten der Systemelemente in den Blöcken durch mathematische Gleichungen (Differentialgleichung) beschrieben.

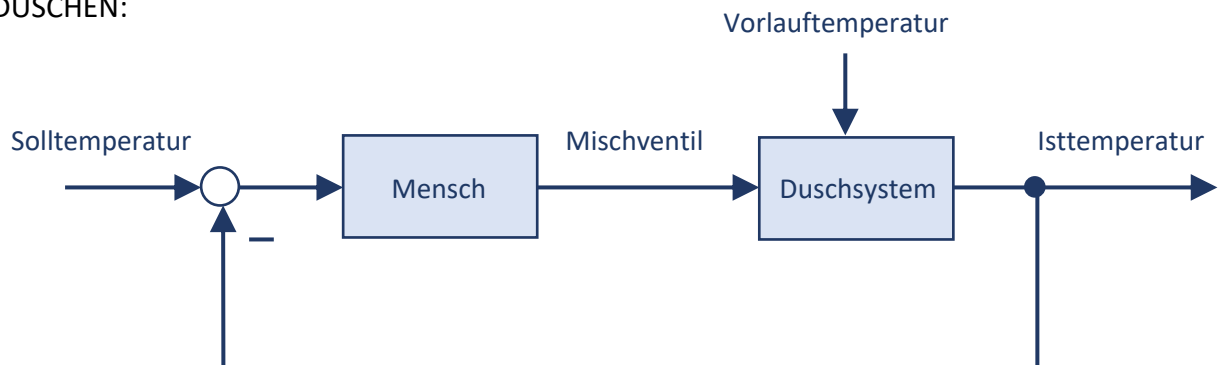
1.4 SIGNALFLUSSPLAN FÜR DIE REGELUNGSTECHNIKBEISPIELE

Erarbeiten des Signalflussplans (der Blockstruktur) für die Regelungstechnikbeispiele

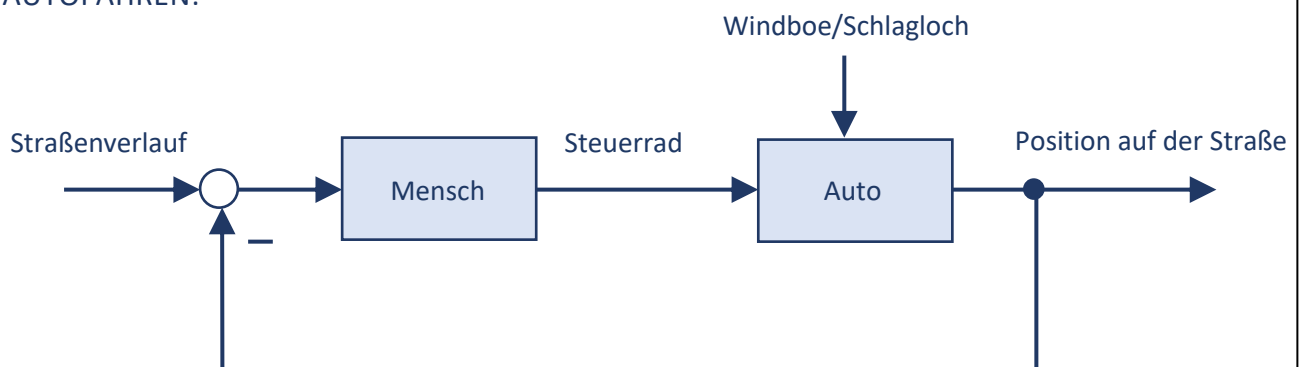
GLEICHGEWICHTSORGAN:



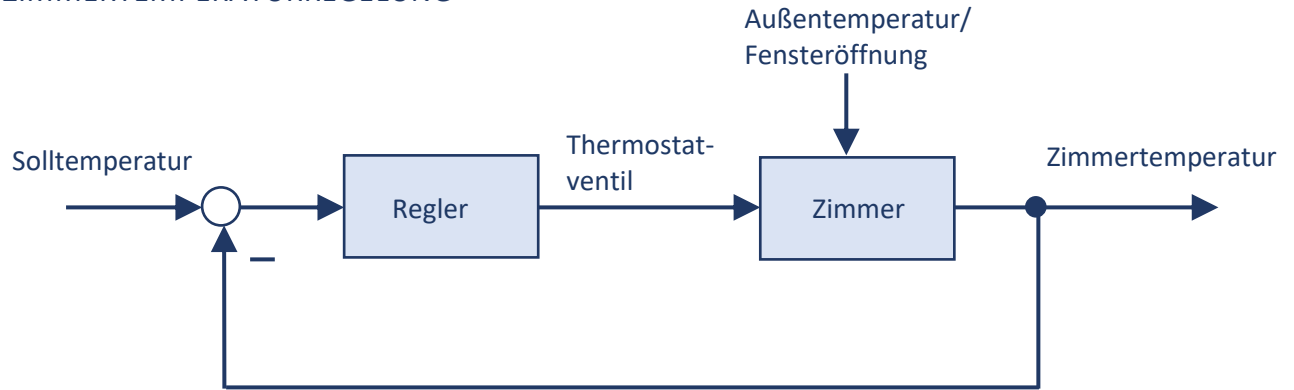
DUSCHEN:



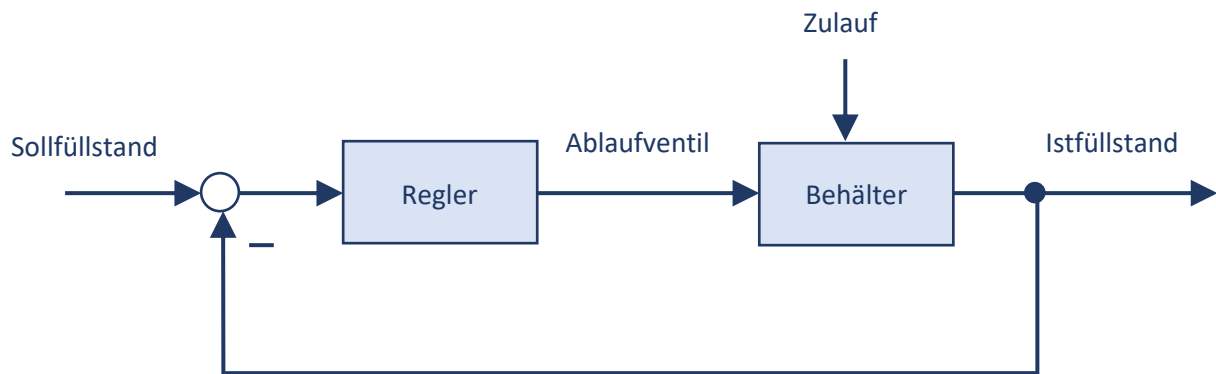
AUTOFAHREN:



ZIMMERTEMPERATURREGELUNG



FÜLLSTANDSREGELUNG

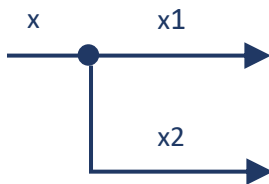


2 SIGNALFLUSSPLAN (BLOCKSTRUKTUR)

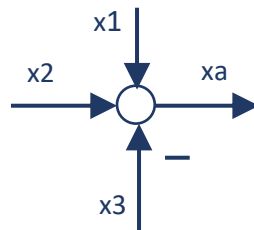
Folgende Signalflussplanelemente (Blockstrukturelemente) stehen zur Verfügung.



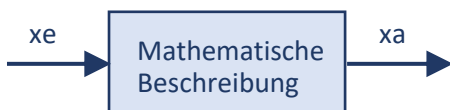
Signal x mit gerichtetem Wirkungssinn



Verzweigungsstelle des Signals x: $x_1=x_2=x$



Additionsstelle (kein Vorzeichen entspricht +):
 $x_a = x_1 + x_2 + x_3$

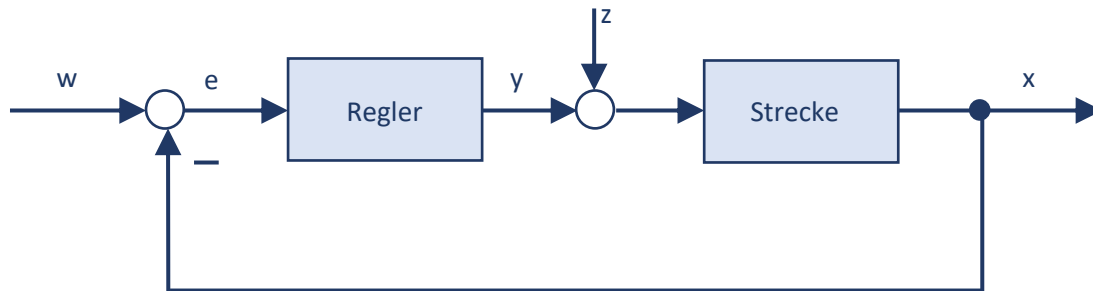


Gerichtetes, rückwirkungsfreies Übertragungsglied

Ein Block beschreibt praktisch den (mathematischen) Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal x_e und dem Ausgangssignal x_a . Zum Untersuchen des Verhaltens eines Blockes wird meistens als Testsignal (Testfunktion) ein Sprung auf das Eingangssignal x_e gegeben und das zeitliche Verhalten des Ausgangssignals x_a betrachtet. Das zeitliche Verhalten wird auch als Übertragungsverhalten bezeichnet.

2.1 STANDARDREGELKREIS

Der Standardregelkreis sieht im Signalflussplan folgendermaßen aus:



Hierbei wird das System oder der Prozess als **Strecke bzw. Regelstrecke** bezeichnet.

BEZEICHNUNGEN:

Führungsgröße (Sollwert) w

Die Führungsgröße (Sollwert) ist die Aufgabengröße, der die Regelung (der Istwert) folgen soll. Sie wird von außen zugeführt und wird nicht von der Regelung beeinflusst.

Regelgröße (Istwert) x

Die Regelgröße ist diejenige Größe der Regelstrecke, die zum Zwecke des Regelns erfasst wird und mit der Führungsgröße (Sollwert) verglichen wird. Ziel der Regelung ist, dass nach einem gewissen Zeitverlauf (Einschwingverhalten) die Regelgröße den Wert der Führungsgröße annimmt.

Regeldifferenz e

Die Regeldifferenz ist die Differenz zwischen der Führungsgröße und der Regelgröße

$$e = w - x \text{ (Regeldifferenz, Regelfehler)}$$

Regelabweichung x_w

Die Regelabweichung ist die Differenz zwischen Regelgröße und Führungsgröße, also die negative Regeldifferenz $x_w = x - w$.

Stellgröße y

Die Stellgröße ist die Ausgangsgröße des Reglers und das Eingangssignal für die Strecke (den Prozess). Sie überträgt die regelnde Wirkung an den Prozess (Strecke)

Störgröße

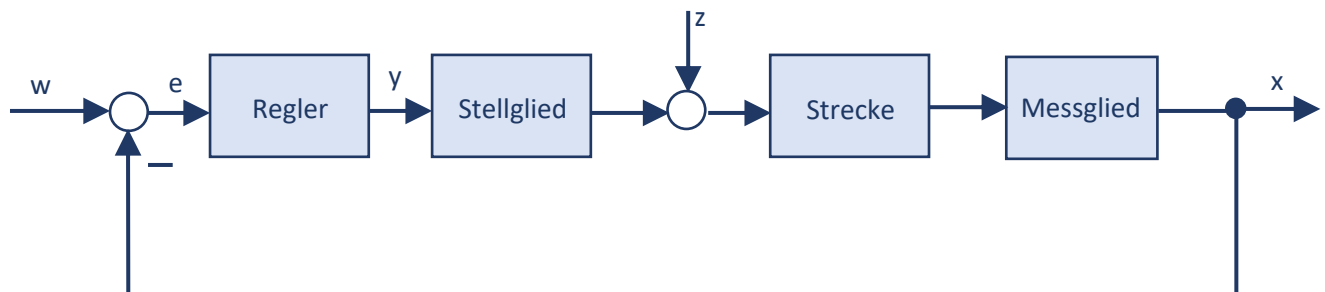
z

Eine Störgröße ist eine von außen wirkende Größe, die eine Veränderung der Regelgröße bewirkt, somit die Regelung beeinträchtigt und mit Hilfe des Reglers ausgeregelt werden muss.

Oft werden im Regelkreis zusätzlich noch das Stellglied und die Messeinrichtung betrachtet.

2.2 DER ERWEITERTE REGELKREIS

Im erweiterten Regelkreis werden zusätzlich zum Standardregelkreis das Stellglied und das Messglied dargestellt.



2.2.1 REGLER

Der Regler (das Regelglied) ist die Funktionseinheit, die aus der Regeldifferenz ($e = w - x$) das Stellsignal (Stellgröße) bestimmt, mit dem die Strecke (über das Stellglied) so beeinflusst werden soll, dass die Aufgabenstellung (Sollwert = Istwert) erreicht wird.

2.2.2 STELLGLIED

Das Stellglied ist die zur Strecke gehörende Funktionseinheit, die das Stellsignal in eine die Strecke beeinflussende Größe umsetzt.

2.2.3 STRECKE (REGELSTRECKE)

Die Strecke ist das aufgabenmäßig zu beeinflussende System, der Prozess oder die Anlage.

2.2.4 MESSGLIED (MESSEINRICHTUNG)

Die Messeinrichtung ist die Funktionseinheit, die das in der Strecke beeinflusste Signal in eine gemessene Größe wandelt.

Die Blöcke haben ein Zeitverhalten (Übertragungsverhalten), d.h. abhängig vom Eingangssignal verändert sich das Ausgangssignal über die Zeit.

2.2.5 AUFGABE DES REGLERS

Die Aufgabe des Reglers in einem Regelkreis ist also, die Differenz zwischen Führungswert (Sollwert) und Regelgröße (Istwert) durch Verändern des Stellsignals so zu beeinflussen, dass die gemessene Regelgröße nach einer gewissen Zeit den Wert der Führungsgröße annimmt. Da in einem Regelkreis auch Störungen auftreten können, die wiederum eine Änderung des Istwertes bewirken, muss der Regler auch hier versuchen durch Verstellen des Stellsignals den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

2.3 FÜHRUNGSREGELUNG UND STÖRWERTREGELUNG

Man unterscheidet zwei Arten von Regelungen. Ändert sich der Sollwert so spricht man bei einer Regelung vom Führungsverhalten. Werden Störungen ausgeglichen, so wird das Verhalten der Regelung auf Störungen als Störungsverhalten bezeichnet. Ein Regler muss also reagieren, wenn sich der Sollwert ändert oder wenn das Auftreten einer Störung den Istwert beeinflusst. In beiden Fällen wird durch Ändern des Stellsignals versucht, dass der Istwert wieder den Wert des Sollwertes annimmt.

2.3.1 FÜHRUNGSREGELUNG

Die Führungsgröße (Sollwert) wird verändert und der Regler muss durch Beeinflussen des Stellsignals versuchen, die Regelgröße (Istwert) wieder auf den neuen Führungswert zu bringen.

2.3.2 STÖRWERTREGELUNG

Durch Störungen wird die Regelgröße verändert. Der Regler muss versuchen durch Verändern des Stellsignals, die Störung aus zu regeln, so dass nach einer gewissen Zeit die Regelgröße wieder den Wert der Führungsgröße annimmt.

In der Praxis hat ein eingestellter Regler oft unterschiedlich gute Führungsverhalten oder Störverhalten. Bei manchen Regelungen ist ein gutes Störverhalten notwendig (z.B. Füllstandsregelung in einem Behälter mit festem Niveau), bei anderen ein gutes Führungsverhalten (z.B. Vorgabe von Temperaturprofilen bei chemischen Reaktionen).

2.3.3 EINSCHWINGVERHALTEN

Wie an den folgenden Beispielen zu sehen ist, wird durch Verstellen des Stellsignals nicht sofort erreicht, dass der Istwert wieder einen neuen festen Wert annimmt, sondern der Istwert wird sich über einen von der Strecke abhängigen Zeitraum verändern. Das Verstellen des Thermostatventils an einem Heizkörper zum Beispiel wird eine langsame Änderung der Zimmertemperatur nach sich ziehen. Das heißt, der Istwert wird nach einer bestimmten Zeitdauer einen neuen festen Wert annehmen. Dieses Verhalten nennt man Einschwingverhalten. Die Zeitdauer, wie lange ein System braucht, um einzuschwingen, ist sehr unterschiedlich. Es gibt Systeme, deren Einschwingverhalten sehr langsam sind, wie z.B. bei umwelttechnischen oder biologischen Systemen (Wachstumsraten in Bioreaktoren oder Kläranlagen), und andere Systeme, die sehr schnell reagieren. Beispiele hierfür sind elektrische Regelungen oder Druckregelungen.

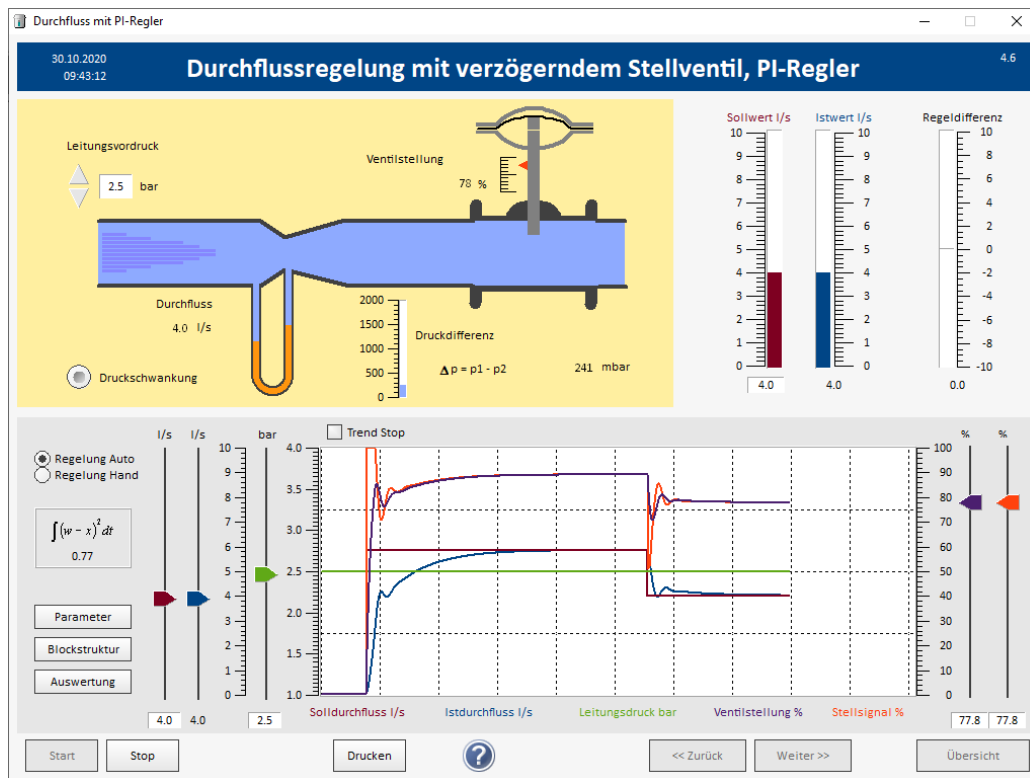


Abbildung 2-1 Schnelles Einschwingverhalten bei einer Durchflussregelung

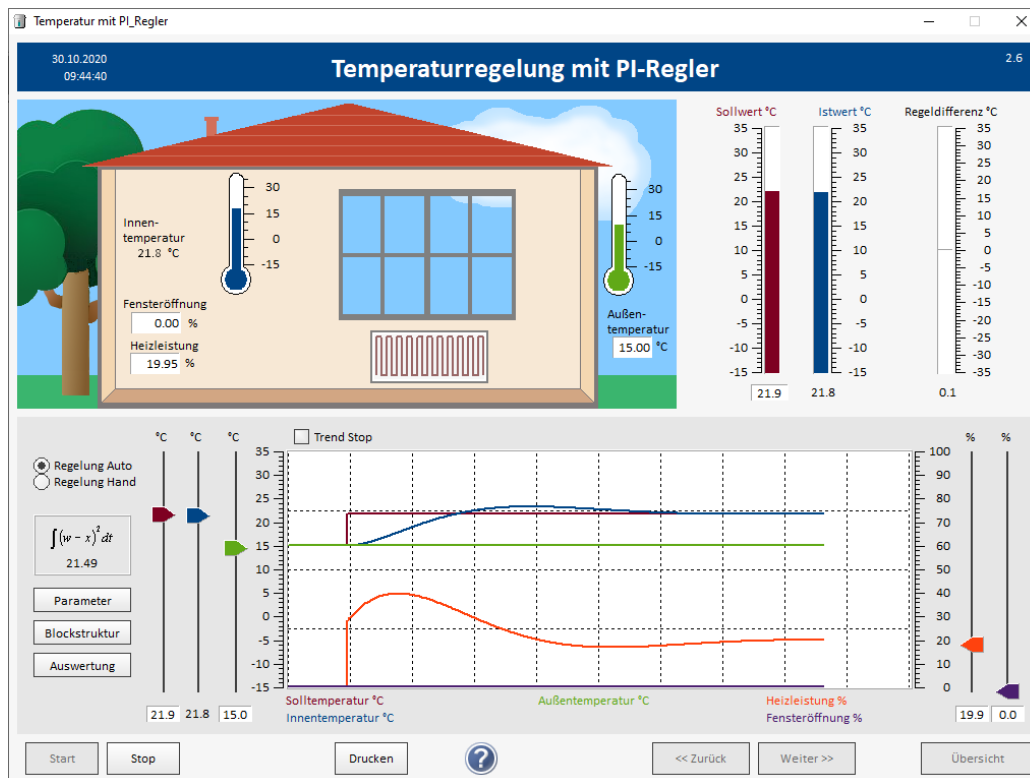


Abbildung 2-2 Langsames Einschwingverhalten bei einer Zimmertemperaturregelung

Bei Sollwertänderungen oder Störungen können in der Regelungstechnik prinzipiell drei Verhalten auftreten:

1. Nach einer Einschwingphase erreicht der Istwert den Sollwert
2. Nach einer Einschwingphase bleibt der Istwert konstant, hat aber nicht den Wert des Sollwertes erreicht. In diesem Fall behält man eine bleibende Regelabweichung oder Regeldifferenz. Istwert und Sollwert sind unterschiedlich. In den meisten Fällen bedeutet dies, dass der Regler, der das System regeln soll, für diese Regelung nur bedingt geeignet ist.
3. Der Istwert fängt an zu schwingen und hört auch nicht wieder auf zu schwingen. In diesem Fall spricht man von einem instabilen System. Der Istwert schwingt nicht auf den Sollwert ein. Ein Regler, der dieses Verhalten erzeugt, ist nicht zu gebrauchen oder seine Parameter sind schlecht oder falsch eingestellt.

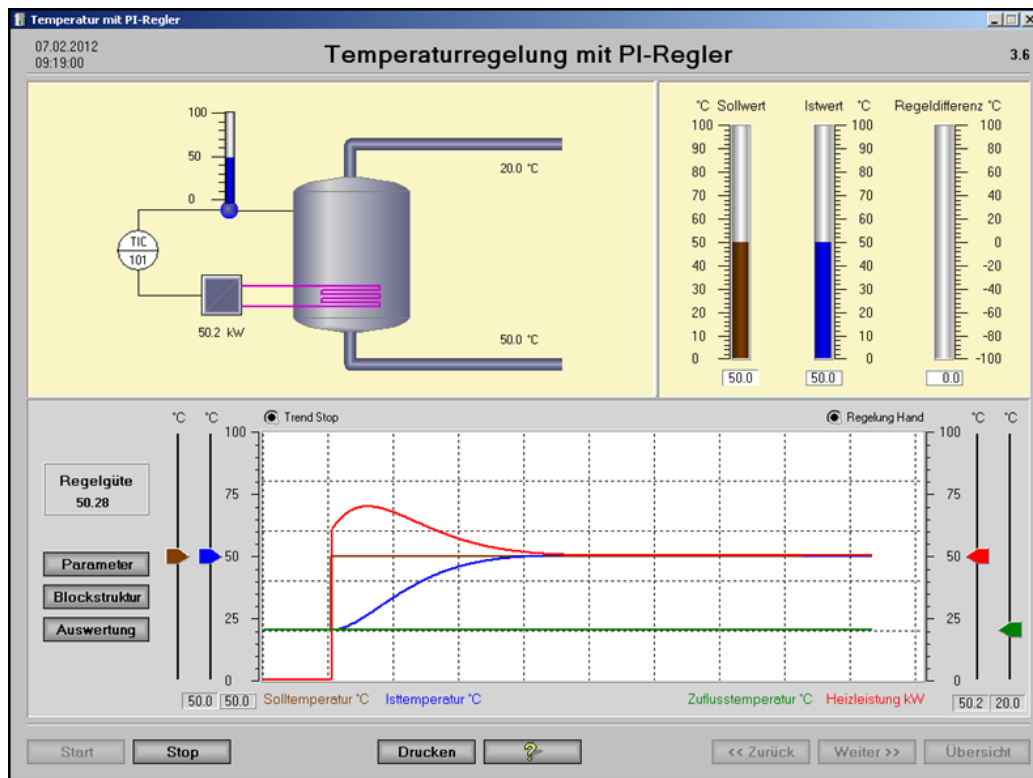


Abbildung 2-3 Nach der Einschwingphase erreicht der Istwert (Regelgröße, blaues Signal) den vorgegebenen Sollwert (Führungswert, braunes Signal)

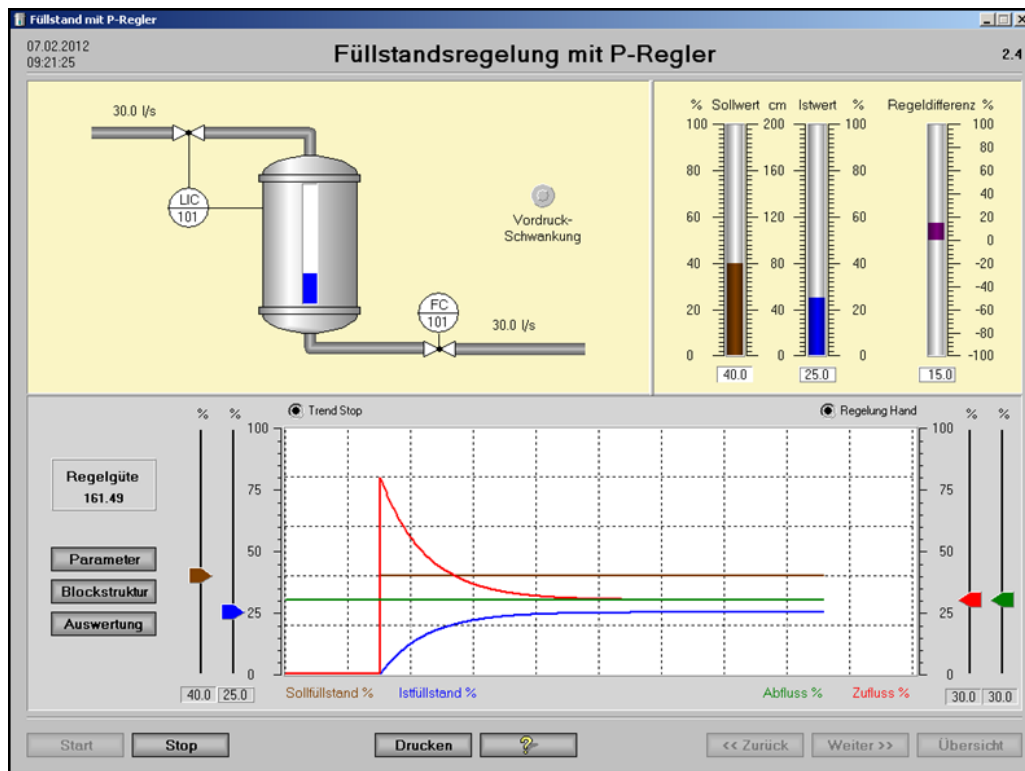


Abbildung 2-4 Der Istwert (Regelgröße, blaues Signal) erreicht auch nach beliebig langer Zeit nicht den vorgegebenen Sollwert (Führungswert, braunes Signal), bleibende Regelabweichung

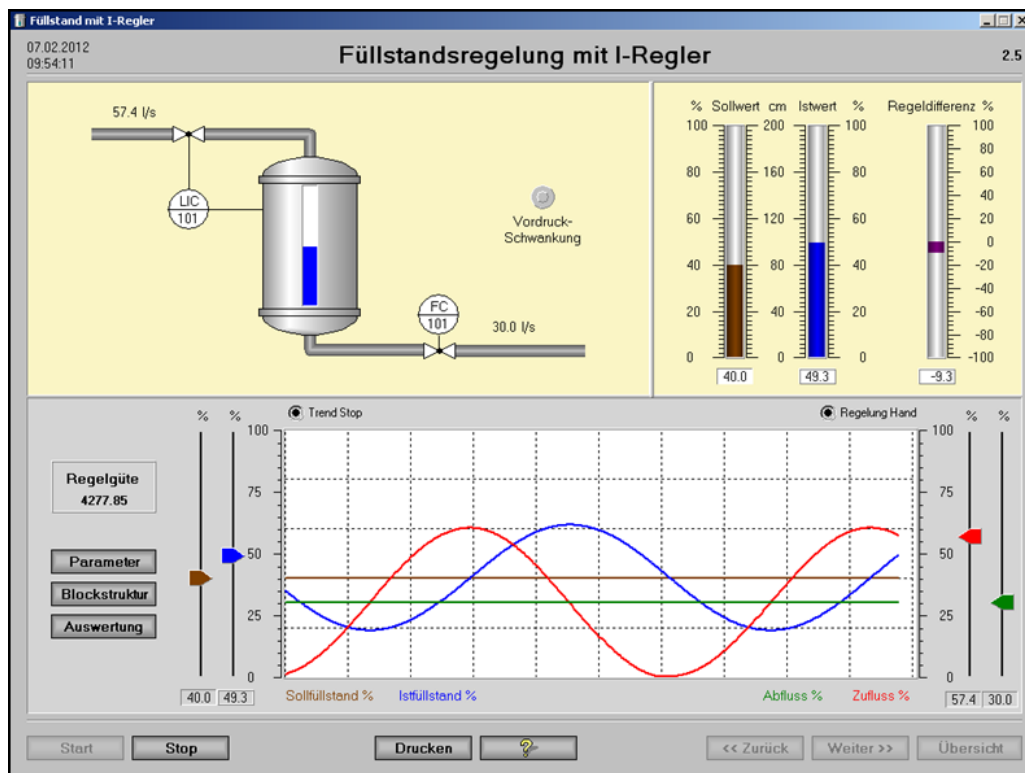


Abbildung 2-5 Der Istwert (Regelgröße, blaues Signal) erreicht nicht den vorgegebenen Sollwert (Führungswert, braunes Signal). Es führt eine Dauerschwingung um den Sollwert durch

Der erste Fall ist natürlich der anzustrebende Fall (Abbildung 2-3). Bei Störungen in dem System oder bei Sollwertänderungen nimmt der Istwert nach einer Einschwingphase den Wert des Sollwertes an. Bei diesem Einschwingverhalten können auch wieder zwei Fälle auftreten:

1. Der Istwert nimmt den Wert des Sollwerts nach der Einschwingphase an, ohne dass der Istwert den Sollwert über- bzw. unterschritten hat.
2. Der Istwert nimmt den Wert des Sollwerts an, hat dabei aber mindestens einmal den Wert des Sollwerts über- bzw. unterschritten. Dieses Einschwingen kann natürlich sehr unterschiedlich sein. Es kann bedeuten, dass der Istwert den Sollwert nur einmal über- bzw. unterschreitet oder aber auch, dass der Istwert um den Sollwert schwingt und erst nach langer Zeit langsam auf den Sollwert einschwingt.

Um das Ziel der Regelungstechnik nicht aus den Augen zu verlieren, wird das Prinzip der Regelungstechnik nach diesen Beispielen und Überlegungen noch einmal formuliert:

In einem System (Prozess, Anlage) wird eine gemessene oder erfasste Größe, der sogenannte Istwert, mit einer vorgegebenen Größe, dem Sollwert, verglichen und es wird versucht, durch Verstellen einer Stellgröße das System so zu beeinflussen, dass nach einer gewissen Zeit, der sogenannten Einschwingphase, der Istwert gleich dem Sollwert ist. In technischen Systemen setzt man einen Regler ein, der den Istwert mit dem Sollwert vergleicht und Einfluss auf das Stellsignal und damit auf das System nimmt.

3 ZEITVERHALTEN VON BLÖCKEN

3.1 STRECKENBLÖCKE

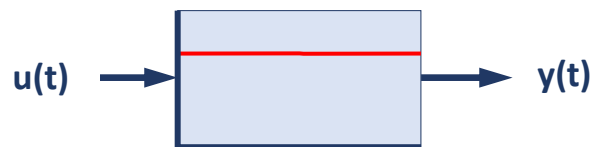
Wie aus den Beispielen zu ersehen ist, haben die Regelstrecken (das System, der Prozess, die Anlage) ein Zeitverhalten, d. h. bei einer Änderung des Eingangssignals hat das Ausgangssignal der Strecke ein zeitliches Verhalten. Zum Testen des zeitlichen Verhaltens der Strecke wird oft eine sprungförmige Änderung des Eingangssignals gewählt und der Verlauf des Ausgangssignals betrachtet.

Mithilfe von Blöcken kann das zeitliche Verhalten von Strecken oder Systemen beschrieben (simuliert) werden. Das Verhalten eines Blocks wird durch den zeitlichen Verlauf des Ausgangssignals bei einer sprungförmigen Änderung des Eingangssignals von 0 auf 1 (dem Einheitssprung) dargestellt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Blöcke mit Ihrem Zeitverhalten und der zugehörigen Gleichung beschrieben.

Im Anhang wird das Verhalten weiterer Blöcke aufgeführt.

3.1.1 P-BLOCK:



Der P-Block ist ein Verstärker. Das Eingangssignal $u(t)$ wird mit der Verstärkung K multipliziert und auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet.

Gleichung:
$$y(t) = K \cdot u(t)$$

Beispiel:

Sei $K = 2$, dann ist $y(t) = 2 \cdot u(t)$, d.h. bei einer sprungförmigen Änderung der Eingangsgröße $u(t)$ von 0 auf 1 nimmt das Ausgangssignal $y(t)$ sofort den Wert 2 an.

3.1.2 I-BLOCK:



Der I-Block ist ein Integrator. Das Eingangssignal $u(t)$ wird über die Zeit integriert und auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Integrationszeitkonstante T_I gibt die Schnelligkeit der Integration an. Große T_I bewirken ein langsames Integrieren

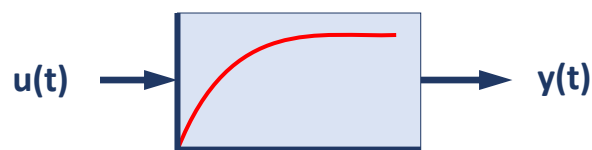
Gleichung:

$$y(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t u(\tau) \cdot d\tau$$

Beispiel:

Den Integrator kann man sich wie einen Behälter vorstellen, in den eine konstante Wassermenge fließt. Der Füllstand in dem Behälter steigt gleichmäßig an. Fließt mehr Wasser aus dem Behälter heraus als herein fließt, so wird der Füllstand gleichmäßig sinken. Ähnlich verhält sich ein Integrator. Wird am Eingang ein konstanter positiver Wert angelegt, so steigt der Wert am Ausgang konstant an. Ist der Wert am Eingang negativ, so sinkt der Wert am Ausgang gleichmäßig.

3.1.3 PT1-BLOCK:



Der PT1-Block ist ein Verzögerungsblock. Das Eingangssignal $u(t)$ wird mit einer umgekehrten e-Funktion zeitverzögert und mit der Verstärkung K multipliziert auf das Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstante T_1 gibt den Verzögerungsfaktor, K die Verstärkung an. Ein großes T_1 bewirkt eine große Verzögerung, das bedeutet, dass bei einer Änderung des Eingangswertes $u(t)$ das Ausgangssignal $y(t)$ seinen neuen Endwert erst nach einer langen Zeitdauer annimmt. Ein PT1-Block kann auch wie ein Tiefpassfilter zur Glättung von Signalen eingesetzt werden.

Gleichung:

$$T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t)$$

Beispiel:

Das Temperaturverhalten in einem Zimmer lässt sich in etwa durch einen Pt1-Block beschreiben. Dreht man schlagartig das Ventil am Heizkörper auf, so fängt die Temperatur im Raum langsam an zu steigen, bis sie nach einer gewissen Zeit einen festen Wert erreicht hat (vgl. blaues Signal).

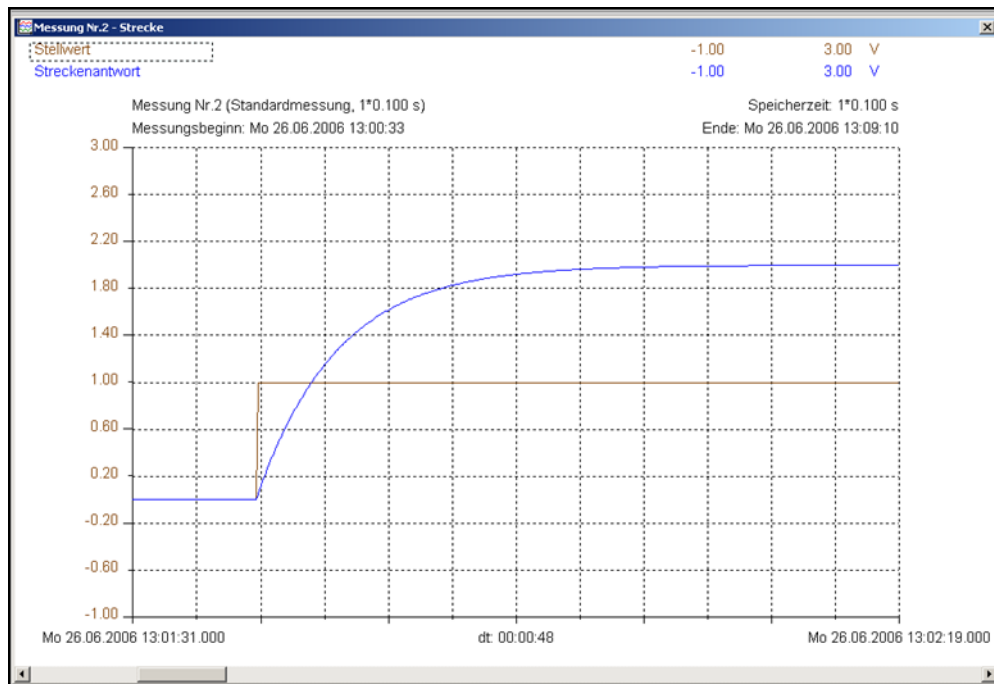


Abbildung 3-1 Zeitverhalten eines Pt1-Blocks

3.1.4 T_T -BLOCK TOTZEIT-BLOCK:



Der Totzeit-Block gibt das Eingangssignal $u(t)$ um die Totzeit T_T verzögert auf das Ausgangssignal $y(t)$ aus.

Gleichung:

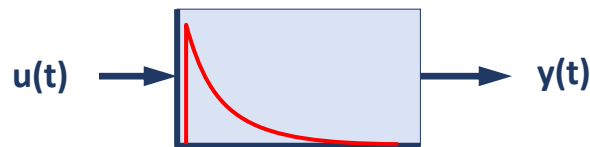
$$y(t) = u(t - T_T)$$

Beispiel:

Das Verhalten eines Totzeitblocks kann man sich vorstellen wie ein Transportband. Das was am Anfang auf das Band gelegt wird, kommt nach einer bestimmten Zeit am Ende des Bandes an. Ein weiteres Beispiel wäre das Messen der Temperatur in einem von Wasser durchflossenen Rohr. Am Anfang der Rohrs wird das Wasser erwärmt und am Ende des Rohrs wird die Temperatur gemessen.

Um zu wissen, welche Temperatur das Wasser am Anfang des Rohres hat, muss man warten, bis das Wasser am Ende des Rohres ankommt.

3.1.5 DT1-BLOCK:



Der DT1-Block ist ein Differenzierer mit Verzögerung. Das Eingangssignal $u(t)$ wird differenziert und verzögert auf das Ausgangssignal $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstante T_D gibt die Verstärkung der Differentiation und die Zeitkonstante T_1 gibt die Verzögerung an. Bei einer sprunghaftigen Änderung des Eingangssignals $u(t)$ von 0 auf 1 springt das Ausgangssignal $y(t)$ auf den Wert $T_D \cdot \dot{u}(t)$ und fällt dann langsam mit einer umgekehrten e-Funktion wieder auf 0 ab.

Gleichung:

$$T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = T_D \cdot \dot{u}(t)$$

Beispiel:

Menschliche Wahrnehmung bzw. menschliches Verhalten kann häufig mit einem DT1 System beschrieben werden. Betritt man beispielsweise einen gut besuchten Raum, nimmt man intensiv den Wechsel von der frischen Luft draußen hinein in die verbrauchte Luft innen wahr. Diese Wahrnehmung lässt dann schnell wieder nach, sodass man die verbrauchte Luft nicht mehr wahrnimmt. Der Organismus reagiert also auf die Änderung der Luftqualität.

3.2 REGLERBLÖCKE

Als Standardregler werden in der Regelungstechnik der Zweipunktregler, der P-Regler, der PI-Regler, der PID-Regler und mit Einschränkungen der I-Regler eingesetzt.

Das Verhalten des P-, I-, PI- und PID-Reglers setzt sich aus einer Kombination von den oben beschriebenen Blöcken zusammen.

3.2.1 P-REGLER:

Der P-Regler ist ein reiner Verstärker. Er lässt sich durch einen P-Block beschreiben.

Gleichung:

$$y(t) = K \cdot e(t)$$

Parameter: Verstärkung K

3.2.2 I-REGLER:

Der I-Regler ist ein Integrator. Er lässt sich durch einen I-Block beschreiben.

Gleichung:

$$y(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau$$

Parameter: Nachstellzeit T_I (T_I -Zeitkonstante)

3.2.3 PI-REGLER:

Der PI-Regler ist eine Parallelverschaltung des P- und des I-Blocks

Gleichung:

$$y(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau)$$

Parameter: Verstärkung K
Nachstellzeit T_I (T_n) = T_I (TI-Integrierzeit)

3.2.4 PID-REGLER:

Der PID-Regler ist eine Parallelverschaltung des P-, des I-, und des Dt1-Blocks

Gleichung:

$$y(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_D \cdot \dot{e}(t))$$

Parameter: Verstärkung K
Nachstellzeit T_I (T_n) = T_I (TI-Integrierzeit)
Vorhaltezeit T_D (T_v) = T_D (T_D -Zeitkonstante)

Die Kombination des PID-Reglers aus den Standardblöcken sieht folgendermaßen aus, wobei der obere P-Block die Verstärkung 1 haben muss:

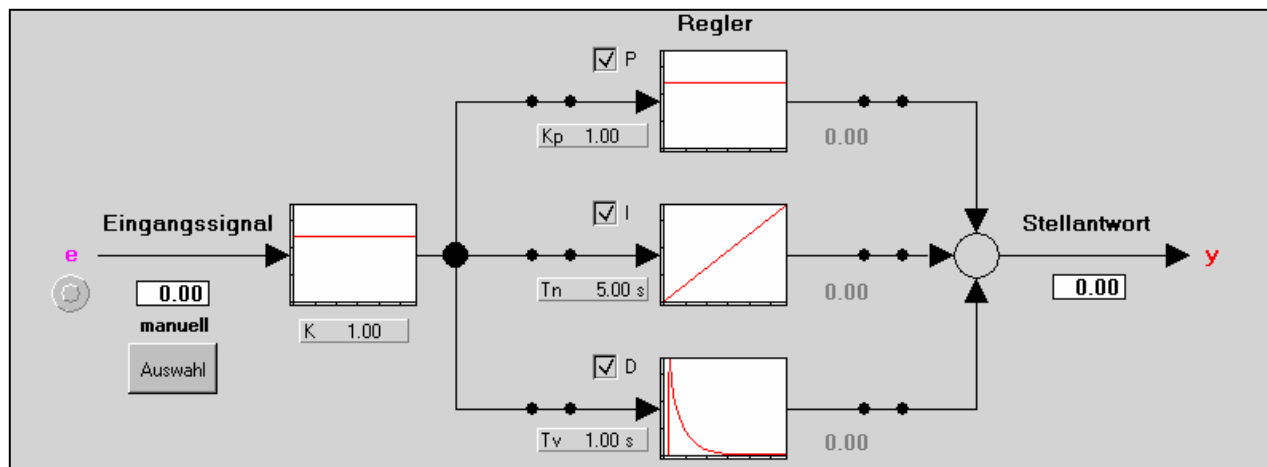


Abbildung 3-2 Kombination eines PID-Regler aus den einzelnen Blöcken

4 REGELKREISVERHALTEN MIT ZWEIPUNKTREGLER

Der Zweipunktregler ist der einfachste Regler. Er gibt im Gegensatz zu den anderen Reglern nur zwei Signalzustände aus, z.B. an/aus, 0/1, zu/auf, 0%/100%.

Der Zweipunktregler arbeitet folgendermaßen: Überschreitet der Istwert den Sollwert, so gibt er eine 0 aus. Liegt der Istwert unter dem Sollwert, gibt der Zweipunktregler eine 1 aus.

Das Verhalten lässt sich am einfachsten an Beispielen erklären:

Beispiele

1. Für das Erhitzen einer Flüssigkeit in einem Reaktor steht ein Heizstab zur Verfügung, der nur ein- oder ausgeschaltet werden kann. Der Zweipunktregler arbeitet folgendermaßen: Überschreitet die Isttemperatur die Solltemperatur, so schaltet der Zweipunktregler den Heizstab ab. Liegt die Isttemperatur unterhalb der Solltemperatur, so schaltet der Zweipunktregler den Heizstab ein.
2. Der Füllstand in einem Behälter soll über den Zufluss geregelt werden. Über den Abfluss wird diskontinuierlich Wasser entnommen. Das Zuflussventil lässt sich nur auf- oder zuschalten. Der Zweipunktregler arbeitet folgendermaßen: Liegt der Istwert über dem Sollwert, schließt der Zweipunktregler das Zulaufventil. Ist der Istwert kleiner als der Sollwert, so öffnet der Zweipunktregler das Zulaufventil.

Aus den beiden Beispielen lässt sich ersehen, welche Nachteile bei einem Zweipunktregler vorliegen. Der Regler kann nicht „Strich“ fahren, d.h. mit dem Zweipunktregler ist es nicht möglich so zu regeln, dass der Istwert über längere Zeit den Wert des Sollwertes annimmt und beibehält. Ein weiterer Nachteil liegt in der Schalthäufigkeit. Ein Überschreiten des Sollwertes bedeutet ein Einschalten oder Öffnen, während beim Unterschreiten des Sollwertes sofort ausgeschaltet bzw. geschlossen wird. Die Folge ist ein dauerndes Ein- und Ausschalten, was die Lebensdauer des Stellglieds sicherlich negativ beeinflusst. Um die Schalthäufigkeit zu reduzieren wird beim Zweipunktregler eine Hysterese eingesetzt. Der Regler schaltet jetzt nicht mehr direkt, wenn der Sollwert über- bzw. unterschritten wird, sondern er schaltet nur dann, wenn eine Bandbreite um den Sollwert, die bestimmt wird durch die Hysterese, unter- bzw. überschritten wird.

4.1 BEISPIEL FÜR EINE TEMPERATURREGELUNG MIT ZWEIPUNKTREGLER

Die Temperatur in einem Durchlauferhitzer soll mit einer elektrischen Heizung geregelt werden. Der Zu- und der Abfluss des Durchlauferhitzers sind gleich und konstant. Die Zuflusstemperatur beträgt konstant 20°C. Die elektrische Heizung in dem Durchlauferhitzer kann nur an- bzw. ausgeschaltet werden. In Abbildung 4-1 wird ein Zweipunktregler mit einer Hysterese von 10°C eingesetzt. Der Sollwert (braunes Signal) wird auf 50°C gestellt. Der Zweipunktregler schaltet die elektrische Heizung (rotes Signal) ein. Die Temperatur (blaues Signal) in dem Behälter fängt an zu steigen. Überschreitet die Temperatur den Wert von 60°C (Sollwert + Hysterese), schaltet der Regler die

Heizung aus. Die Heizleistung (rotes Signal) geht auf 0 und die Temperatur im Behälter fängt wieder an zu sinken, da die Zuflusstemperatur 20 °C beträgt. Unterschreitet die Temperatur den Wert von 40°C (Sollwert – Hysterese), schaltet der Regler die Heizung wieder ein. Dieses Verhalten setzt sich fort, bis der Sollwert auf 0 gesetzt oder die Heizung ausgeschaltet wird.

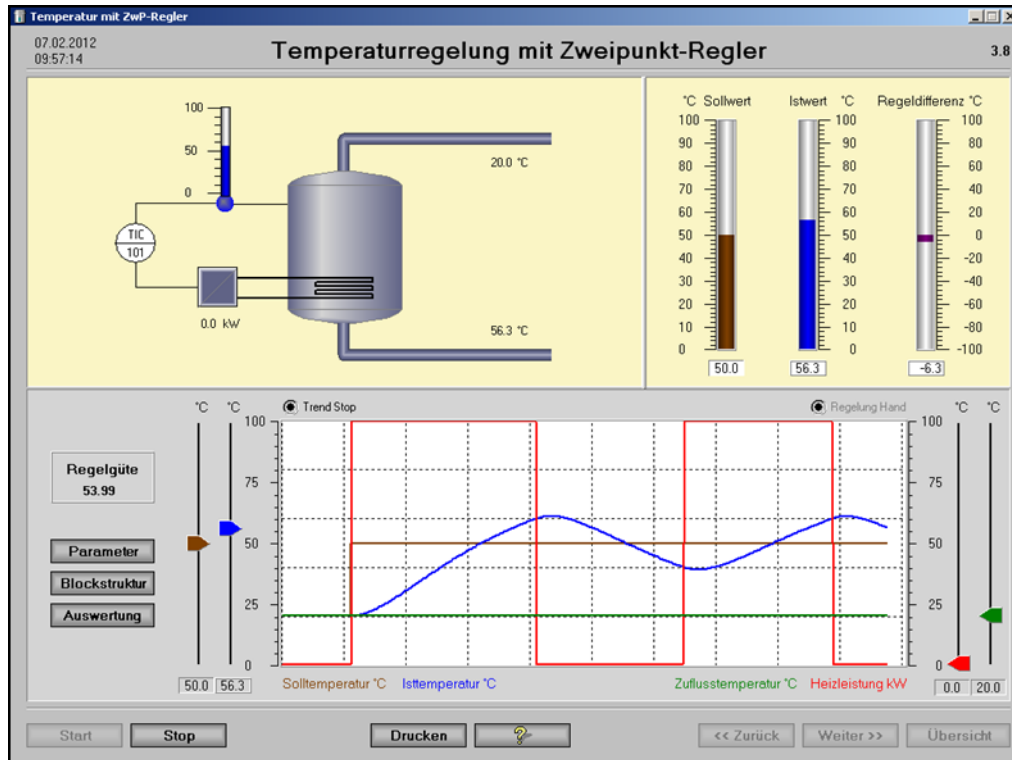


Abbildung 4-1 Temperaturregelung mit Zweipunktregler

Wie man sehen kann fährt die Regelung nicht „Strich“, sondern der Istwert (Temperatur in dem Durchlauferhitzer) schwankt um den Sollwert. Würde man als Hysteresewert statt der 10 eine 5 einstellen, wird sich die Schaltfrequenz erhöhen, dafür schwankt der Istwert in einem kleineren Band um den Sollwert.

4.2 BEISPIEL FÜR EINE FÜLLSTANDSREGELUNG MIT ZWEIPUNKTREGLER

Der Füllstand in einem Behälter soll mit einem Ventil im Zulauf geregelt werden. Der Abfluss ist konstant auf 30 l/s eingestellt. Das Zulaufventil kann nur vollständig geöffnet oder geschlossen werden. Wenn das Ventil geöffnet ist, fließen 100l/s in den Behälter. In Abbildung 4-2 wird ein Zweipunktregler mit einer Hysterese von 10% eingesetzt. Der Sollwert (braunes Signal) wird auf 60% gestellt. Der Zweipunktregler öffnet das Zulaufventil (rotes Signal). Der Füllstand (blaues Signal) in dem Behälter fängt an zu steigen. Überschreitet der Füllstand den Wert von 70% (Sollwert + Hysterese), schließt der Regler das Zulaufventil (rotes Signal). Der Füllstand fängt wieder an zu sinken, da der Abfluss konstant auf 30l/s eingestellt ist. Unterschreitet der Füllstand den Wert von

50% (Sollwert – Hysterese), öffnet der Regler das Zulaufventil wieder. Dieses Verhalten setzt sich fort, bis der Sollwert auf 0 gesetzt oder das Zulaufventil geschlossen wird.

Wie man sehen kann, fährt die Regelung nicht „Strich“, sondern der Istwert (Füllstand in dem Behälter) schwankt um den Sollwert. Würde man als Hysteresewert statt der 10 eine 5 einstellen, wird sich die Schaltfrequenz erhöhen, dafür schwankt der Istwert in einem kleineren Band um den Sollwert.

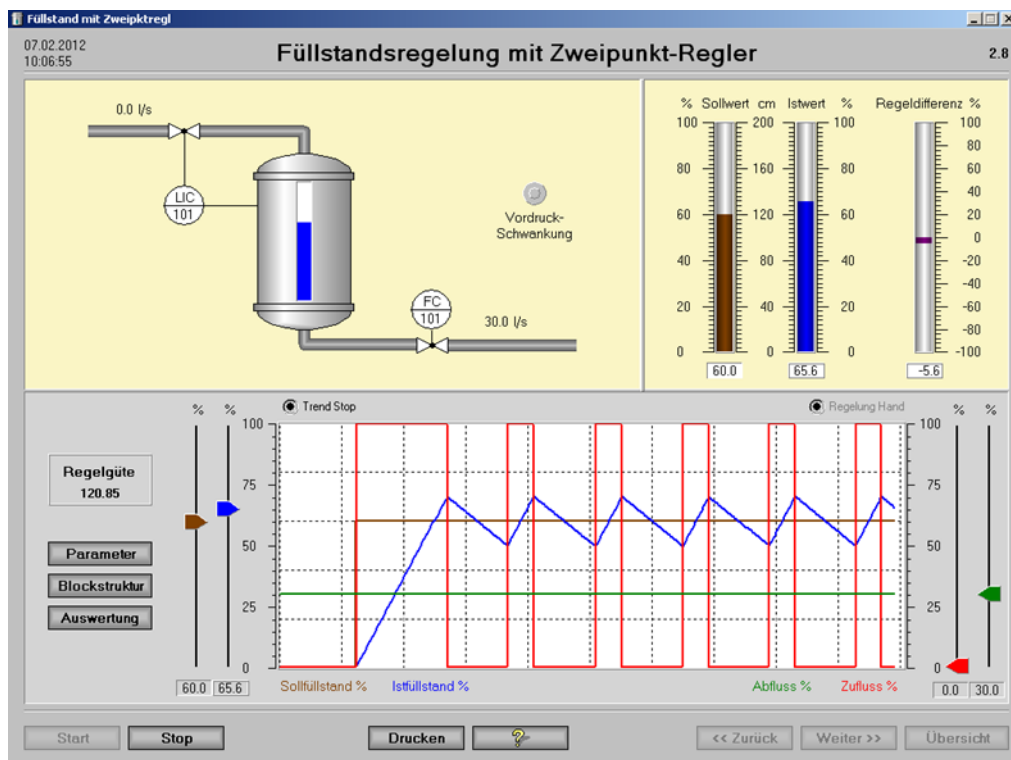


Abbildung 4-2 Füllstandsregelung mit Zweipunktregler

Wenn das Zulaufventil vollständig geöffnet ist, laufen 70 l/s (Zulauf – Ablauf = 100 l/s – 30 l/s) in den Behälter hinein, während 30 l/s (Ablauf) aus dem Behälter herauslaufen, wenn das Zulaufventil geschlossen ist. Dadurch steigt der Füllstand schneller an, als er abfällt (vgl. blaue Kurve).

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich der Füllstand hier wie ein Integrator verhält. Sein Streckenverhalten entspricht dem Verhalten eines I-Blocks.

5 REGELKREISVERHALTEN MIT STANDARDREGLERN

Zu den Standardreglern zählen der P-Regler, der I-Regler, der PI-Regler, der PD-Regler und der PID-Regler. Der in der Praxis am häufigsten eingesetzte Regler ist der PI-Regler.

5.1 P-REGLER

Der P-Regler sorgt für eine schnelle Regelung. Die Differenz zwischen Sollwert und Istwert wird mit dem Verstärkungsfaktor des Reglers verstärkt und als Stellsignal ausgegeben. Auf eine Änderung zwischen Soll- und Istwert wird also sofort reagiert.

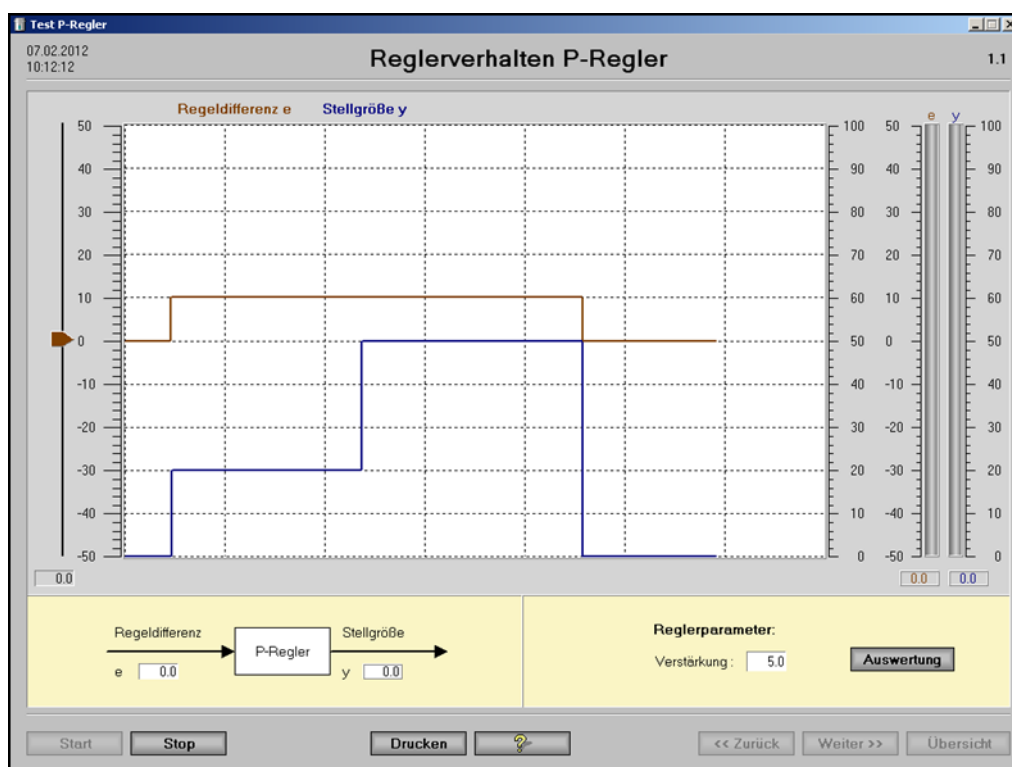


Abbildung 5-1 Verhalten des P-Reglers

In Abbildung 5-1 hatte die Verstärkung des P-Blocks den Wert 2. Das Eingangssignal e (braunes Signal, Regeldifferenz) des P-Blocks wurde von 0 auf 1 gesetzt. Das Ausgangssignal y (blaues Signal, Stellgröße) nahm sofort den Wert 2 an. Danach wurde die Verstärkung von 2 auf 5 gestellt und das Ausgangssignal y nahm sofort den Wert 5 an. Nach dem Setzen von e auf 0 ging y auch sofort auf 0.

Der P-Regler hat den Nachteil, dass man bei vielen Strecken eine bleibende Regelabweichung erhält, d.h. nach der Einschwingphase bleibt eine Differenz zwischen Sollwert und Istwert bestehen. Der P-Regler schafft es bei vielen Strecken nicht, den Istwert auf den Wert des Sollwertes zu bringen.

5.1.1 BEISPIEL: TEMPERATURREGELUNG EINES DURCHLAUFERHITZERS MIT P- REGLER

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, die Temperatur in einem Durchlauferhitzer zu regeln. In den Durchlauferhitzer fließt eine konstante Menge Wasser hinein und die gleiche Menge wieder heraus. Die Temperatur im Zufluss beträgt 20°C. Als Verstärkung für den P-Regler wurde 2 gewählt. Der Sollwert hatte im eingeschwungenen Zustand der Wert 20°C und wurde dann von 20°C auf 50°C erhöht. Das Stellsignal (rotes Signal) des P-Reglers sprang sofort auf den Wert 60kW, da die Differenz zwischen Sollwert und Istwert 50°C – 20°C = 30°C betrug. Nach einer Einschwingphase stellt sich eine bleibende Regelabweichung ein.

Die bleibende Regelabweichung lässt sich dadurch erklären, dass der P-Regler 0 ausgibt, wenn sein Eingang 0 ist. Wenn also die Isttemperatur (Istwert) gleich der Solltemperatur (Sollwert) ist, dann geht 0 in den Regler und der P-Regler gibt 0kW aus. Bei 0kW Heizleistung würde die Isttemperatur in dem Durchlauferhitzer aber auf 20°C gehen und wäre damit ungleich dem Sollwert. Der P-Regler kann es also nicht schaffen, den Istwert auf den Sollwert zu bringen, da er dann 0 (0kW) ausgeben würde.

Durch Erhöhen der Verstärkung erreicht man bei dem Durchlauferhitzer, dass die Differenz zwischen Istwert und Sollwert (Regeldifferenz) kleiner wird.

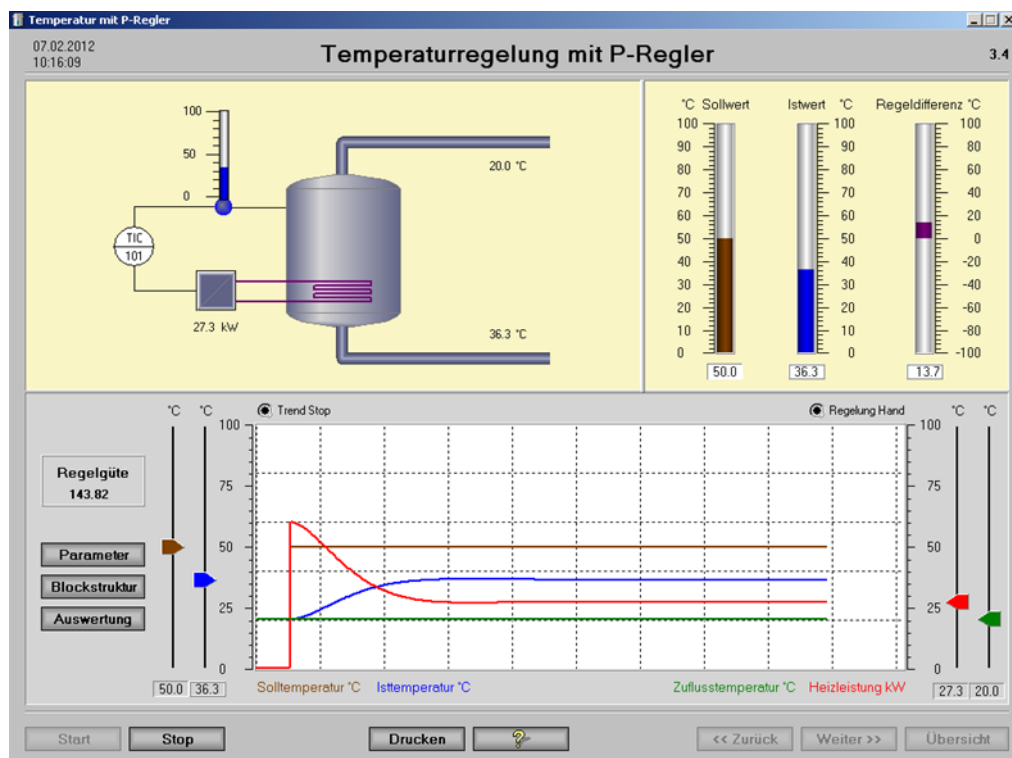


Abbildung 5-2 Regelung der Temperatur in einem Durchlauferhitzer mit dem P-Regler

5.1.2 BEISPIEL FÜLLSTANDSREGELUNG MIT P-REGLER

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, den Füllstand in einem Behälter zu regeln. Der Abfluss ist konstant auf 30 l/s eingestellt. Die Verstärkung des P-Reglers hat den Wert 2. Der Sollwert (braunes Signal) wurde von 0 % auf 50 % gestellt. Der P-Regler reagiert sofort und gibt als Stellsignal (rotes Signal) ca. 100 % aus. Der Füllstand (blaues Signal, Istwert) fängt an zu steigen. Das Stellsignal wird kleiner, da die Differenz zwischen Sollwert und Istwert abnimmt. Nach der Einschwingphase (Es treten keine zeitlichen Veränderungen mehr bei dem Füllstand und dem Stellsignal auf) nimmt der Ist-Füllstand (Istwert) den Wert 35 an und hält diesen konstant. Der Sollwert hat den Wert 50, so dass also zwischen Istwert und Sollwert eine Differenz von 15 besteht (bleibende Regelabweichung). Der P-Regler hat es bei dieser Regelstrecke nicht geschafft, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Weitere Versuche mit dieser Regelstrecke und dem P-Regler zeigen, dass durch Erhöhung der Verstärkung des P-Reglers die Regeldifferenz verkleinert wird.

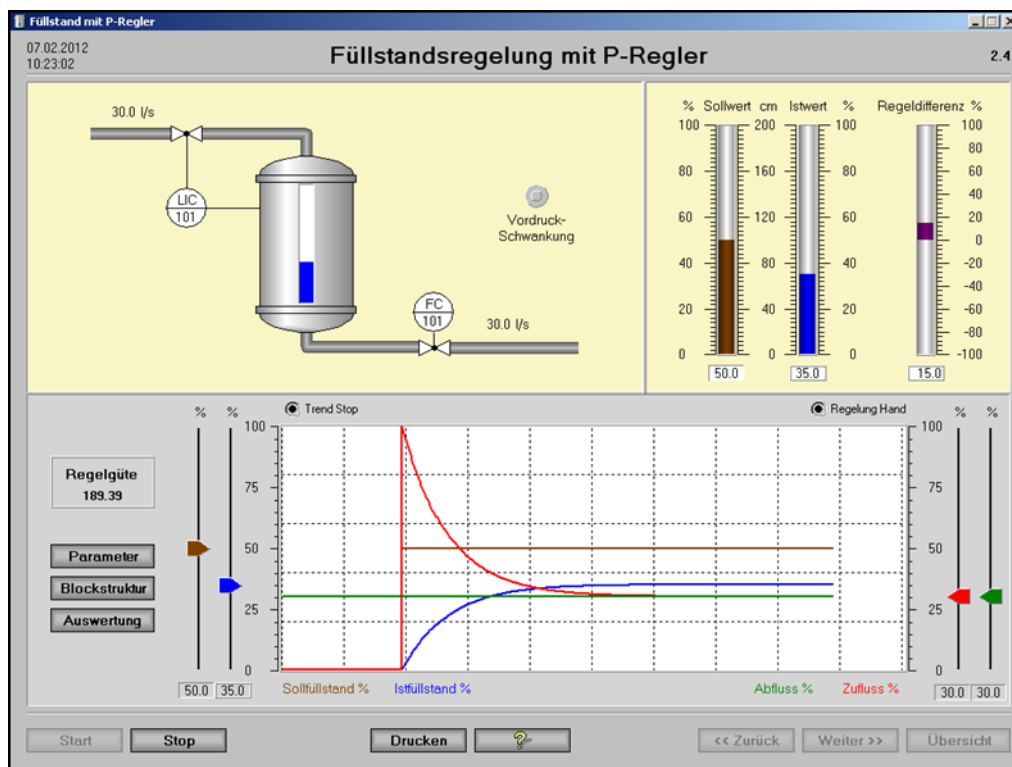


Abbildung 5-3 Bleibende Regelabweichung bei der Füllstandsregelung mit P-Regler

Dieses Verhalten lässt sich erklären, wenn man versucht, den Regelkreis als Blockstruktur darzustellen und das Verhalten der einzelnen Blöcke betrachtet. Das Verhalten des Behälters lässt sich mit Hilfe eines I-Blocks beschreiben. Wenn in den Behälter mehr rein- als rausfließt, steigt der Füllstand. Fließt mehr raus als rein fällt der Füllstand. Wenn genauso viel rein- wie rausfließt, bleibt der Füllstand konstant. Ein I-Block (Integrator) verhält sich genauso. Liegt ein positives Signal am Eingang, integriert der Integrator auf, d.h. sein Ausgangssignal steigt kontinuierlich. Liegt ein negatives Signal am Integrator an, integriert der Integrator runter, d.h. sein Ausgangssignal nimmt kontinuierlich ab. Ist das Eingangssignal des Integrators gleich 0, behält der Integrator seinen Ausgangswert konstant bei.

Die Regelungsaufgabe für die Füllstandsregelung lässt sich im Signalflussplan (Blockstruktur) damit folgendermaßen darstellen:

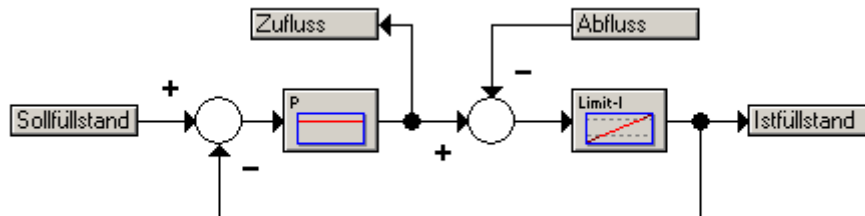


Abbildung 5-4 P-Regler mit I-Strecke

Der Sollfüllstand wird mit dem Istfüllstand verglichen. Die Differenz geht in den P-Regler (P-Block). Das Ausgangssignal des P-Reglers beeinflusst den Zufluss in den Behälter. Vom Zufluss wird der Abfluss abgezogen und die Differenz wirkt auf den Integrator (I-Block). Ist der Zufluss größer als der Abfluss, so integriert der Integrator auf, d.h. das Ausgangssignal (Istfüllstand) nimmt kontinuierlich zu. Im umgekehrten Fall, Abfluss ist größer als Zufluss, geht ein negativer Wert in den Integrator und das Ausgangssignal des Integrators (Istfüllstand) nimmt kontinuierlich ab. Sind Zufluss und Abfluss gleich, liegt eine 0 am Eingang des Integrators und der Integrator hält seinen Ausgangswert konstant. Dieses Verhalten entspricht genau dem Verhalten des Füllstands im Behälter.

Wie lässt sich jetzt erklären, dass bei diesem Regelkreis der P-Regler eine bleibende Regelabweichung erzeugt? Wenn man den Integrator betrachtet, weiß man, dass er nur dann einen konstanten Wert ausgibt, wenn sein Eingang gleich 0 ist. Das heißt, der Istfüllstand hat nur dann einen konstanten Wert und ändert sich nicht mehr über die Zeit, wenn am Eingang des Integrators eine 0 anliegt. Damit der Eingang am Integrator gleich 0 ist, muss der Zufluss gleich dem Abfluss sein. Damit aber der Zufluss gleich dem Abfluss ist, muss der P-Regler einen positiven Wert ausgeben, der gleich dem Abfluss ist. Der P-Regler kann aber nur dann einen positiven Wert ausgeben, wenn sein Eingangswert positiv, also größer 0 ist. Der Eingangswert vom P-Regler ist aber nur dann größer 0, wenn der Sollfüllstand größer als der Istfüllstand ist. Das heißt, dass eine Differenz zwischen Sollwert und Istwert besteht, also die Regelung hat eine bleibende Regelabweichung.

5.2 P-REGLER MIT P-BLOCK ALS STRECKE

Auch bei dem Regelkreis mit P-Regler und P-Block als Strecke erhält man eine bleibende Regelabweichung, wie sich einfach ausrechnen lässt.

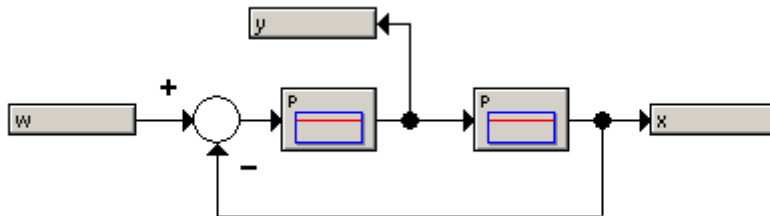


Abbildung 5-5 Regelkreis P-Regler mit P-Block als Strecke

Sei die Verstärkung des P-Reglers (linker P-Block) gleich K_1 und die Verstärkung des P-Blocks der Strecke sei K_2 . Dann gilt:

$$\begin{aligned}
 y &= K_1 \cdot (w - x), & x &= K_2 \cdot y, & \Rightarrow & x = K_2 \cdot K_1 \cdot (w - x) \\
 & & & \Rightarrow & x &= K_2 \cdot K_1 \cdot w - K_2 \cdot K_1 \cdot x \\
 | & & & \Rightarrow & x + K_2 \cdot K_1 \cdot x &= K_2 \cdot K_1 \cdot w \\
 & & & \Rightarrow & x \cdot (1 + K_2 \cdot K_1) &= K_2 \cdot K_1 \cdot w \\
 & & & \Rightarrow & x &= \frac{K_2 \cdot K_1}{1 + K_2 \cdot K_1} \cdot w
 \end{aligned}$$

Da der Faktor $\frac{K_2 \cdot K_1}{1 + K_2 \cdot K_1}$ immer ungleich 1 ist, ergibt sich, dass die Regelgröße x (Istwert) ungleich der Führungsgröße w (Sollwert) ist, also erhalten wir eine bleibende Regelabweichung.

5.3 P-REGLER MIT TOTZEIT-BLOCK ALS STRECKE

Untersucht man einen Regelkreis mit einem P-Regler und einem Totzeit-Block als Strecke, so wird man sehen, dass bei bestimmten Verstärkungswerten der Regelkreis instabil wird, d.h. die Regelgröße x (Istwert) schwingt auf.

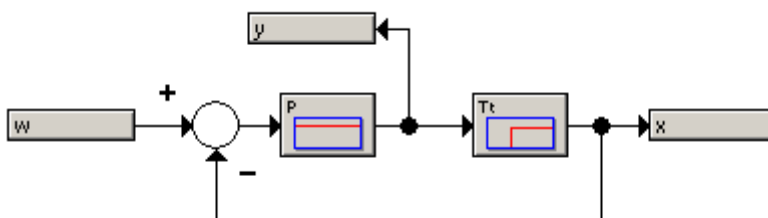


Abbildung 5-6 Regelkreis P-Regler mit Tt-Block als Strecke

Wählt man für den dargestellten Regelkreis als Verstärkung für den P-Regler einen Wert, der größer ist als 1, so wird die Regelgröße x (Istwert) aufschwingen.

Beispiel:

Sei die Verstärkung gleich 2, die Totzeit sei gleich 1 Sekunde

w und x sind gleich 0

Wenn man auf den Regelkreis einen Einheitssprung gibt, also w auf 1 setzt, so geht x nach einer Sekunde von 0 auf 2. Damit berechnet sich die Differenz zwischen Sollwert und Istwert zu -1 ($w - x = 1 - 2$). Die -1 geht in den P-Regler und der P-Regler verstärkt seinen Eingang mit 2 und gibt -2 aus. Nach einer Sekunde schaltet der Totzeit-Block die -2 durch und der Istwert x geht von 2 auf -2 . Durch den Vergleich von $w - x = 1 - (-2) = 3$ wird dann eine 3 auf den P-Regler gegeben, so dass der P-Regler eine 6 ausgibt, die dann wieder nach einer Sekunde auf x durchgeschaltet wird. Dieses Verhalten setzt sich fort und x schaukelt sich auf, wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt wird. Abbildung 5-7 zeigt das Phänomen grafisch.

Tabelle 1 Aufschwingverhalten des Regelkreises mit P-Regler und Totzeit-Strecke

Zeit in s	w	$w-x$	y	x
1	0	0	0	0
2	1	1	2	0
3	1	1	2	2
4	1	-1	-2	2
5	1	-1	-2	-2
6	1	3	6	-2
7	1	3	6	6
8	1	-5	-10	6
9	1	-5	-10	-10
10	1	11	22	-10
11	1	11	22	22
12	1	-21	-42	22
13	1	-21	-42	-42
14	1	-43	-86	-42
15	1	-43	-86	-86

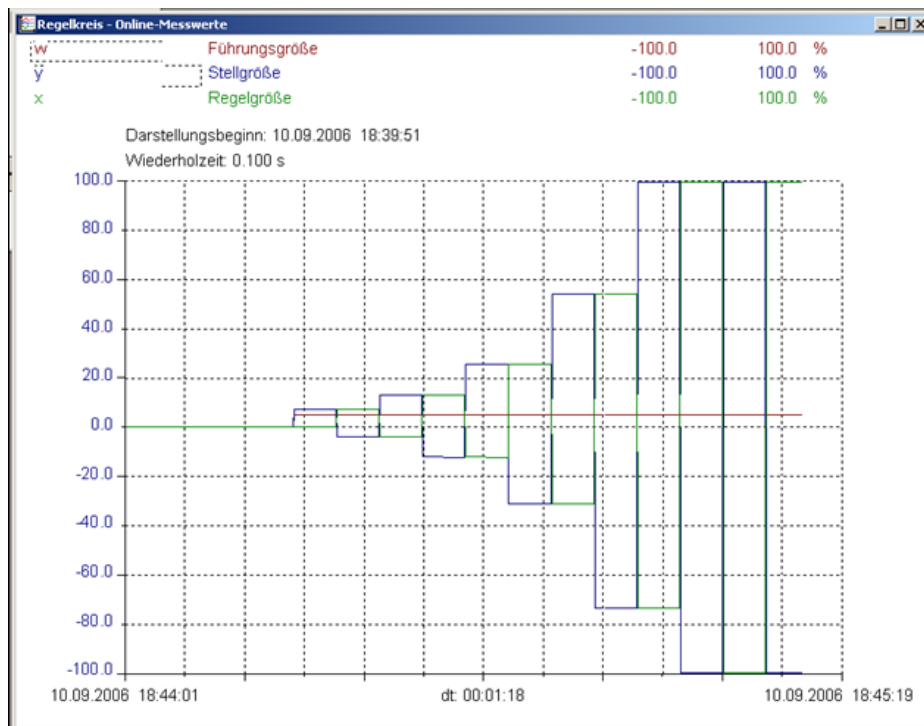


Abbildung 5-7 Beispiel für einen Regelkreis mit P-Regler und Totzeit-Block als Strecke. Die Verstärkung des P-Reglers wurde auf 1.5 gestellt

Wir bei dem Regelkreis eine Verstärkung kleiner 1 gewählt, so würde der Regelkreis auf einen Wert einschwingen, der aber nicht der Sollwert ist. Also erhalten wir hier wieder eine bleibende Regelabweichung. Abbildung 5 8 zeigt dieses Verhalten grafisch.

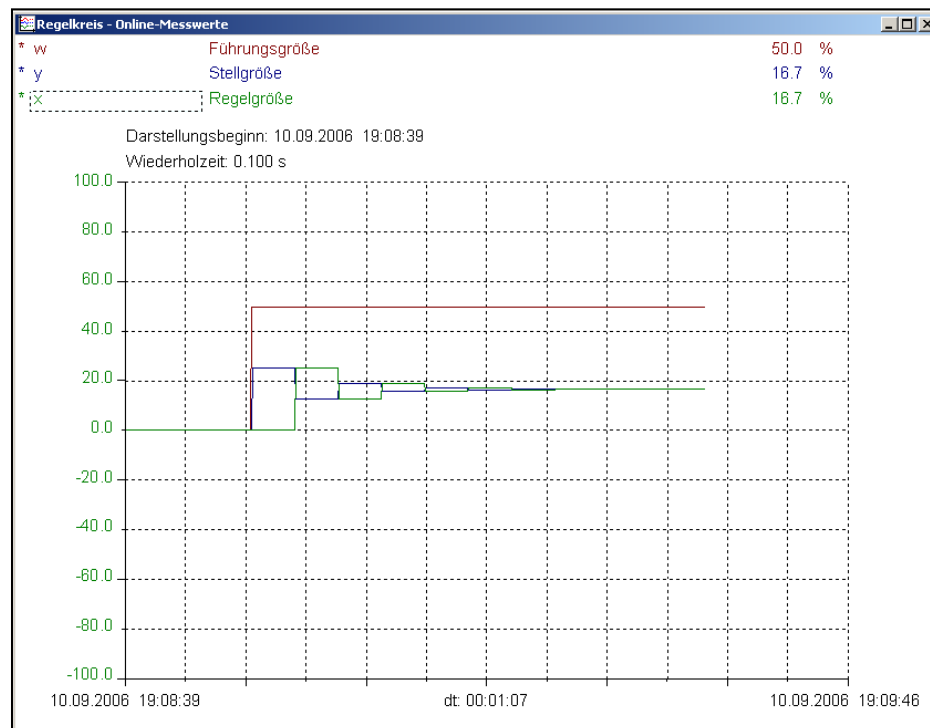


Abbildung 5-8 Beispiel für einen Regelkreis mit P-Regler und Totzeit-Block als Strecke Die Verstärkung des P-Reglers wurde auf 0.5 gestellt

5.4 I-REGLER

Der I-Regler ist ein Integrator. Der I-Regler hat folgendes Verhalten:

Liegt an seinem Eingang ein positiver Wert an (Sollwert $>$ Istwert), also die Differenz zwischen Sollwert und Istwert ist größer 0, steigt das Ausgangssignal vom I-Regler gleichmäßig kontinuierlich an. Liegt am Eingang ein negativer Wert an (Sollwert $<$ Istwert), also die Differenz zwischen Sollwert und Istwert ist kleiner 0, nimmt das Ausgangssignal vom I-Regler gleichmäßig kontinuierlich ab. Wenn am Eingang des I-Reglers eine 0 anliegt, das bedeutet, der Istwert ist gleich dem Sollwert, so hält der I-Regler seinen Ausgangswert. Der I-Regler verändert also seinen Ausgangswert solange, bis am Eingang 0 anliegt. Er gibt nur dann einen konstanten Ausgangswert aus, wenn der Istwert gleich dem Sollwert ist. Der Regelkreis kann aber nur dann stabil bzw. eingeschwungen sein, wenn der Regler ein konstantes Signal ausgibt. Das bedeutet, dass der Istwert gleich dem Sollwert sein muss, wenn der Regelkreis eingeschwungen ist (konstanter Istwert \times über die Zeit).

Zusammenfassend ergibt sich: Setzt man einen I-Regler ein, so wird der Regelkreis entweder instabil oder nach der Einschwingphase geht der Istwert auf den Sollwert, man erhält also keine bleibende Regelabweichung.

Dadurch, dass der I-Regler erst langsam anfängt auf bzw. runter zu integrieren, sind Regelungen mit einem I-Regler verhältnismäßig langsam.

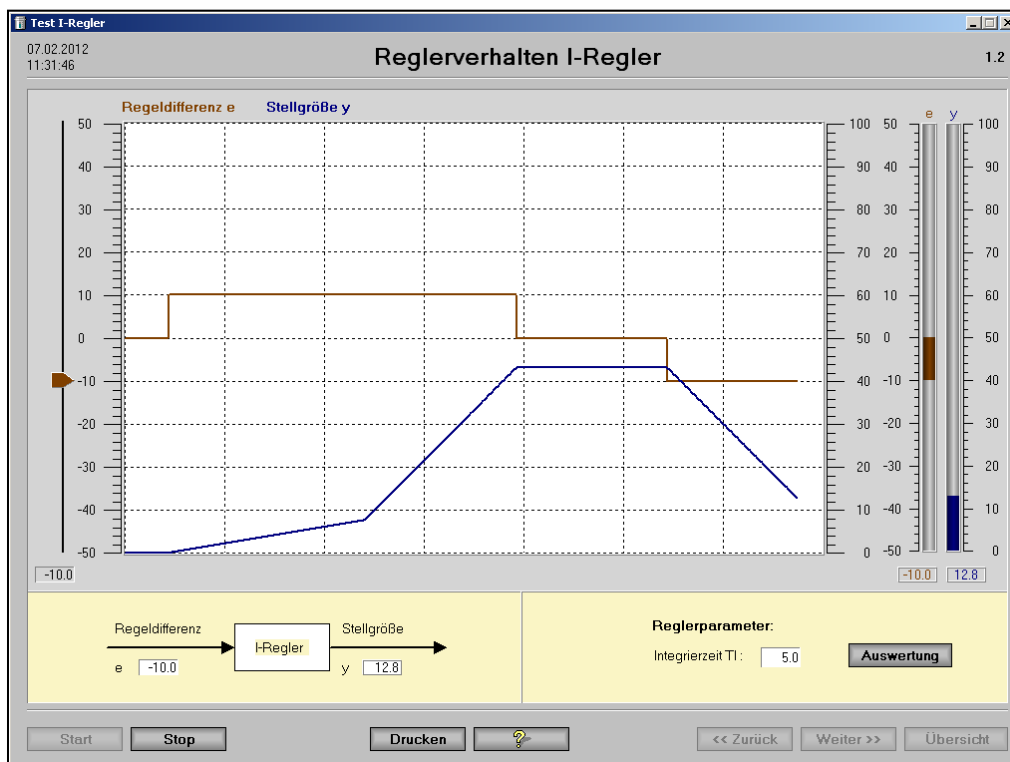


Abbildung 5-9 Verhalten des I-Reglers

In dem oberen Bild wurde auf den Eingang des I-Reglers ein Sprung gegeben. Das Eingangssignal e (braunes Signal, Regelfehler) ging schlagartig von 0 auf 10. Die T_i -Integrierzeit des I-Reglers hatte am

Anfang den Wert 30, das bedeutet, dass das Ausgangssignal y (blaues Signal, Stellgröße) nach 30s dem Wert 10 (gleich dem Wert des Eingangssignals) erreicht. y steigt gleichmäßig kontinuierlich an. Nach ca. 22 Sekunden wurde die T_i -Zeitkonstante von 30 auf 5 eingestellt. Der Anstieg des Ausgangssignals y erfolgt jetzt wesentlich schneller. Dann wurde das Eingangssignal e auf 0 geschaltet und ab diesem Zeitpunkt behält das Ausgangssignal y des I-Reglers seinen Wert bei. Danach wurde e auf -10 gesetzt und y fällt gleichmäßig kontinuierlich ab.

5.4.1 BEISPIEL: TEMPERATURREGELUNG EINES DURCHLAUFERHITZERS MIT I- REGLER

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, die Temperatur in einem Durchlauferhitzer zu regeln. In den Durchlauferhitzer fließt eine konstante Menge Wasser hinein und die gleiche Menge wieder heraus. Die Temperatur im Zufluss beträgt 20°C . Die T_i -Integrierzeit des I-Reglers wird auf 5s gestellt. Der Sollwert hatte im eingeschwungenen Zustand der Wert 20°C und wurde dann von 20°C auf 40°C erhöht. Das Stellsignal (rotes Signal) des I-Reglers fängt an langsam zu steigen. Solange die Differenz zwischen Sollwert (braunes Signal) und Istwert (blaues Signal) positiv ist (Sollwert $>$ Istwert) steigt das Stellsignal an. Nachdem der Istwert größer als der Sollwert geworden ist (das blaue Signal überschreitet das braune Signal), nimmt das Stellsignal wieder ab. Bei dieser Regelung schwingt nach einer längeren Einschwingphase der Istwert auf den Sollwert ein (keine bleibende Regelabweichung). Die Regelung ist mit dem reinen I-Regler langsam.

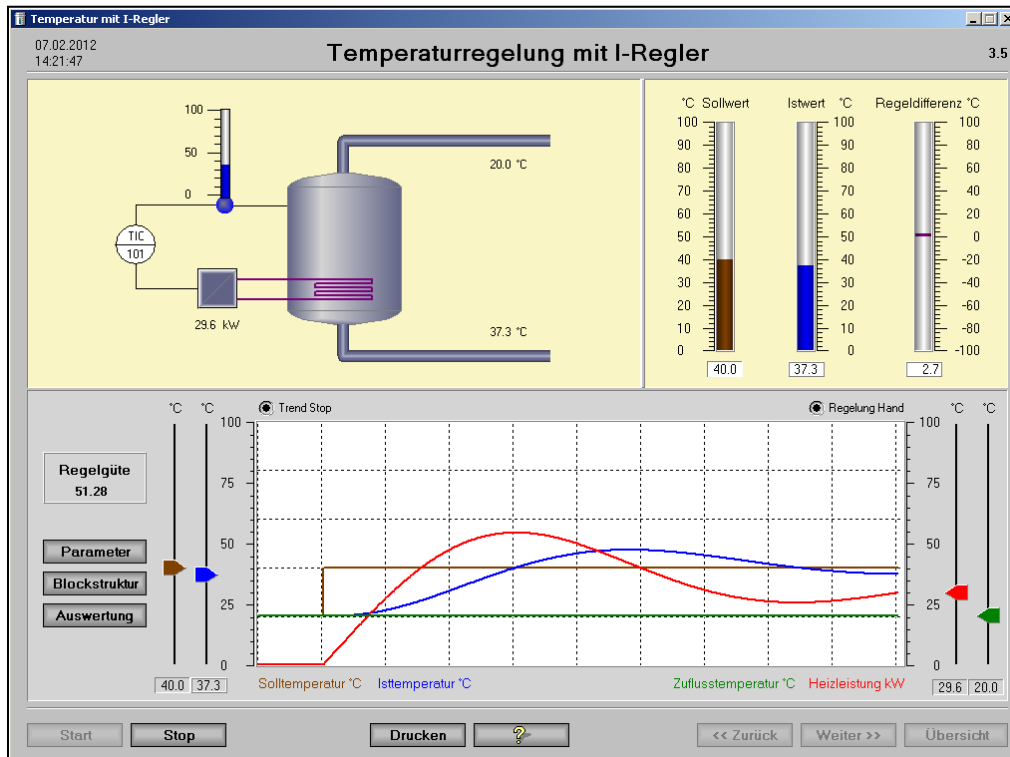


Abbildung 5-10 Regelung der Temperatur in einem Durchlauferhitzer mit dem I-Regler

5.4.2 BEISPIEL FÜLLSTANDSREGELUNG MIT I-REGLER

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, den Füllstand in einem Behälter zu regeln. Der Abfluss ist konstant auf 30 l/s (30 %) eingestellt. Der Sollwert (braunes Signal) wurde von 0 % auf 50 % gestellt. Wie an dem Bild zu sehen ist, schafft der I-Regler es nicht den Istwert auf den Sollwert zu regeln. Der Istwert schwingt mit einer Dauerschwingung um den Sollwert. Wir haben hier einen instabilen Regelkreis. Auch ein Verstellen der Ti-Integrierzeit des I-Reglers führt zu keiner Verbesserung. Der Regelkreis bleibt instabil.

Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass der I-Regler solange aufintegriert, also das Stellsignal solange größer wird, bis der Istwert den Sollwert überschreitet. Das Stellsignal ist aber jetzt schon so weit über das Ziel hinausgeschossen (der Zufluss ist jetzt doppelt so groß wie der Abfluss), dass es lange dauert bis der Zufluss den Abfluss wieder unterschreitet. Solange nimmt nämlich der Istwert (Füllstand) noch zu. Dann ist der Füllstand so groß, dass es wieder lange dauert, bis der Füllstand (Istwert) den Sollwert wieder unterschreitet. Dieses Verhalten setzt sich fort, so dass sich ein instabiles Regelkreisverhalten ergibt.

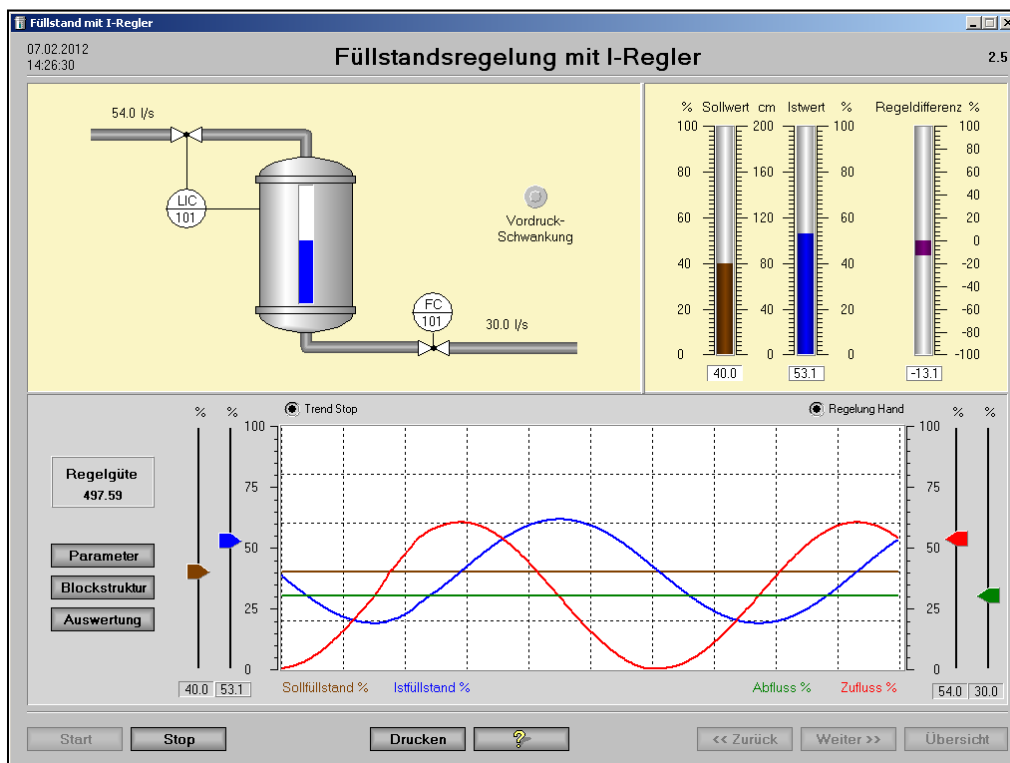


Abbildung 5-11 Dauerschwingung bei der Füllstandsregelung mit I-Regler

5.4.3 REGELKREISVERHALTEN EINES REGELKREISES MIT I-REGLER UND BELIEBIGER STRECKE

Beim Einsatz eines I-Reglers wird sich im Regelkreis für das Führungsverhalten wie für das Störverhalten nie eine bleibende Regelabweichung einstellen. Entweder schafft der Regler es, Störungen und Führungswertänderungen auszuregeln oder der Regelkreis wird instabil.

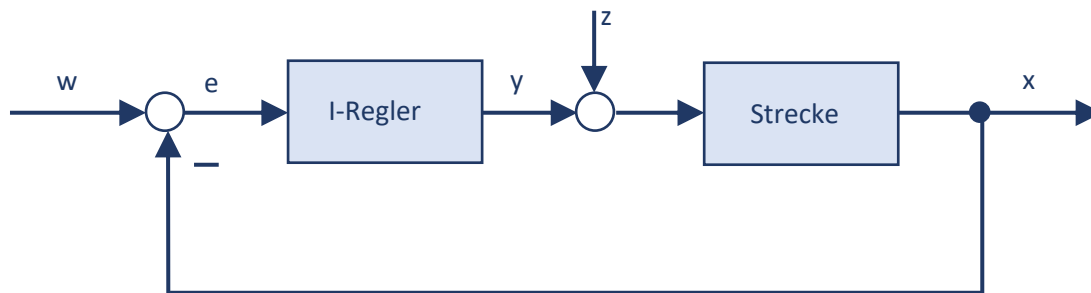


Abbildung 5-12 Regelkreis mit I-Regler und beliebiger Strecke

Allgemein gilt: Ein I-Regler arbeitet solange, bis der Regelkreis stabil ist und der Istwert auf den Sollwert eingeschwungen ist oder man erhält einen instabilen Regelkreis.

5.5 PI-REGLER

Der PI-Regler lässt sich wie unten angegeben aus einer Kombination von einem P-Block und einem I-Block zusammensetzen.

Aus der Gleichung für den PI-Regler
$$y(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau)$$

kann man entnehmen, dass der Verstärkungsfaktor, realisiert durch den P-Block, auf beide Anteile wirkt.

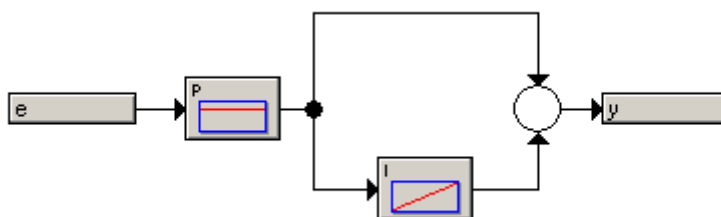


Abbildung 5-13 Kombination des PI-Reglers aus P-Block und I-Block

Die Parameter des PI-Reglers sind: Verstärkung K und Nachstellzeit T_i (T_n) = T_I .

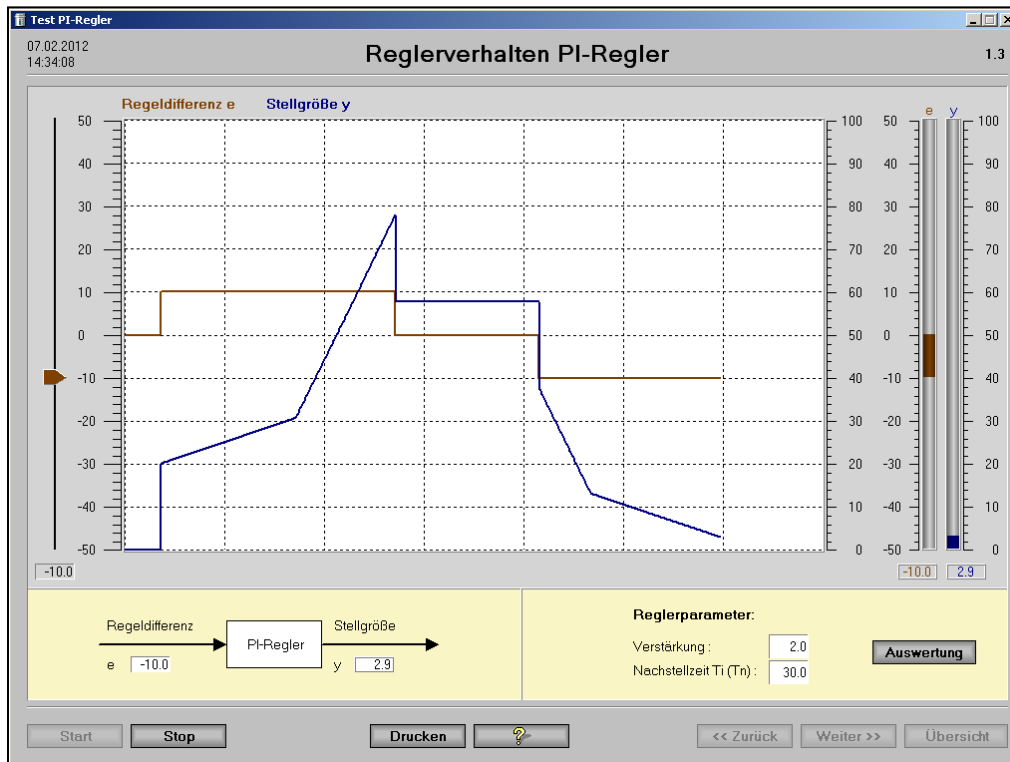


Abbildung 5-14 Verhalten des PI-Reglers

Die Untersuchung des Zeitverhaltens des PI-Reglers ist in Abbildung 5 14 dargestellt. Es wurde auf den Eingang des PI-Reglers ein Sprung gegeben. Das Eingangssignal e (braunes Signal, Regeldifferenz) ging sofort von 0 auf 10. Da die Verstärkung des PI-Reglers auf 2 eingestellt war, nahm das Ausgangssignal y sofort den Wert 20 an. Die Nachstellzeit T_i (T_n) des I-Reglers hatte am Anfang den Wert 30. Durch die Verstärkung 2 ergibt sich insgesamt eine Zeitkonstante von $30/2 = 15$. Das Ausgangssignal y (blaues Signal, Stellgröße) steigt gleichmäßig kontinuierlich an und erreicht deshalb nach 15s einen um 10 (Sprung auf 10) erhöhten Wert. Nach ca. 16 Sekunden wurde die Nachstellzeit T_i von 30 auf 5 eingestellt. Der Anstieg des Ausgangssignals y erfolgt jetzt wesentlich schneller. Dann wurde das Eingangssignal e auf 0 geschaltet. Damit geht der P-Anteil sofort auf 0, d.h. das Ausgangssignal y wird sofort um 20 kleiner und der I-Anteil des PI-Reglers behält seinen Wert, so dass also ab diesem Zeitpunkt ein konstanter Wert ausgegeben wird, der um 20 kleiner ist als der Wert des Ausgangssignals zum Schaltpunkt. Es erfolgte ein Sprung von y auf -10. Durch die Verstärkung von 2 (P-Anteil) wurde das Ausgangssignal y sofort um 20 kleiner und durch den I-Anteil nimmt y dann kontinuierlich ab (Nachstellzeit 5s).

5.5.1 BEISPIEL: TEMPERATURREGELUNG EINES DURCHLAUFERHITZERS MIT PI- REGLER

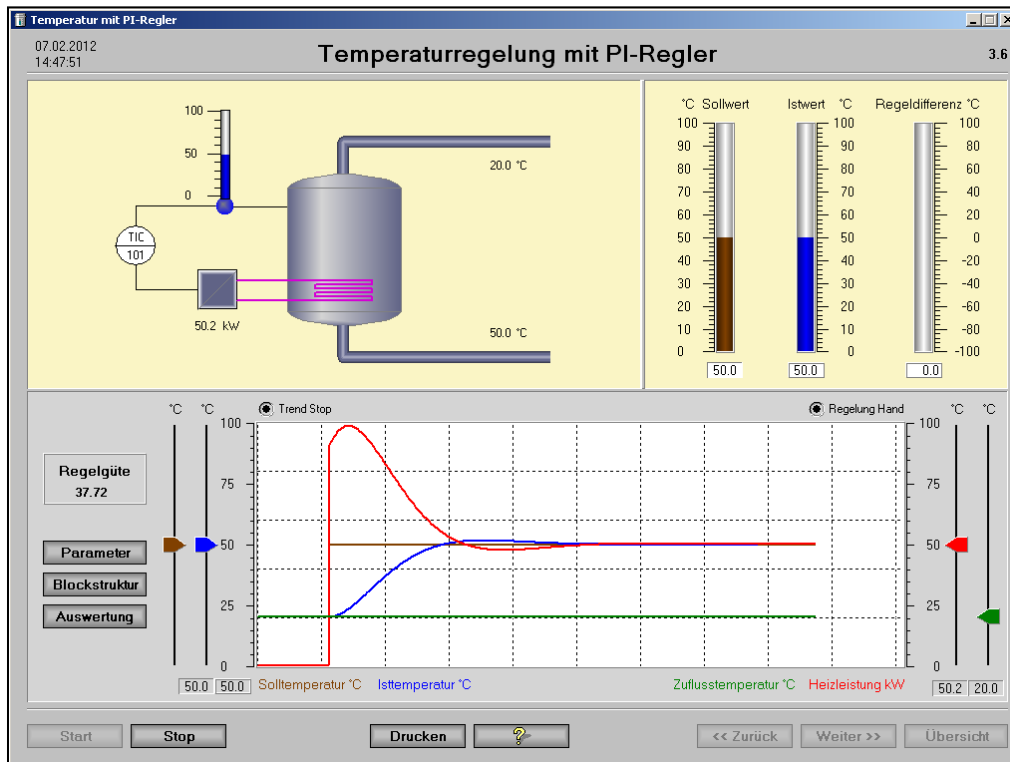


Abbildung 5-15 Regelung der Temperatur in einem Durchlauferhitzer mit dem PI-Regler

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, die Temperatur in einem Durchlauferhitzer zu regeln. In den Durchlauferhitzer fließt eine konstante Menge Wasser hinein und die gleiche Menge wieder heraus. Die Temperatur im Zufluss beträgt 20°C. Als Parameter für den PI-Regler wurden für die Verstärkung 3 und für die Nachstellzeit 10s gewählt. Der Sollwert hatte den Wert 20°C. Das System war eingeschwungen, da die Zuflusstemperatur, die Abflusstemperatur und die Temperatur im Behälter konstant den Wert 20°C hatten und die Heizung noch ausgeschaltet war (Heizleistung gleich 0). Der Sollwert wurde dann von 20°C auf 50°C verstellt. Durch den P-Anteil des PI-Reglers mit der eingestellten Verstärkung von 3 sprang das Stellsignal (rotes Signal) von 0kW sofort auf 90kW, da die Differenz zwischen Sollwert und Istwert $50^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C}$ betrug. Durch den I-Anteil des PI-Reglers schafft es der Regler, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Nach der Einschwingphase erreicht also der Istwert den Sollwert, was bei der Regelung des Durchlauferhitzers mit dem reinen P-Regler nicht der Fall war (bleibende Regelabweichung).

Vergleicht man die PI-Regelung des Durchlauferhitzers mit der reinen I-Regelung, so sieht man, dass das Einschwingen mit dem PI-Regler wesentlich schneller geht.

Durch Verstellen der Verstärkung und der Nachstellzeit kann man erreichen, dass die Regelung noch schneller einschwingt. Ein Verkleinern der Nachstellzeit wird aber z.B. auch ein größeres Über- und Unterschwingen nach sich ziehen.

5.5.2 BEISPIEL FÜLLSTANDSREGELUNG MIT PI-REGLER

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, den Füllstand in einem Behälter zu regeln. Der Abfluss ist konstant auf 30 l/s eingestellt. Als Parameter für den PI-Regler wurden für die Verstärkung 2 und für die Nachstellzeit 10 gewählt. Der Sollwert wurde dann von 0 % auf 40 % gestellt. Durch den P-Anteil des PI-Reglers mit der eingestellten Verstärkung von 2 sprang das Stellsignal (rotes Signal) sofort von 0 l/s auf 80 l/s (80%), da die Differenz zwischen Sollwert und Istwert $40 \% - 0 \% = 40 \%$ betrug. Durch den I-Anteil des PI-Reglers erreicht nach einer Einschwingphase der Istwert den Sollwert.

Bei der Füllstandsregelung mit dem reinen P-Regler erreichte der Istwert nicht den Sollwert (bleibende Regelabweichung).

Der I-Regler war für die Füllstandsregelung ungeeignet, da der Regelkreis mit dem I-Regler eine Dauerschwingung durchführte.

Durch Verstellen der Verstärkung und der Nachstellzeit kann man erreichen, dass die Regelung noch schneller einschwingt. Ein Verkleinern der Nachstellzeit wird aber z.B. auch ein größeres Über- und Unterschwingen nach sich ziehen.

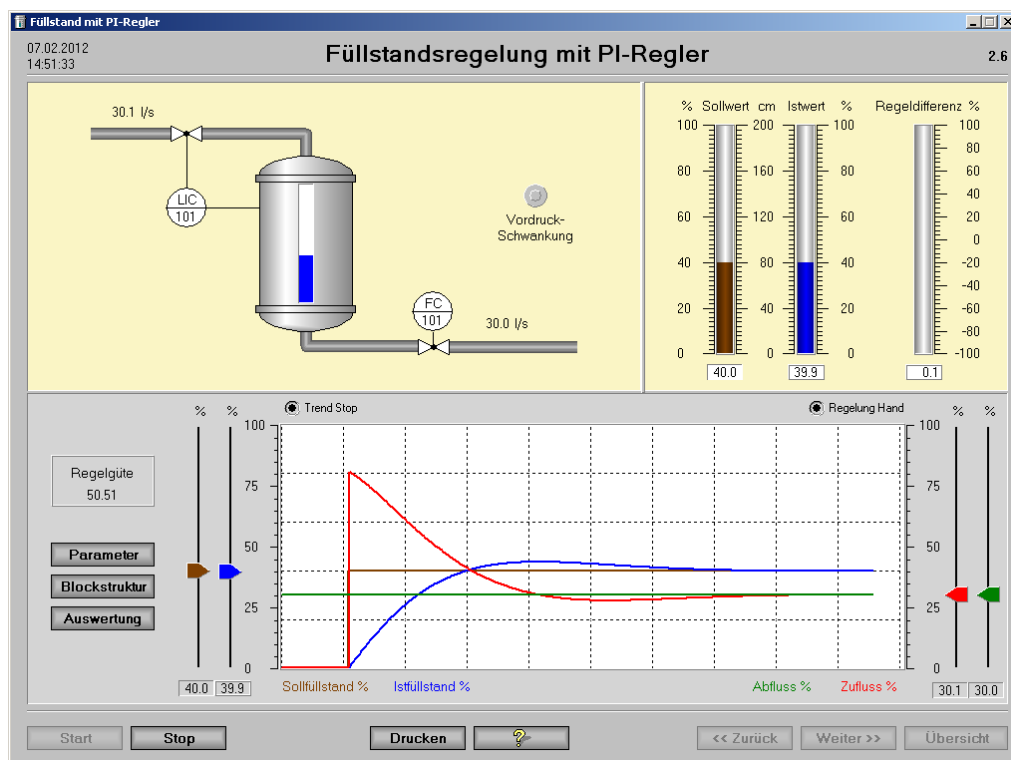


Abbildung 5-16 Füllstandsregelung mit PI-Regler

5.5.3 BEISPIEL PI-REGLER MIT PT3-STRECKE: VERHALTEN DES P- UND DES I-ANTEILS

An der Regelung einer Pt3-Strecke mit dem PI-Regler soll betrachtet werden, wie sich der P- und der I-Anteil des PI-Reglers verhalten.

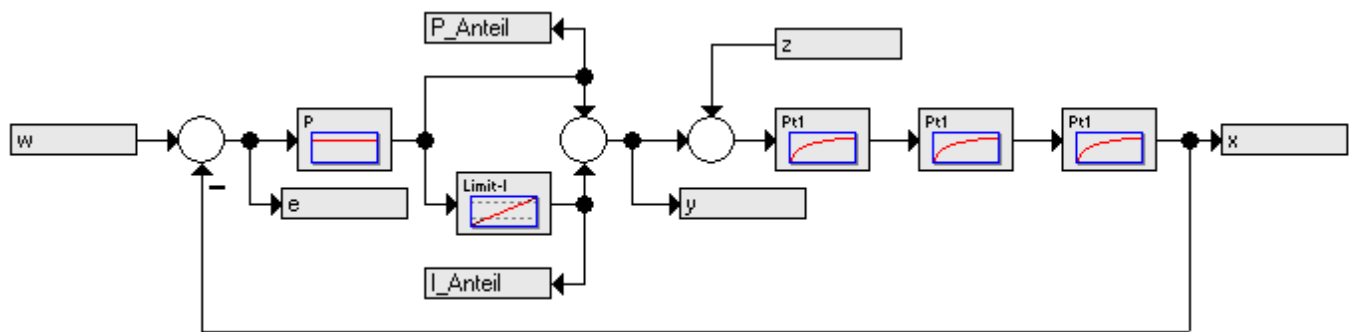


Abbildung 5-17 PI-Regler mit Pt3-Strecke, Simulation mit WinErs

In dem Regelkreis wurde der PI-Regler aufgebaut durch einen P- und einen I-Block, damit der P- und der I-Anteil des Reglers getrennt betrachtet werden können.

Als Verstärkung für den PI-Regler (Verstärkung des P-Blocks) wurde 2 gewählt. Die Gesamtverstärkung der drei Pt1-Blöcke (Strecke) betrug 1. Die Nachstellzeit T_i des PI-Reglers wurde auf einen Wert von 15 s gestellt, der etwas kleiner war als die Summe der Zeitkonstanten der Pt1-Blöcke (18 s). Damit reagiert der I-Anteil verhältnismäßig langsam.

In Abbildung 5-18 werden der Sollwert w (braun), der Istwert x (blau), die Regeldifferenz e (hellgrün), die Störung z (grün) sowie das Stellsignal y (rot) mit dem zugehörigen P-Anteil (hellviolett) und dem I-Anteil (violett) dargestellt. Der Sollwert w wurde sprunghaft von 0 auf 3 gesetzt. Die Störung z blieb auf 0. In der Abbildung lässt sich gut das Verhalten des Reglers mit seinem P- und I-Anteil erkennen. Das Stellsignal y für den PI-Regler setzt sich additiv aus dem P-Anteil und dem I-Anteil zusammen. In der Abbildung ergibt die Summe der beiden violetten Signalverläufe (P-Anteil und I-Anteil) somit gerade den Signalverlauf vom Stellsignal y (rot). Das hellgrüne Signal e beschreibt den Verlauf der Regeldifferenz, also die Differenz zwischen Sollwert w und Istwert x . Bei der sprunghaftigen Änderung des Sollwerts von 0 auf 3 ging e sofort auf 3 (Sollwert – Istwert = $3 - 0$). Da die Verstärkung des P-Reglers den Wert 2 hat, sprang der P-Anteil des Reglers auf $2 \cdot 3 = 6$. Der I-Anteil war zu diesem Zeitpunkt noch 0, fing dann aber langsam an zu steigen. Da sich das Stellsignal y additiv aus dem P-Anteil und dem I-Anteil zusammensetzt, hatte y sofort den Wert 6. Der Istwert x fing an langsam zu steigen. Dadurch wurde e (Regeldifferenz) immer kleiner. Da e der Eingang in den PI-Regler ist, wird der P-Anteil immer kleiner. Auch die Steigung des Signalverlaufs vom I-Anteil nimmt ab. Zu dem Zeitpunkt, wenn der Istwert x den Sollwert w erreicht, ist e natürlich gleich 0 und damit auch der P-Anteil (beim P-Anteil wird ja das Eingangssignal mit einem Verstärkungsfaktor verstärkt und wenn der Eingang gleich 0 ist, ist natürlich auch der Ausgang gleich 0). Leider hat der I-Anteil zu diesem Zeitpunkt schon einen Wert erreicht, der größer

ist als der Sollwert. Das Stellsignal y gibt deshalb einen zu großen Wert aus und der Istwert x steigt über den Sollwert. Die Regeldifferenz wird jetzt negativ und damit auch der P-Anteil. Der negative Wert geht auch in den Integrator, dadurch integriert der Integrator runter und der I-Anteil nimmt langsam ab. Wünschenswert wäre eigentlich, dass der I-Anteil gleich dem Sollwert w ist, wenn der Istwert x den Sollwert w erreicht. Da der I-Anteil in diesem Augenblick zu groß war, schwingt der Istwert über den Sollwert.

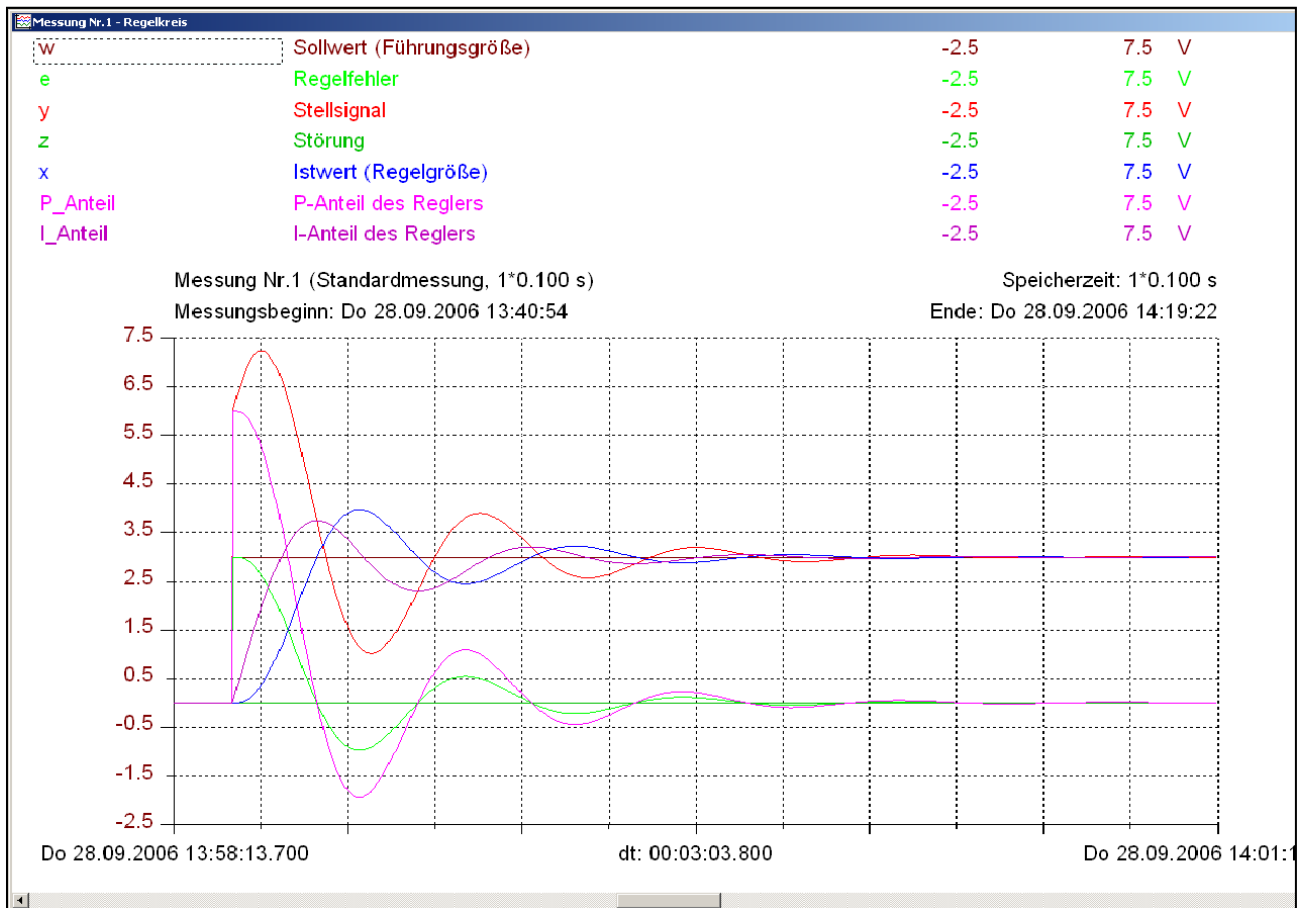


Abbildung 5-18 Verhalten des PI-Reglers (P-, I-Anteil) mit Pt3-Strecke

Dieses Spielchen setzt sich fort, bis der Istwert auf den Sollwert eingeschwungen ist. Ab diesem Zeitpunkt hat der P-Anteil den Wert 0 und der I-Anteil den Wert vom Sollwert w . Das Stellsignal y hat somit auch den Wert von w . Bitte beachten Sie, dass die Gesamtverstärkung der Strecke (Pt3-System) gleich 1 ist und die Störung 0. Deshalb haben das Stellsignal y und der I-Anteil nach der Einschwingphase die gleichen Werte wie Sollwert w und Istwert x .

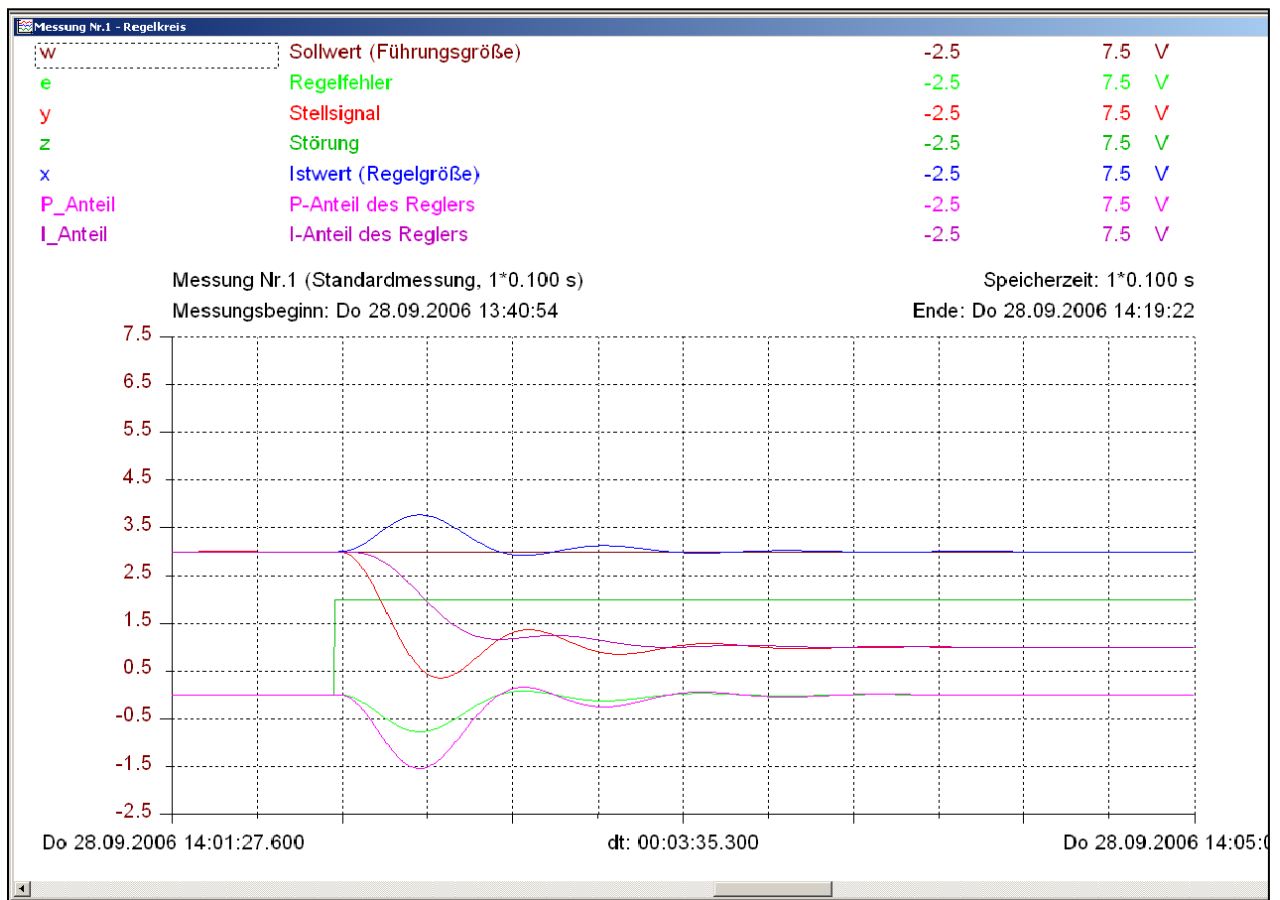


Abbildung 5-19 Verhalten des PI-Reglers (P-, I-Anteil) mit Pt3-Strecke bei Störwertänderung

In Abbildung 5-19 wird das Verhalten des Regelkreises (PI-Regler mit Pt3-Strecke) auf eine Störwertänderung dargestellt. Die Störgröße z (grünes Signal) wurde sprunghaft von 0 auf 2 geändert. Dadurch verändert sich der Istwert x (blaues Signal). Wenn sich x ändert, ändert sich auch die Differenz zwischen Istwert und Sollwert w , da w konstant bleibt. Die Regeldifferenz e (hellgrünes Signal) bekommt einen Wert kleiner als 0 und der PI-Regler reagiert. Der I-Anteil (violetttes Signal) nimmt langsam ab, da der Eingang e in den Regler negativ ist. Der P-Anteil hat immer den Wert $2 \cdot e$. Dies lässt sich direkt durch den Vergleich des hellgrünen Signal e mit dem hellvioletten Signal des P-Anteils erkennen. Der I-Anteil integriert wieder so lange rauf bzw. runter, bis das System eingeschwungen ist und der Istwert x den Wert vom Sollwert y angenommen hat. Dann ist wieder der Eingang e in den PI-Regler gleich 0, der I-Anteil gibt einen konstanten Wert aus und der P-Anteil ist gleich 0.

5.6 PID-REGLER

Der PID-Regler lässt sich wie unten angegeben aus einer Kombination von einem P-Block, einem I-Block und einem D-Block zusammensetzen.

Aus der Gleichung für den PID-Regler
$$y(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \dot{e}(t))$$

kann man entnehmen, dass der Verstärkungsfaktor, realisiert durch den P-Block, auf alle drei Anteile wirkt.

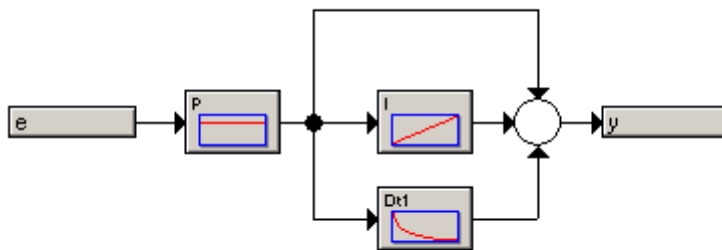


Abbildung 5-20 Kombination des PID-Reglers aus P-Block, I-Block und Dt1-Block

Die Parameter des PID-Reglers sind: Verstärkung K, Nachstellzeit T_i , Vorhaltezeit T_d

5.6.1 UNTERSUCHEN DES ZEITVERHALTENS DES PID-REGLERS

In der Abbildung 5-21 wurde auf den Eingang des PID-Reglers ein Sprung gegeben. Das Eingangssignal e (braunes Signal, Regeldifferenz) ging von 0 auf 10. Durch den D-Anteil des PID-Reglers wird sofort ein Pieks auf das Ausgangssignal y geschaltet, da die Ableitung einer sprungförmigen Änderung des Eingangssignals gegen unendlich geht. Die Verstärkung des PID-Reglers hatte den Wert 2. Dadurch geht der Pieks im nächsten Zeitschritt auf $2 \cdot$ Eingangssignal, also auf 20 zurück (blaues Signal, rechte Skala). Der D-Anteil wirkt nicht mehr, da keine Änderung am Eingangssignal mehr auftritt. Die Nachstellzeit T_i des PID-Reglers war auf 30 s eingestellt. Da die Verstärkung von 2 auch auf den I-Anteil des PID-Reglers wirkt, ergibt sich insgesamt eine Zeitkonstante von $30/2 = 15$. Das Ausgangssignal y (blaues Signal, Stellgröße) steigt gleichmäßig kontinuierlich an und erreicht nach 15s einen um 10 höheren Wert (e ging von 0 auf 10). Nach ca. 16 Sekunden wurde die Nachstellzeit von 30 auf 5 gestellt. Der Anstieg des Ausgangssignals y erfolgt jetzt wesentlich schneller. Dann wurde das Eingangssignal e auf 0 geschaltet. Durch die schlagartige Änderung des Eingangssignals wirkte sofort wieder der D-Anteil des PID-Reglers und das Ausgangssignal y erhielt einen Pieks nach unten. Der P-Anteil ging sofort auf 0, dadurch wurde das Ausgangssignal y um 20 kleiner. Der I-Anteil des PID-Reglers behält seinen Wert bei, so dass ab diesem Zeitpunkt ein konstanter Wert, der um 20 kleiner ist als der Wert des Ausgangssignals zum Schaltpunkt, ausgegeben wird. Danach erfolgte ein Sprung von y auf -10. Es ergab sich wieder ein negativer Pieks und das Ausgangssignal wurde schlagartig um 20 kleiner. Durch die Nachstellzeit T_i

von 5 nahm dann der I-Anteil kontinuierlich und schnell ab. Durch Verstellen der Nachstellzeit auf 30s wurde das abwärts integrieren langsamer.

Der D-Anteil des PID-Reglers reagierte in diesem Beispiel dreimal, nämlich dann, wenn sich das Eingangssignal e änderte. Allgemein gilt, dass der D-Anteil des PID-Reglers nur dann einen Wert ausgibt, wenn sich das Eingangssignal des Reglers ändert, also eine Änderung zwischen Soll- und Istwert auftritt.

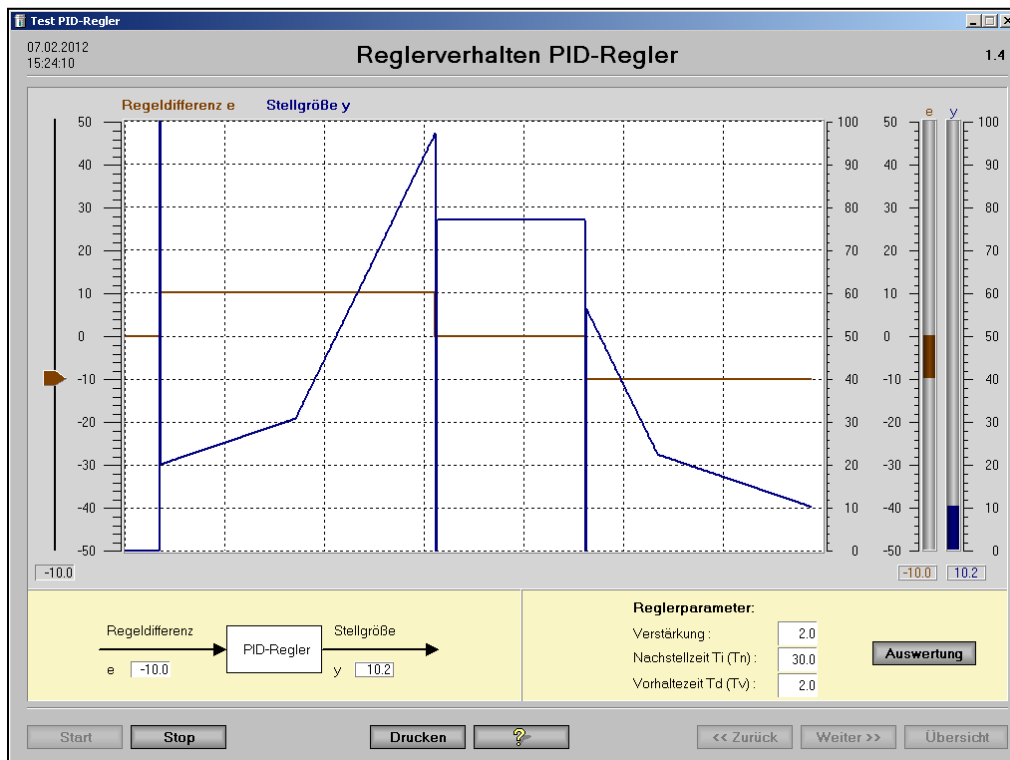


Abbildung 5-21 Verhalten des PID-Reglers

5.6.2 BEISPIEL: TEMPERATURREGELUNG EINES DURCHLAUFERHITZERS MIT PID- REGLER

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, die Temperatur in dem Durchlauferhitzer zu regeln. In den Durchlauferhitzer fließt eine konstante Menge Wasser hinein und die gleiche Menge wieder heraus. Die Temperatur im Zufluss beträgt 20°C. Als Parameter für den PID-Regler wurden für die Verstärkung 2, für die Nachstellzeit 5s und für die Vorhaltezeit 1s gewählt. Der Sollwert hatte den Wert 20°C. Das System war eingeschwungen, da die Zuflusstemperatur, die Abflusstemperatur und die Temperatur im Behälter konstant den Wert 20°C hatten sowie die Heizung noch ausgeschaltet war (Heizleistung gleich 0). Der Sollwert wurde dann von 20°C auf 50°C verstellt. Der D-Anteil führt auf die sprungartige Änderung einen Pieks aus, und damit geht das Stellsignal (rotes Signal) auf die obere Begrenzung. Im nächsten Zeitschritt wirken zusätzlich der P- und der I-Anteil. Durch den I-Anteil des PID-Reglers schafft es der Regler, den Istwert nach der Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen.

Vergleicht man die PID-Regelung des Durchlauferhitzers mit der PI-Regelung, so sieht man, dass bei diesen eingestellten Parametern das Einschwingen mit dem PID-Regler nicht besser ist als die Regelung mit dem PI-Regler.

Durch Verstellen der Verstärkung, der Nachstellzeit und der Vorhaltezeit wird man erreichen können, dass die Regelung schneller einschwingt.

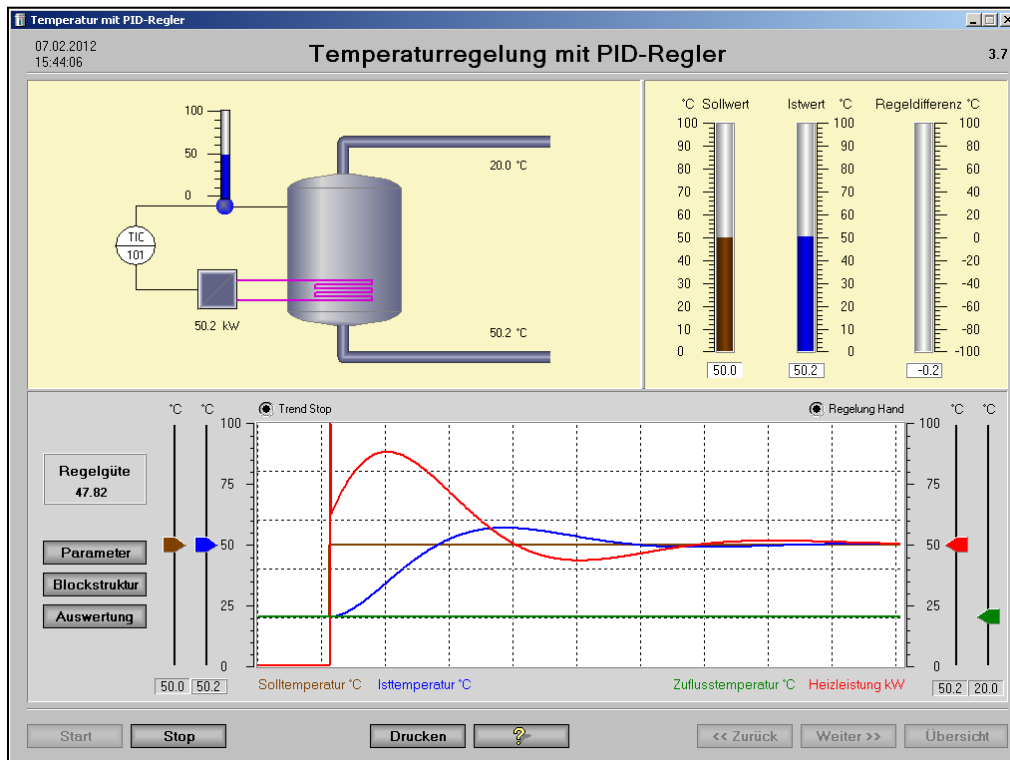


Abbildung 5-22 Regelung der Temperatur in einem Durchlauferhitzer mit dem PID-Regler

5.6.3 BEISPIEL FÜLLSTANDSREGELUNG MIT PID-REGLER:

Die Regelungsaufgabe bestehe darin, den Füllstand in einem Behälter zu regeln. Der Abfluss ist konstant auf 30 l/s (30 %) eingestellt. Der Sollwert (braunes Signal) wurde von 0 % auf 40 % gestellt. Als Parameter für den PI-Regler wurden für die Verstärkung 2, für die Nachstellzeit 10 und für die Vorhaltezeit 1.5 gewählt. Die sprungartige Änderung des Sollwerts von 0% auf 40% bewirkt eine sprungartige Änderung des D-Anteils und das Stellsignal (rotes Signal) führt einen Pieks bis zur oberen Begrenzung durch. Im nächsten Zeitschritt wirken zusätzlich der P- und der I-Anteil. Durch den I-Anteil des PID-Reglers schafft es der Regler, den Istwert nach der Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen.

Vergleicht man die PID-Regelung des Durchlauferhitzers mit der PI-Regelung, so sieht man, dass bei diesen eingestellten Parametern das Einschwingen mit dem PID-Regler nicht besser ist als die Regelung mit dem PI-Regler.

Durch Verstellen der Verstärkung, der Nachstellzeit und der Vorhaltezeit wird man erreichen können, dass die Regelung schneller einschwingt.

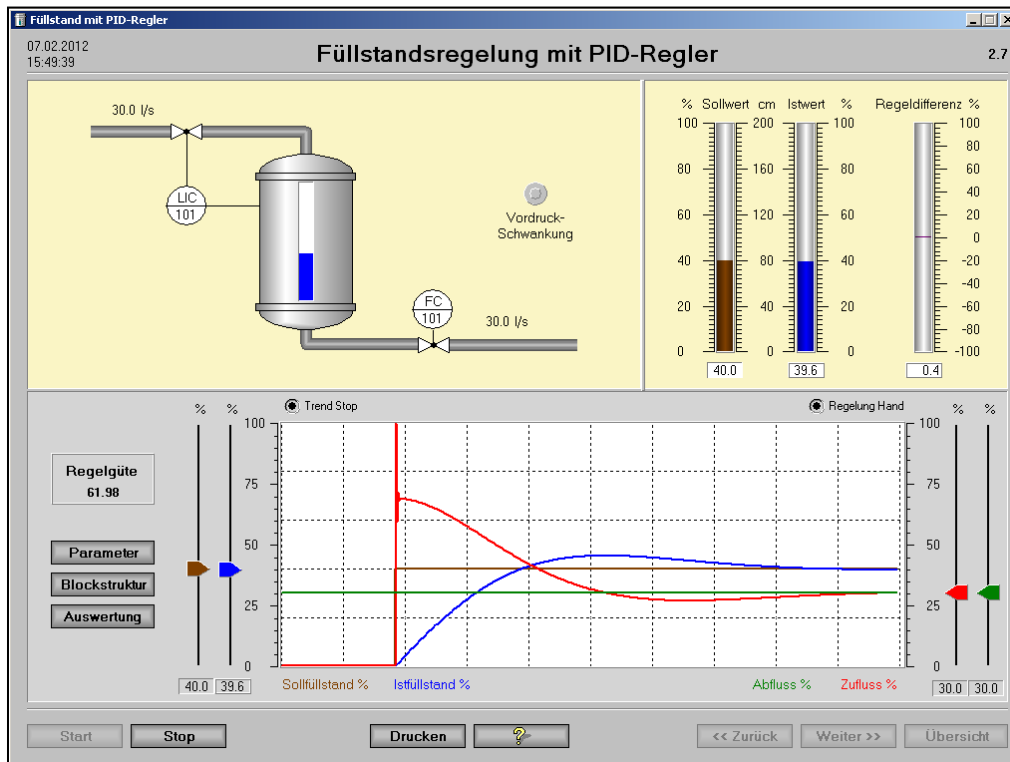


Abbildung 5-23 Füllstandsregelung mit PID-Regler

5.6.4 BEISPIEL PID-REGLER MIT PT3-STRECKE: VERHALTEN DES P-, I- UND D-ANTEILS

An der Regelung einer Pt3-Strecke mit dem PID-Regler soll betrachtet werden, wie sich der P-, der I- und der D-Anteil des PID-Reglers verhalten.

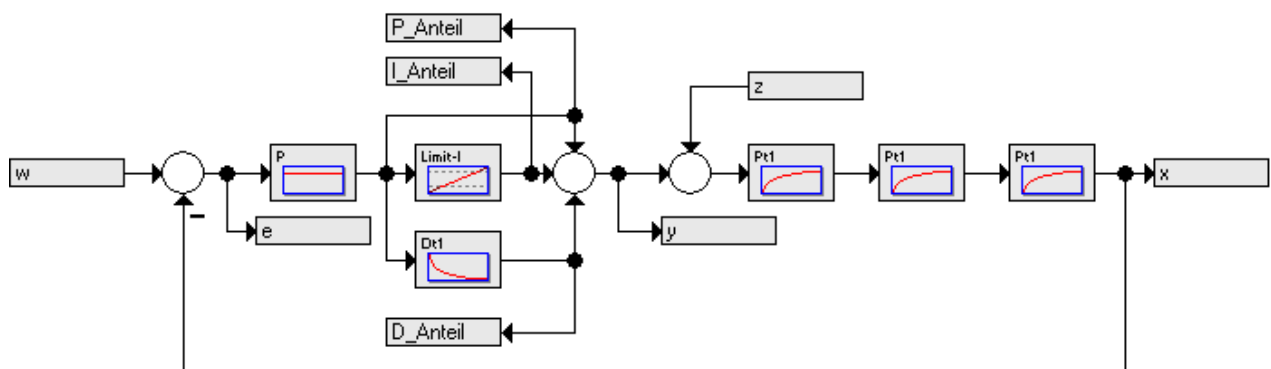


Abbildung 5-24 PID-Regler mit Pt3-Strecke

In dem Regelkreis wurde der PID-Regler aufgebaut durch einen P-Block, einen I-Block und einen D-Block, so dass der P-, I- und der D-Anteil des Reglers getrennt betrachtet werden können.

Als Verstärkung für den PID-Regler (Verstärkung des P-Blocks) wurde 2 gewählt. Die Gesamtverstärkung der drei Pt1-Blöcke (Strecke) betrug 1. Die Nachstellzeit T_i des PID-Reglers wurde auf 15 s gestellt, die Vorhaltezeit auf 1,8 s. Die Summe der Zeitkonstanten der Pt1-Blöcke betrug 18 s.

In Abbildung 5-25 werden der Sollwert w (braun), der Istwert x (blau), der Regelfehler e (hellgrün), die Störung z (grün) sowie das Stellsignal y (rot) mit dem zugehörigen P-Anteil (hellviolett), dem I-Anteil (violett) und dem D-Anteil (hellblau) dargestellt. Der Sollwert w wurde sprunghaft von 0 auf 2 gesetzt. Die Störung z blieb auf 0.

In der Abbildung lässt sich das Verhalten des Reglers mit seinem P-, I- und D-Anteil erkennen. Das Stellsignal y für den PID-Regler setzt sich additiv aus dem P-Anteil, dem I-Anteil und dem D-Anteil zusammen. In der Abbildung ergibt die Summe der beiden violetten und des hellblauen Signalverlaufs (P-Anteil, I-Anteil, D-Anteil) somit den Signalverlauf vom Stellsignal y . Das hellgrüne Signal e beschreibt den Verlauf der Regeldifferenz (die Differenz zwischen Sollwert w und Istwert x) und damit den Eingang in den Regler. Bei der sprunghaften Änderung des Sollwerts von 0 auf 2 ging e sofort auf 2 (Sollwert – Istwert = $2 - 0$). Da sich der Eingang e des PID-Reglers sprunghaft änderte, bewirkt der D-Anteil einen Pieks nach oben. Der P-Anteil des Reglers (mit der Verstärkung 2) ging sofort auf $2 * 2 = 4$. Der I-Anteil war zu diesem Zeitpunkt noch 0, fing dann aber langsam an zu steigen. Da sich das Stellsignal y additiv aus dem P-Anteil, dem I-Anteil und dem D-Anteil zusammensetzt, sprang y sofort auf die obere Begrenzung.

Der Istwert x fing an langsam zu steigen. Dadurch wurde e (Regeldifferenz) immer kleiner. Da e der Eingang in den PID-Regler ist, wird der P-Anteil (hellviolett) immer kleiner. Auch die Steigung des Signalverlaufs vom I-Anteil nimmt ab. Der D-Anteil (hellblau) nimmt immer weiter ab und wird negativ, da die Änderung des Eingangssignals in den Regler (Regeldifferenz e) abnimmt. Der D-Anteil nimmt wieder zu, als die Änderung langsamer wird. Da der D-Anteil negativ ist, wirkt er praktisch entgegen dem P- und dem I-Anteil. Der D-Anteil arbeitet vorausschauend. Wenn die Änderung des Eingangssignals e schnell abnimmt, gibt der D-Anteil einen negativen Wert aus und bremst damit die Regelung (y wird durch den D-Anteil kleiner). Wenn die Änderung von e zunimmt, reagiert er entsprechend umgekehrt. Treten keine Änderungen oder nur noch kleine Änderungen auf, ist der D-Anteil praktisch 0.

Zu dem Zeitpunkt, wenn der Istwert x den Sollwert w erreicht, ist e natürlich gleich 0 und damit auch der P-Anteil (beim P-Anteil wird ja das Eingangssignal mit einem Verstärkungsfaktor verstärkt, wenn also der Eingang gleich 0 ist, ist natürlich auch der Ausgang gleich 0). Leider hat der I-Anteil zu diesem Zeitpunkt schon einen Wert erreicht, der größer ist als der Sollwert. Das Stellsignal y gibt deshalb einen zu großen Wert aus und der Istwert x steigt über den Sollwert. Die Regeldifferenz wird jetzt negativ und damit auch der P-Anteil. Da jetzt auch ein negativer Wert in den I-Anteil geht, integriert der Integrator wieder runter und der I-Anteil nimmt langsam ab.

Vergleicht man die PID-Regelung mit der PI-Regelung, so sieht man, dass durch den D-Anteil bei dieser Parameterwahl die Regelung besser wird, da der D-Anteil schon vorausschauend abbremst und dadurch die Regelung nicht so stark überschwingt, wie bei der PI-Regelung.

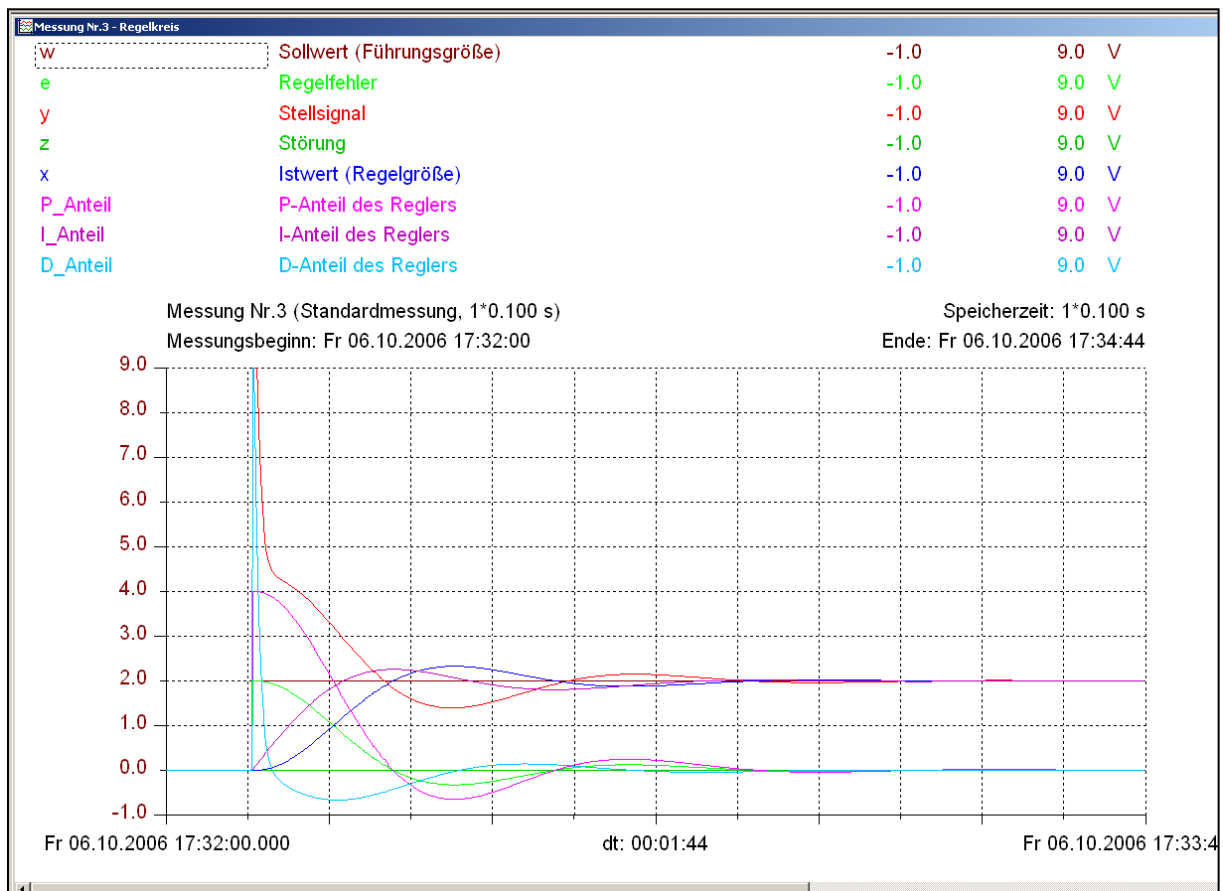


Abbildung 5-25 Verhalten des PI-Reglers (P-, I-Anteil) mit Pt3-Strecke

Dieses Spielchen setzt sich fort, bis der Istwert auf den Sollwert eingeschwungen ist. Zu diesem Zeitpunkt hat der P-Anteil den Wert 0, der I-Anteil den Wert vom Sollwert w und der D-Anteil ist gleich 0, da e sich nicht mehr ändert. Das Stellsignal y hat somit auch den Wert von w . Bitte beachten Sie, dass die Gesamtverstärkung der Strecke (Pt3-System) gleich 1 ist und die Störung 0. Deshalb haben das Stellsignal y und der I-Anteil nach der Einschwingphase den gleichen Wert wie Sollwert w und Istwert x .

6 REGLEREINSTELLVERFAHREN

In der Regelungstechnik besteht neben dem Problem der Auswahl des geeigneten Reglers für die Regelstrecke natürlich auch das Problem für den gewählten Regler geeignete Reglerparameter zu finden.

Es gibt in der Literatur diverse Reglereinstellverfahren, die den Anwender bei der Auswahl der Reglerparameter unterstützen. Bei diesen Verfahren wird die Regelstrecke untersucht und abhängig vom Verhalten der Regelstrecke werden Reglerparameter vorgeschlagen. Diese Verfahren basieren auf empirischen Untersuchungen. Die vorgeschlagenen Parameter sind deshalb nicht unbedingt die optimalen Parameter. Oft sind es aber Parameter mit denen der Regelkreis in der Praxis gut gefahren werden kann.

Einige bekannte Reglereinstellverfahren sind:

- Ziegler/Nichols I und II
- Chien/Hrones/Reswick
- TSummen-Regel nach Kuhn
- Oppelt
- Methode der maximalen Anstiegsgeschwindigkeit
(für Temperatur-Strecken nach Müller)
- Einstellregeln nach Faustformeln

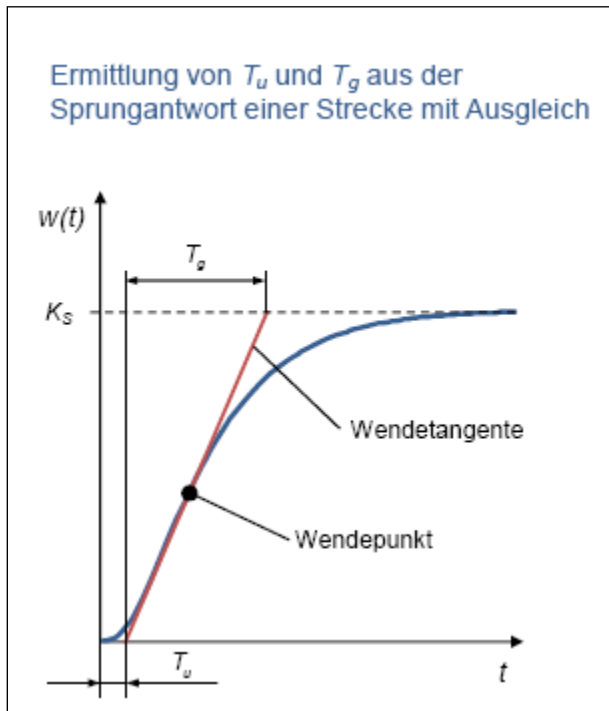
Im Folgenden werden Untersuchungen mithilfe der Reglereinstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick, Ziegler/Nichols und der Faustformel durchgeführt.

6.1 VERFAHREN NACH CHIEN/HRONES/RESWICK

Beim Verfahren von Chien/Hrones/Reswick wird die Sprungantwort auf einen Stellwertsprung (Einheitssprung) auf die Strecke untersucht. Hierzu muss sich die Regelstrecke in einem stabilen Arbeitspunkt befinden. Sie müssen den Regler auf „Hand“ stellen und das Stellsignal und die Regelgröße dürfen sich nicht mehr ändern. Geben Sie eine sprungartige Änderung des Stellsignals um 1 vor und betrachten Sie das Verhalten der Strecke. Statt einen Sprung von 1 aufzuschalten, kann auch eine andere Sprunghöhe gewählt werden. Die Sprunghöhe muss dann später bei der Berechnung der Parameter berücksichtigt werden.

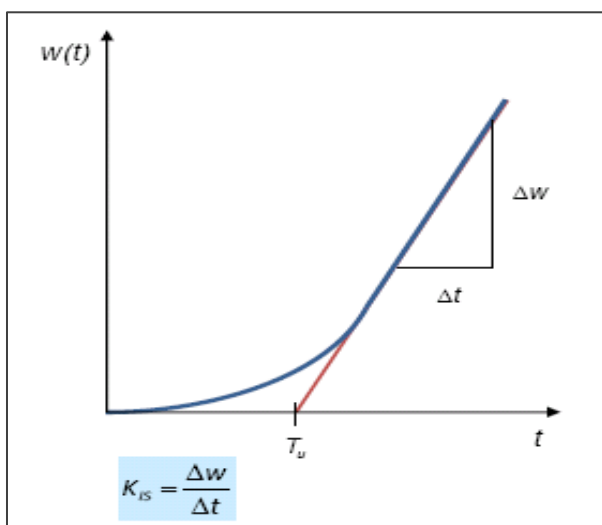
Prinzipiell unterscheidet man zwei Arten von Strecken: Strecken mit Ausgleich und Strecken ohne Ausgleich. Eine Strecke mit Ausgleich schwingt nach einer endlichen Zeit bei einer sprungartigen Änderung des Stellwertes auf einen konstanten Wert ein, während bei einer Strecke ohne Ausgleich die Regelgröße (Istwert) immer weiter steigt.

Eine Strecke mit Ausgleich hat in etwa folgendes Verhalten auf einen Einheitssprung des Stellsignals (sprungartige Änderung des Stellsignals um 1):



Aus dieser Sprungantwort können Sie die Parameter K_S , T_g und T_u bestimmen, wie in dem obigen Bild dargestellt. Die Regelstreckenverstärkung K_S ergibt sich aus der sprungartigen Änderung des Stellsignals um 1. Falls Sie eine größere Stellwertänderung vornehmen, müssen Sie den sich ergebenden Verstärkungswert der Strecke durch die Änderung des Stellwertes teilen, um K_S zu erhalten.

Wenn Sie eine Strecke ohne Ausgleich haben, wird in etwa folgendes Verhalten auf eine Einheitssprungänderung des Stellsignals auftreten:



Hier können Sie K_S als Steigung der Tangente und T_u als Schnittpunkt der Tangente mit der Zeitachse bestimmen.

Aus K_S berechnen Sie die Zeitkonstante T_i durch $T_i = 1/K_S$.

Es bedeuten:

- T_u Verzugszeit
- T_g Ausgleichszeit der Regelstrecke
- K_S Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich
- K_{IS} Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich

Die Reglerparameter können Sie dann aus der Einstelltabelle nach Chien/Hrones/Reswick errechnen:

Reglerverhalten	Gütekriterium			
	Überschwingung nach Gegenseite mit 20% von x_m , kürzeste Schwindungsdauer		aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer	
	Störung	Führung	Störung	Führung
P	$K_P \approx \frac{0,7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P \approx \frac{0,7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P \approx \frac{0,3}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P \approx \frac{0,3}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
PI	$K_P \approx \frac{0,7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 2,3 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx T_g$	$K_P \approx \frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 4 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,35}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 1,2 \cdot T_g$
PID	$K_P \approx \frac{1,2}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 2 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,95}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 1,35 \cdot T_g$ $T_v \approx 0,47 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,95}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 2,4 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx T_g$ $T_v \approx 0,5 \cdot T_u$

Für Regelstrecken *ohne Ausgleich* ist statt $\frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ der Ausdruck $\frac{1}{K_{IS} \cdot T_u}$ einzusetzen.

Abbildung 6-1 Regelparameter nach Chien/Hrones/Reswick [Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg]

Falls Sie eine Strecke ohne Ausgleich haben, müssen Sie in der Tabelle statt des Ausdrucks $T_g/(K_S \cdot T_u)$ den Ausdruck $1/(K_{IS} \cdot T_u)$ einsetzen und die Zeitkonstante T_g ersetzen durch $T_i = 1/K_{IS}$.

6.2 REGLEREINSTELLUNG DER FÜLLSTANDSREGELUNG NACH CHIEN/HRONES/RESWICK

Um die Strecke zu untersuchen, wählen Sie bei der Füllstandsregelung den Punkt „Strecke untersuchen“.

Bei der Füllstandsstrecke handelt es sich um eine Strecke ohne Ausgleich. Um einen Stellwertsprung aufschalten zu können, muss sich die Strecke in einem stabilen Arbeitspunkt befinden. Wählen Sie als Arbeitspunkt z.B. 30%.

Stellen Sie den Zufluss F_{Qzu} auf 30%. Der Füllstand F_H ändert sich nicht, da auch der Abfluss F_{Qab} auf 30% steht. Erhöhen Sie den Zufluss F_{Qzu} um 10%, setzen Sie ihn also von 30% auf 40%.

Messen Sie, die Steigung und die Anfangsverzögerung T_u aus (festhalten des Anfangspunktes mit der linken Maustaste und ziehen zum zweiten Punkt), wie in den beiden Bildern zu sehen ist.

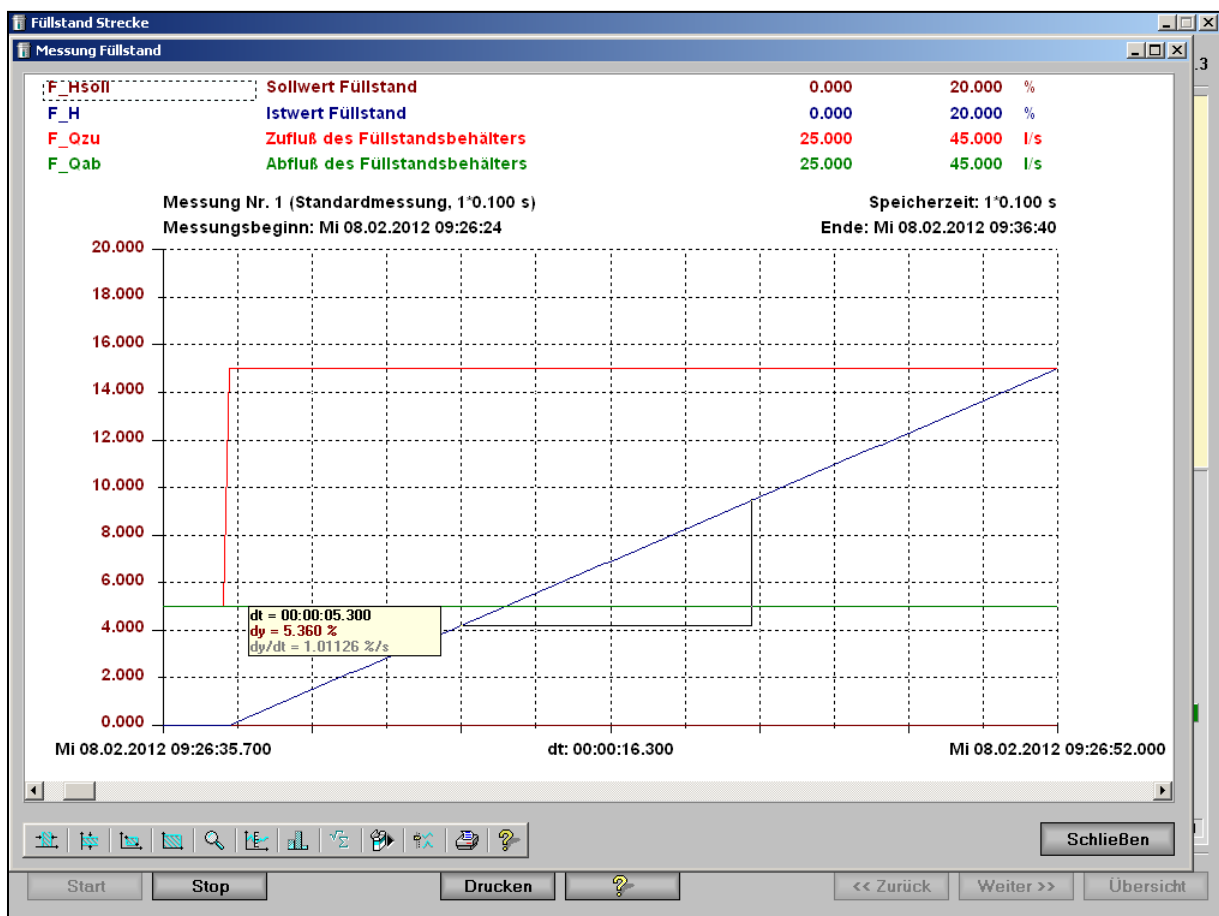


Abbildung 6-2 Sprungantwort auf einen Stellwertsprung von 30% auf 40% und Ausmessen der Tangente von F_{Qzu}

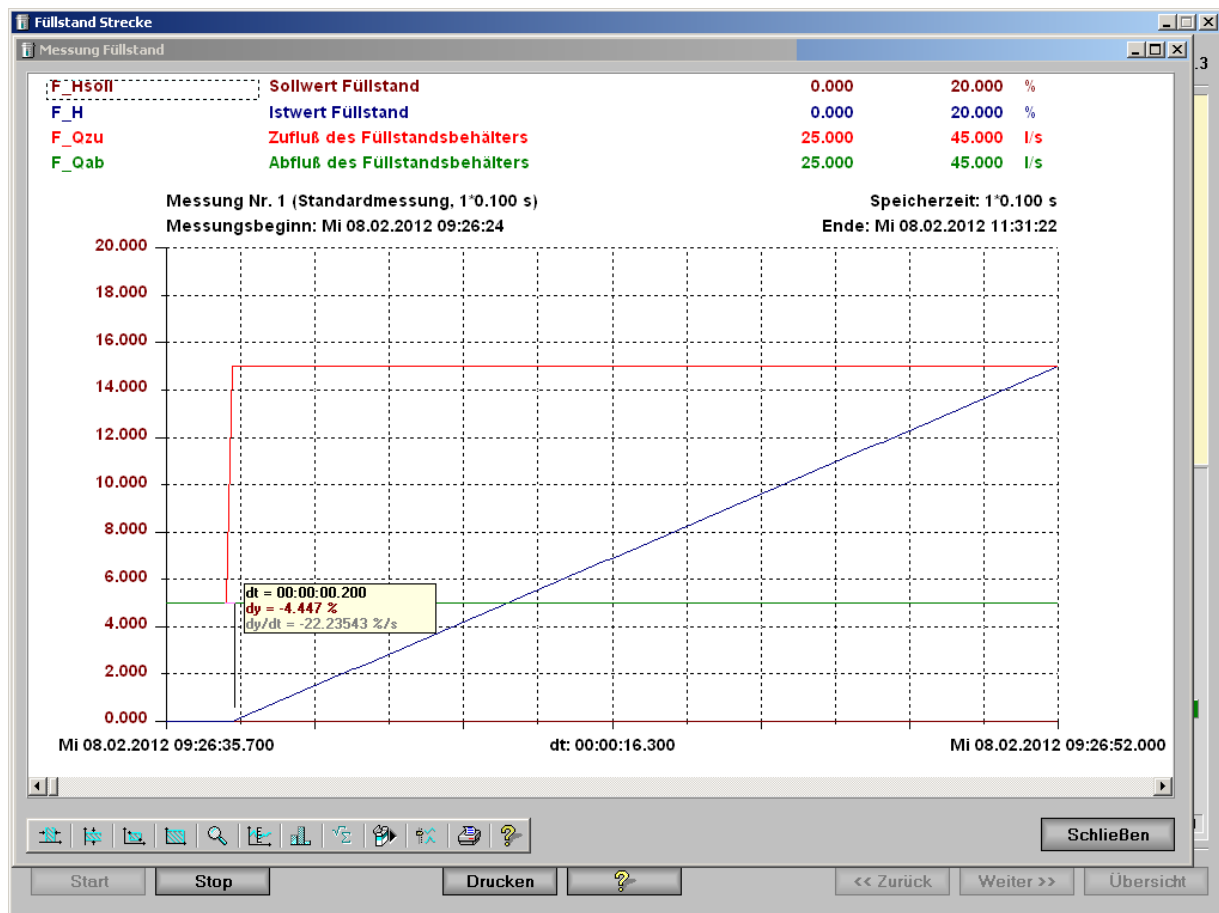


Abbildung 6-3 Sprungantwort auf einen Stellwertsprung von 30% auf 40% und Ausmessen der Tangente von der Anfangsverzögerung T_u

In Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 können Sie T_u und K_{is} bestimmen. T_u ist 0,2s, wie in Abbildung 6-3/Abbildung 6-5 zu sehen ist. Die Steigung der Geraden beträgt ungefähr 1%/s. Damit kommen wir auf $K_{is} = 1 / 10 = 0,1$ %/s (Steigung / Sprunghöhe), da wir einen Sprung von 10% vorgegeben haben.

Ti ergibt sich zu: $T_i = 1/K_{is} = 10s$ und $T_u = 0,2s$

Aus der Tabelle berechnen wir folgende Reglerparameter für das Führungsverhalten mit ca. 20% Überspringen:

PI: $K_p = 0,6 * 1 / (K_{is} * T_u) = 0,6 * 1 / (0,1 * 0,2) = 0,6 * 50 = 30$

$T_i (T_n) = T_i = 1/K_{is} = 10s$

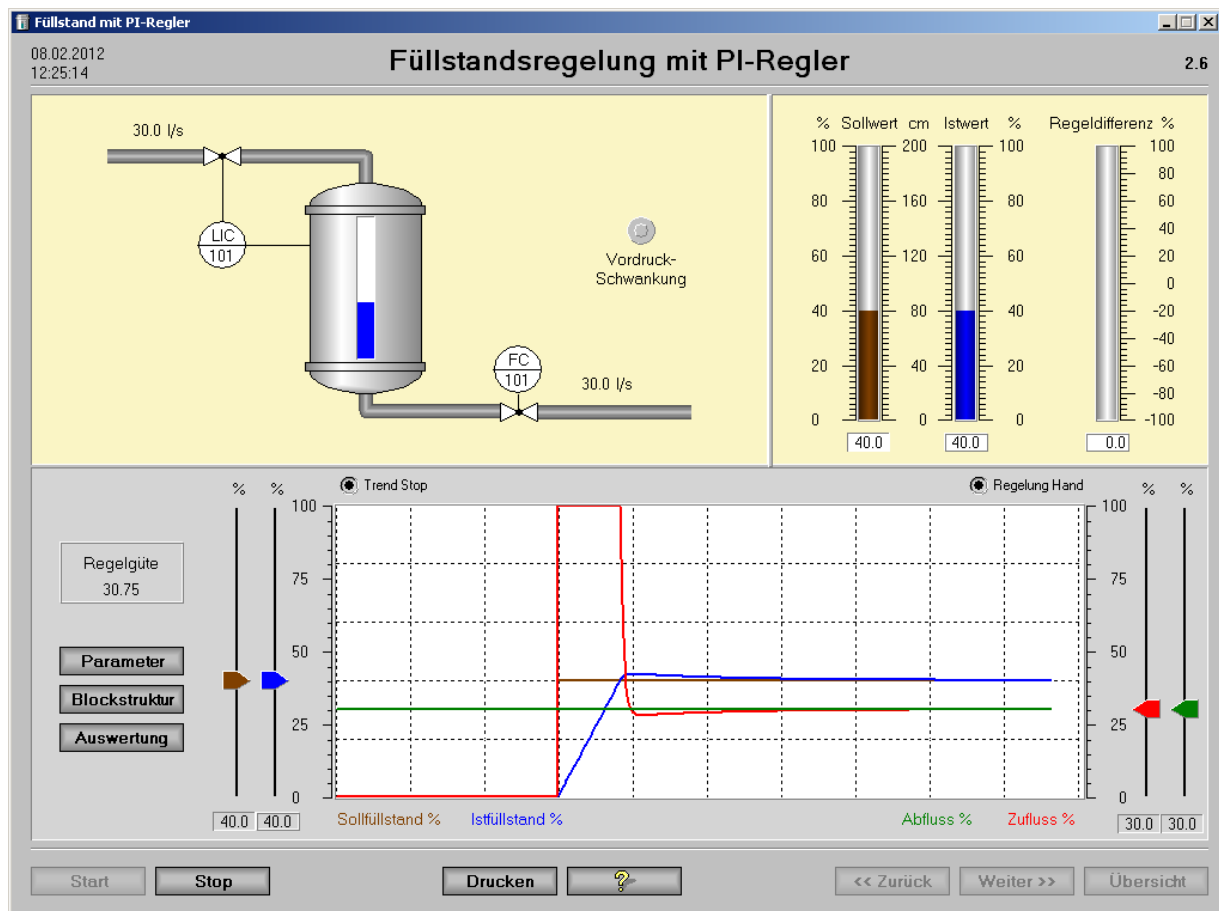


Abbildung 6-4 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung mit 20% Überspringen

Als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überspringen ergeben sich folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,35 \cdot 1 / (K_{is} \cdot T_u) = 0,35 \cdot 50 = 17,5$$

$$T_i (T_n) = 1,2 \cdot T_i = 1,2 \cdot 10s = 12s$$

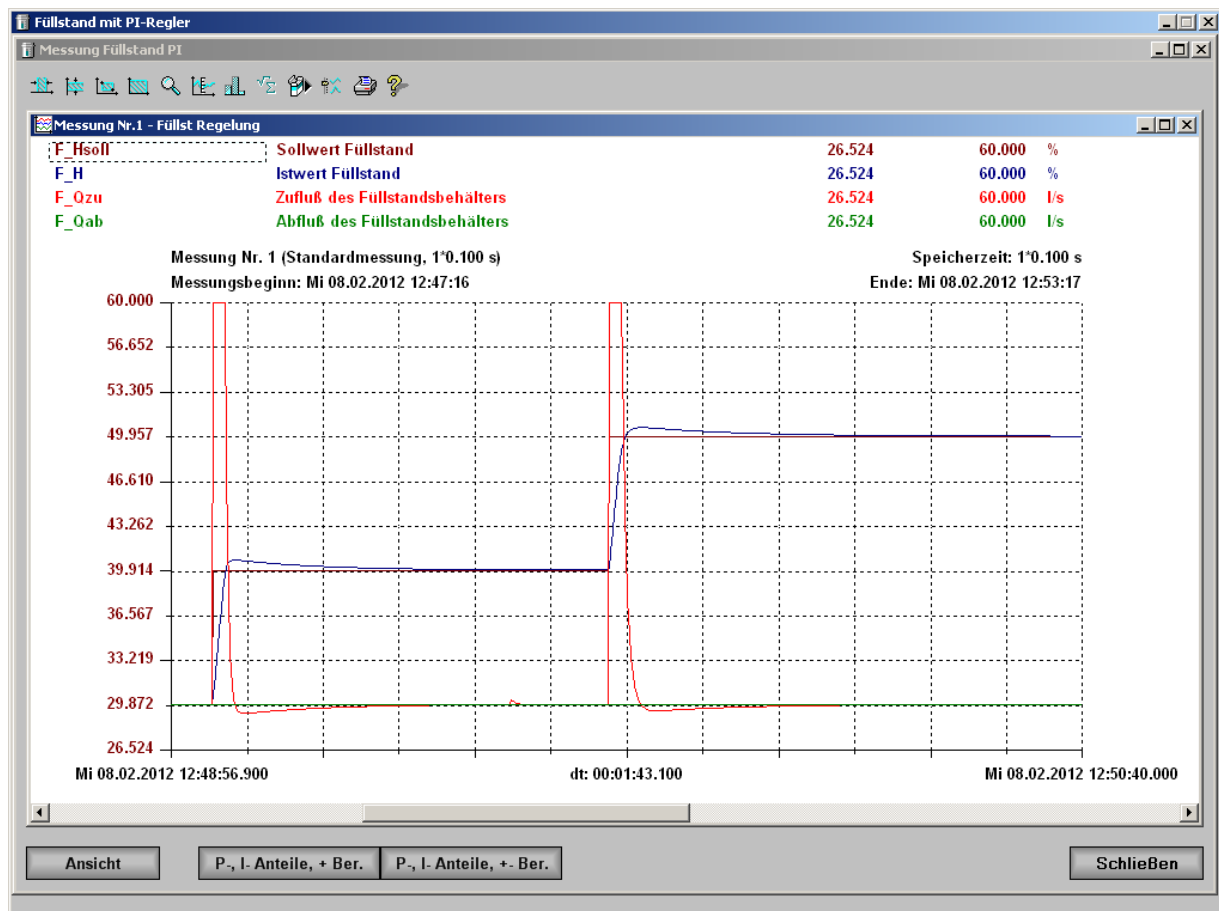


Abbildung 6-5 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung ohne Überspringen

Wie aus den Versuchen zu sehen ist, schwingt der Regelkreis auch bei der Einstellung der Parameter für den aperiodischen Fall (ohne Überspringen) leicht über.

Mit den Parametern für den Fall bei 20% Überspringen, schwingt der Istwert verhältnismäßig schnell auf den Sollwert ein. Allerdings haben wir bei früheren Versuchen gesehen, dass der Regelkreis mit den Parametern $K = 50$ und $T_i (T_n) = 2s$ noch schneller einschwingt.

Um die Reglerparameter für das Störverhalten zu bestimmen geht man entsprechend vor und erhält folgende Parameter.

PI: $K_v = 0,7 * 1 / (K_{is} * T_u) = 0,7 * 50 = 35$

$T_i (T_n) = 2,3 * T_u = 2,3 * 0,2 = 0,46s$

Da das berechnete $T_i (T_n)$ bei der simulierten Anlage aus Gründen der numerischen Stabilität nicht eingegeben werden kann, soll als kleinste Zeitkonstante für $T_i (T_n)$ 0,5s gewählt werden.

6.3 REGLEREINSTELLUNG NACH FAUSTFORMELN FÜR STRECKEN OHNE AUSGLEICH

Ki (Kis) und Tu werden bestimmt wie im vorigen Abschnitt.

Tabelle 2 Die Faustformeln wurden aus dem Buch von Josef Uphaus, Grundlagen der Regelungstechnik, Dümmler Verlag entnommen.

Regler	Kv	Ti (Tn)	Td (Tv)
P	$0,5 * 1 / (K_i * T_u)$		
PI	$0,42 * 1 / (K_i * T_u)$	$5,8 * T_u$	
PID	$0,4 * 1 / (K_i * T_u)$	$3,2 * T_u$	$0,8 * T_u$

Damit ergeben sich für den PI-Regler folgende Parameter:

$$K_v = 0,42 * 1 / (0,1 * 0,2) = 0,42 * 50 = 21, \quad T_i (T_n) = 5,8 * 0,2 = 1,16s$$

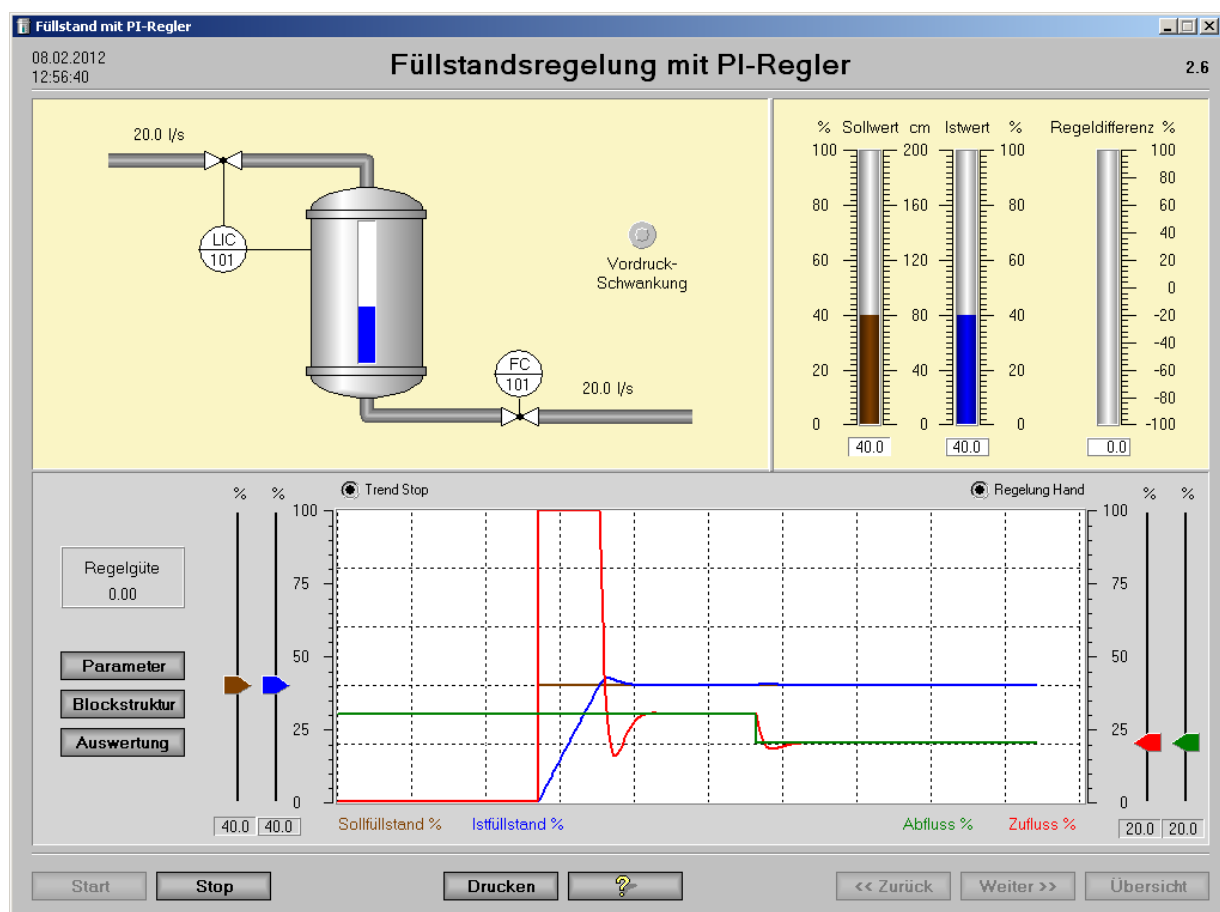


Abbildung 6-6 PI-Regler, Einstellung nach Faustformel, Führungsverhalten und Störverhalten mit den Reglerparametern Verstärkung = 21 und Nachstellzeit = 1,2s

Die nach der Faustformel berechneten Parameter eignen sich gut für die Regelung dieser Strecke sowohl für das Führungsverhalten wie für das Störverhalten.

6.4 VERFAHREN NACH CHIEN/HRONES/RESWICK FÜR STRECKE MIT AUSGLEICH

Beim Verfahren von Chien/Hrones/Reswick wird die Sprungantwort auf einen Stellwertsprung (Einheitssprung) der Strecke untersucht. Hierzu muss sich Ihre Regelstrecke in einem stabilen Arbeitspunkt befinden. Sie müssen den Regler auf „Hand“ stellen und das Stellsignal und die Regelgröße dürfen sich nicht mehr ändern. Geben Sie eine sprungartige Änderung des Stellsignals um 1 vor und betrachten Sie das Verhalten der Strecke.

Eine Strecke mit Ausgleich hat in etwa folgendes Verhalten auf einen Einheitssprung des Stellsignals (sprungartige Änderung des Stellsignals um 1):

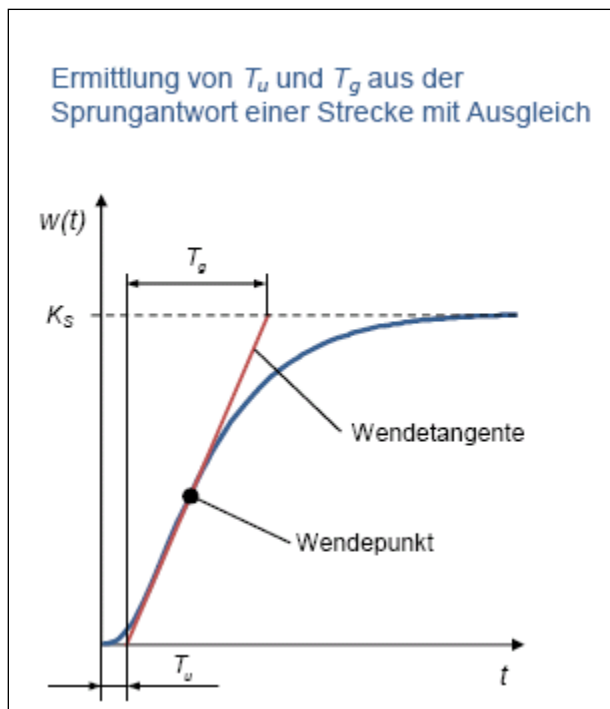


Abbildung 6-7 Ermittlung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Wesrick aus einem Einheitssprung

Aus dieser Sprungantwort können Sie die Parameter K_S , T_g und T_u bestimmen, wie in dem obigen Bild dargestellt. Die Regelstreckenverstärkung K_S ergibt sich aus der sprungartigen Änderung des Stellsignals um 1. Falls Sie eine größere Stellwertänderung vornehmen, müssen Sie den sich ergebenden Verstärkungswert der Strecke durch die Änderung des Stellwertes teilen, damit Sie K_S erhalten.

Es bedeuten:

- | | |
|-------|--|
| T_u | Verzugszeit |
| T_g | Ausgleichszeit der Regelstrecke |
| K_S | Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich |

Die Reglerparameter können Sie dann aus der Einstelltabelle nach Chien/Hrones/Reswick errechnen:

Regler- verhalten	Gütekriterium			
	Überschwingung nach Gegenseite mit 20% von x_m , kürzeste Schwindungsdauer		aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer	
	Störung	Führung	Störung	Führung
P	$K_P \approx \frac{0,7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P \approx \frac{0,7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P \approx \frac{0,3}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P \approx \frac{0,3}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
PI	$K_P \approx \frac{0,7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 2,3 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx T_g$	$K_P \approx \frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 4 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,35}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 1,2 \cdot T_g$
PID	$K_P \approx \frac{1,2}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 2 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,95}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 1,35 \cdot T_g$ $T_v \approx 0,47 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,95}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx 2,4 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$	$K_P \approx \frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ $T_n \approx T_g$ $T_v \approx 0,5 \cdot T_u$

Für Regelstrecken *ohne Ausgleich* ist statt $\frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ der Ausdruck $\frac{1}{K_{IS} \cdot T_u}$ einzusetzen.

Abbildung 6-8 Reglerparameter nach Chien/Hrones/Wesrick [Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg]

6.5 REGLEREINSTELLUNG DER TEMPERATURREGELUNG NACH CHIEN/HRONES/RESWICK

Bei der Temperaturstrecke handelt es sich um eine Strecke mit Ausgleich.

Wählen Sie bei der Temperaturregelung den Punkt „Strecke untersuchen“.

Geben Sie einen Sprung der Heizleistung von 0kW auf 30kW vor.

Wählen Sie „Auswertung“ und bestimmen Sie die Parameter K_S , T_u und T_g aus den gespeicherten Signalverläufen.

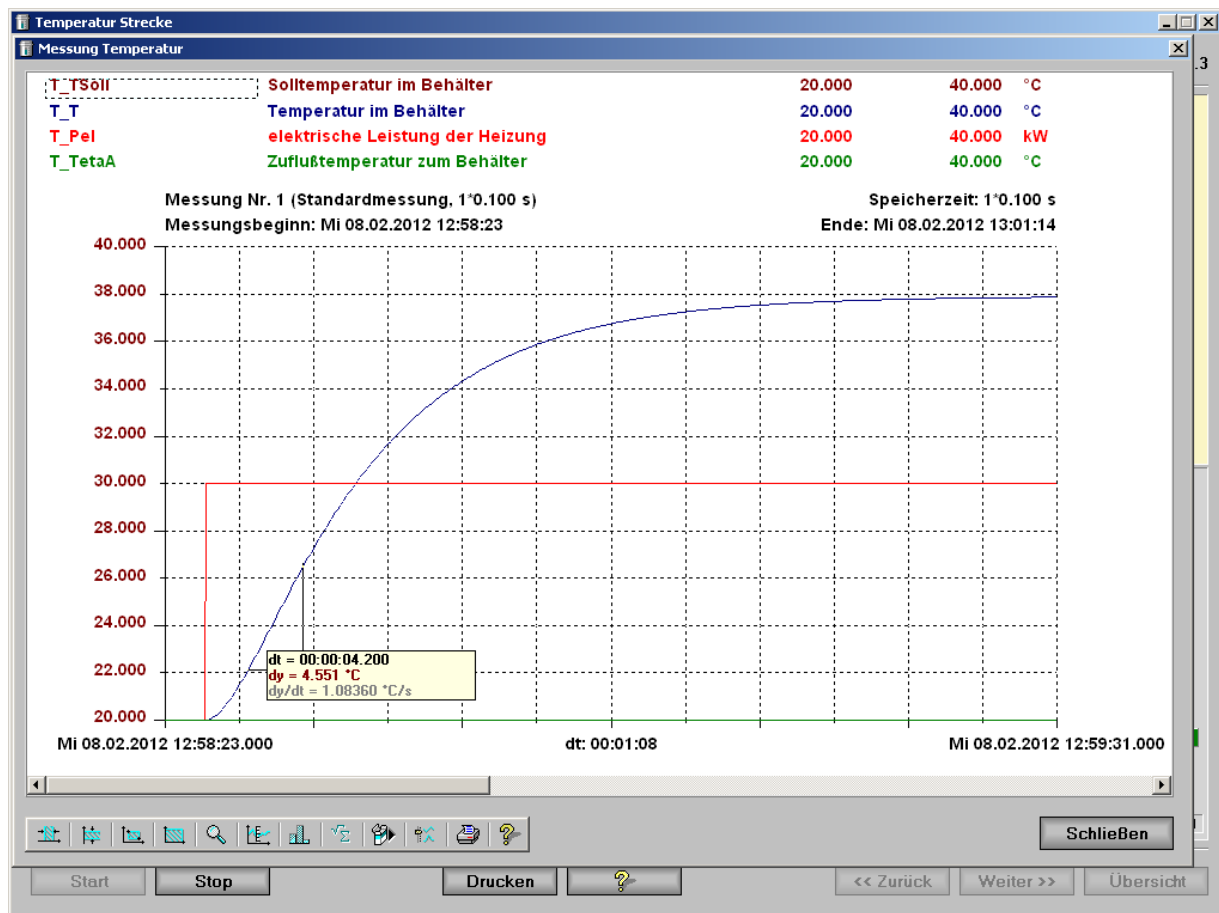


Abbildung 6-9 Sprungantwort auf einen Stellwertsprung von 50,1% auf 60,1%

Aus dem Kurvenverlauf lässt sich ungefähr die Steigung der Tangente bestimmen zu $dx/dt = 1,08$ °C/s also ungefähr 1,1 °C/s

Bei der sprunghaftigen Änderung der Heizleistung von 0kW auf 30kW schwingt die Isttemperatur von 20°C auf 37,9°C ein.

Damit lässt sich die Ausgleichszeit T_g berechnen (T = Isttemperatur):

$dx/dt = (\text{Endwert}(T) - \text{Anfangswert}(T)) / T_g$, also

$$T_g = (37,9^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) / 1,1^\circ\text{C/s} = 16,27\text{s}$$

K_s ergibt sich aus:

$K_s = (\text{Endwert}(T) - \text{Anfangswert}(T)) / \text{Sprunghöhe(Heizleistung)}$

$$= (37,9^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) / 30\text{kW} = 0,597$$

Die Verzugszeit T_u lässt sich am besten bestimmen, wenn man die Kurve ausdruckt, die Tangente anlegt und dann T_u ausmisst.

Damit erhält man für T_u ungefähr 1,3s.

Also:

$$T_u = 1,3s, T_g = 16,27s, K_s = 0,597$$

Aus der Tabelle ergeben sich damit für den PI-Regler folgende Reglerparameter beim Führungsverhalten mit ca. 20% Überschwingen:

$$PI: \quad K_p = 0,6 \cdot T_g / (K_s \cdot T_u) = 0,6 \cdot 16,27 / (0,597 \cdot 1,3) = 12,58$$

$$T_i (T_n) = T_g = 16,27s$$

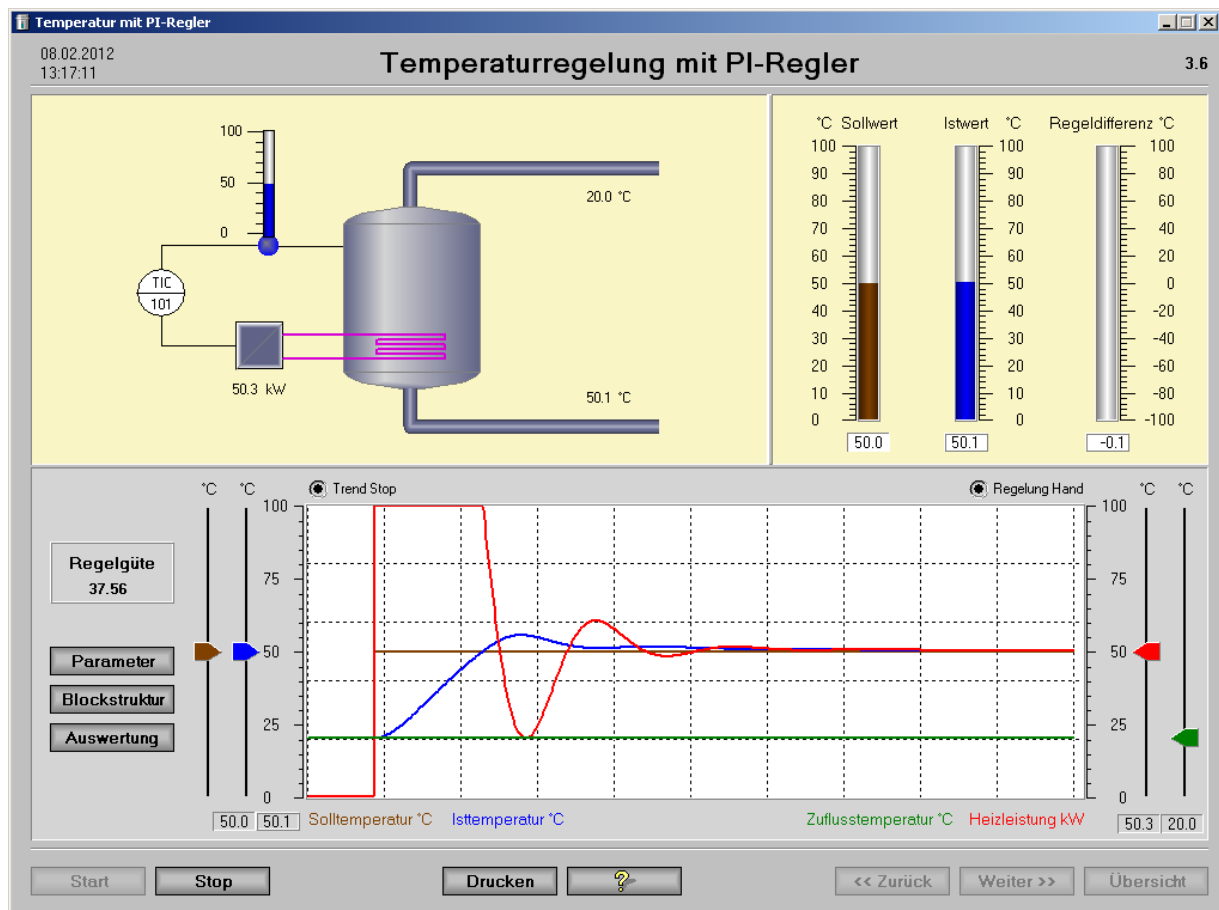


Abbildung 6-10 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung mit 20% Überschwingen

Wie an dem Einschwingverhalten zu sehen ist, schwingt der Istwert ungefähr 20% über den Sollwert.

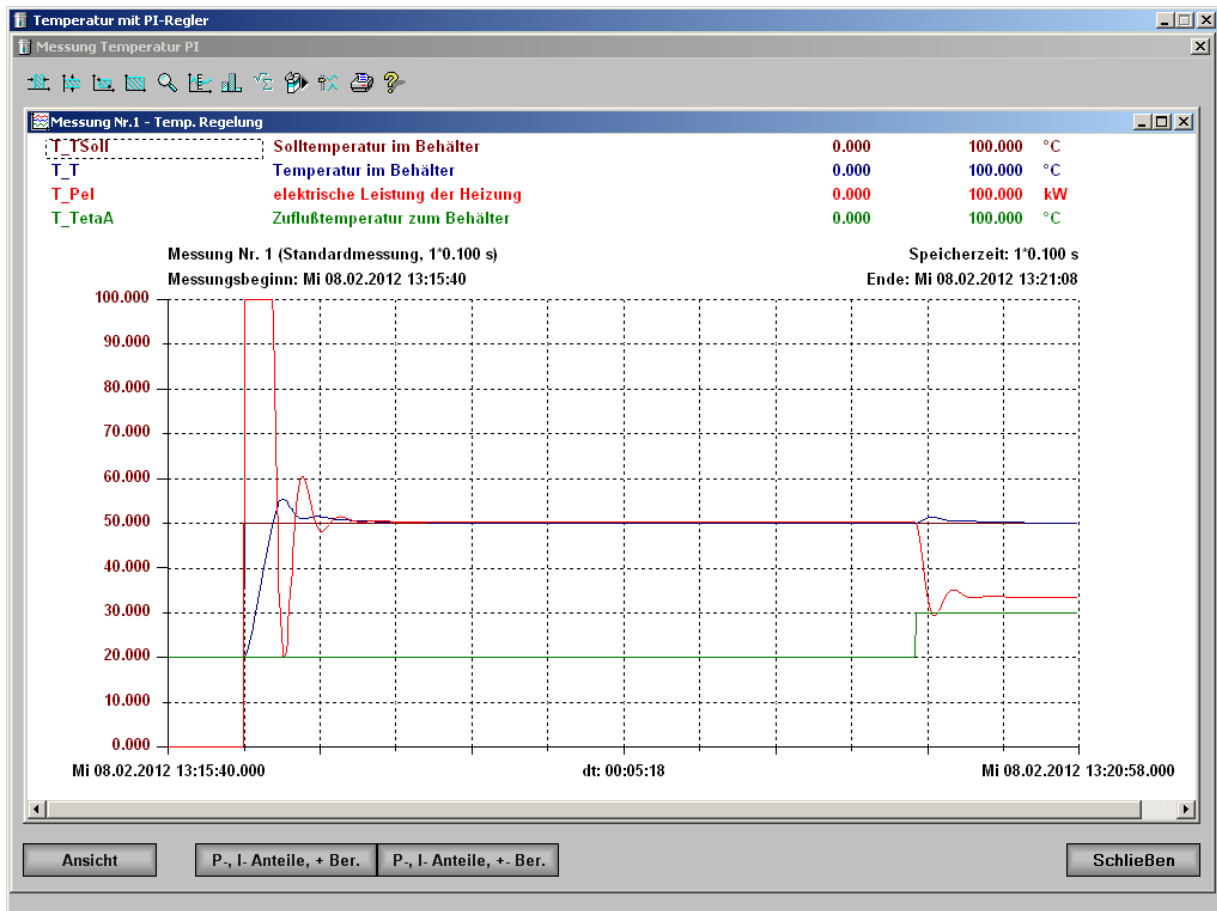


Abbildung 6-11 PI-Regler mit Parametern für Führungssprung mit 20% Überschwingen nach Chien/Hrones/Reswick, Führungs- und Störverhalten

Auch ein Störsprung von 20°C der Zulauftemperatur auf 30°C wurde mit diesen Parametern verhältnismäßig gut ausgegelt.

Als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überschwingen ergeben sich folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,35 * T_g / (K_s * T_u) = 0,35 * 16,27 / (0,597 * 1,3) = 7,34$$

$$T_i (T_n) = 1,2 * T_g = 1,2 * 16,27s = 19,52s$$

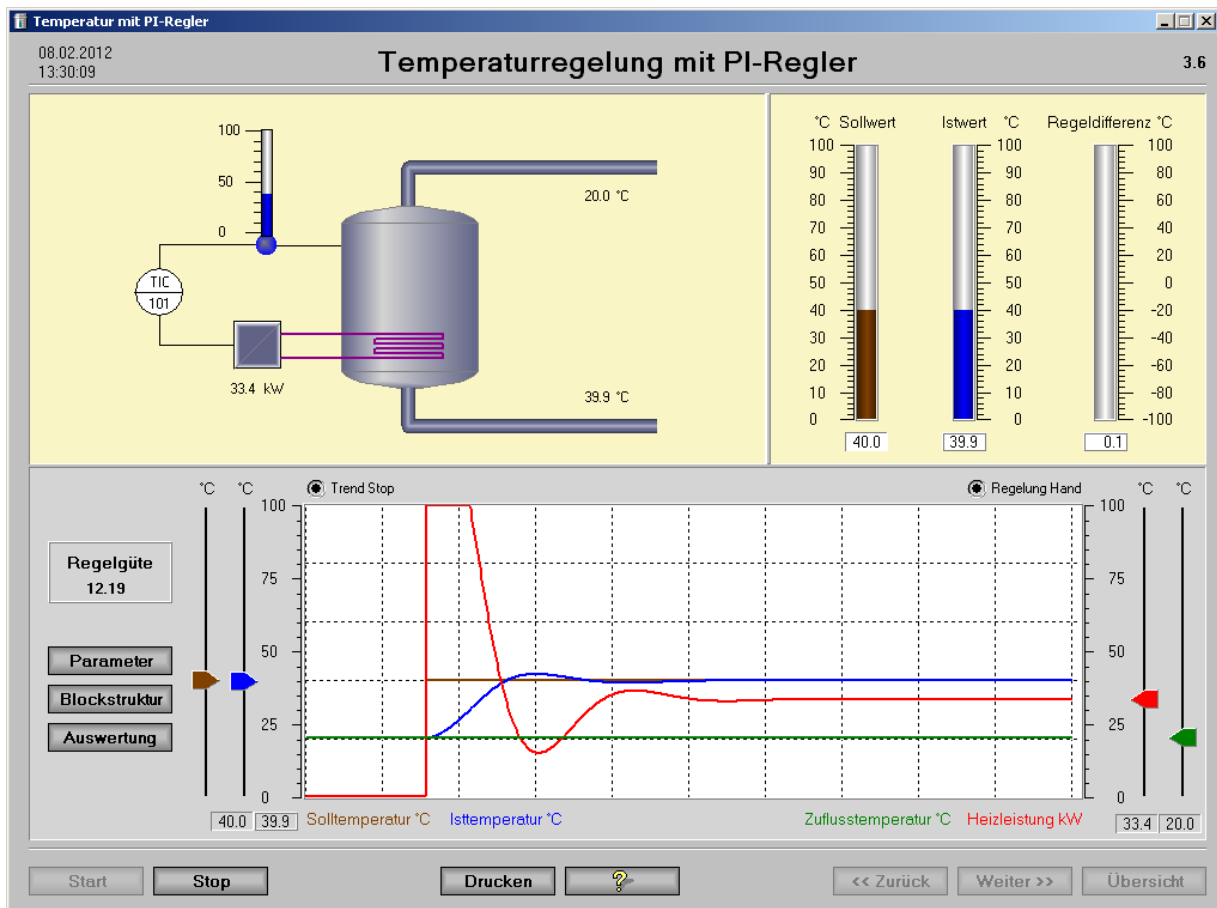


Abbildung 6-12 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung ohne Überschwingen

Wie man sieht, schwingt der Regelkreis um ca. 10% über, obwohl die Parameter für den aperiodischen Verlauf gewählt wurden. Das Überschwingen lässt sich z.B. folgendermaßen erklären: die Parameter T_u , T_g und K_s wurden nicht genau genug bestimmt; das Stellsignal geht in die Begrenzung; die Verfahren sind nur empirische Verfahren, die nicht für jede Strecke exakt gelten.

Für das Störverhalten ergeben sich mit 20% Überschwingen folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,7 * T_g / (K_s * T_u) = 0,7 * 16,27 / (0,597 * 1,3) = 14,67$$

$$T_i (T_n) = 2,3 * T_u = 2,3 * 1,3 = 2,99s$$

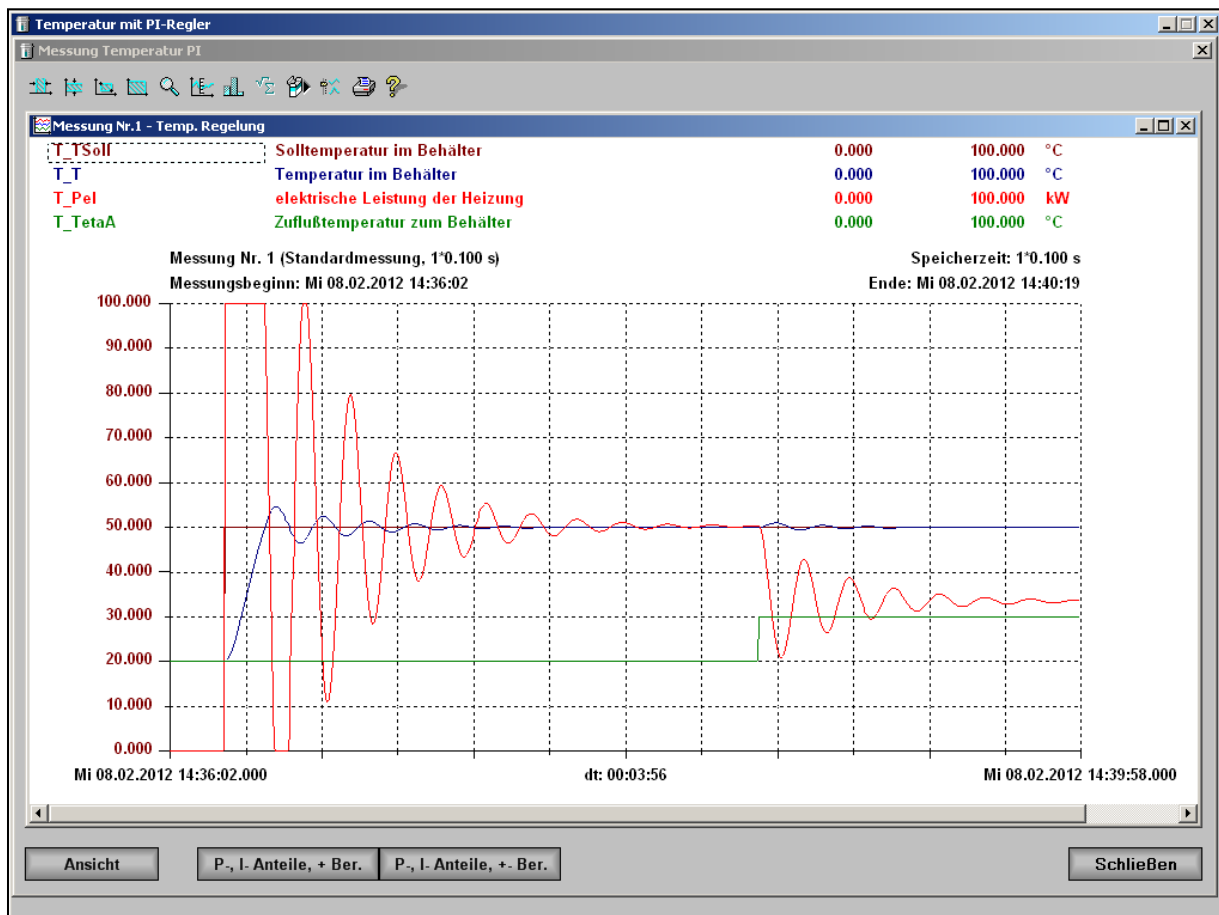


Abbildung 6-13 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Störverhalten mit Überspringen

In Abbildung 6-13 wurde ein Führungssprung von 0°C auf 50°C vorgegeben sowie eine Störung der Zuflusstemperatur von 20°C auf 30°C.

Das Führungsverhalten wird mit diesen Parametern schlecht ausgeregelt. Das Störverhalten ist einigermaßen in Ordnung.

Besteht die Aufgabe Störungen und Sollwertänderungen auszuregeln, so ist ein Kompromiss zu suchen. Die Parameter für das Führungsverhalten mit 20% Überspringen waren für das Störverhalten und das Führungsverhalten einigermaßen akzeptabel.

Soll der Regelkreis mit dem PID-Regler geregelt werden, ergeben sich als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überspringen folgende Reglerparameter:

$$\text{PID: } K_p = 0,6 * T_g / (K_s * T_u) = 0,6 * 16,27 / (0,597 * 1,3) = 12,58$$

$$T_i (T_n) = T_g = 16,27$$

$$T_d (T_v) = 0,5 * T_u = 0,65s$$

Wie in Abbildung 6-14 zu sehen ist, reagiert der PID-Regler mit diesen Parametern verhältnismäßig schnell auf eine Sollwertänderung sowie auf eine Störwertänderung.

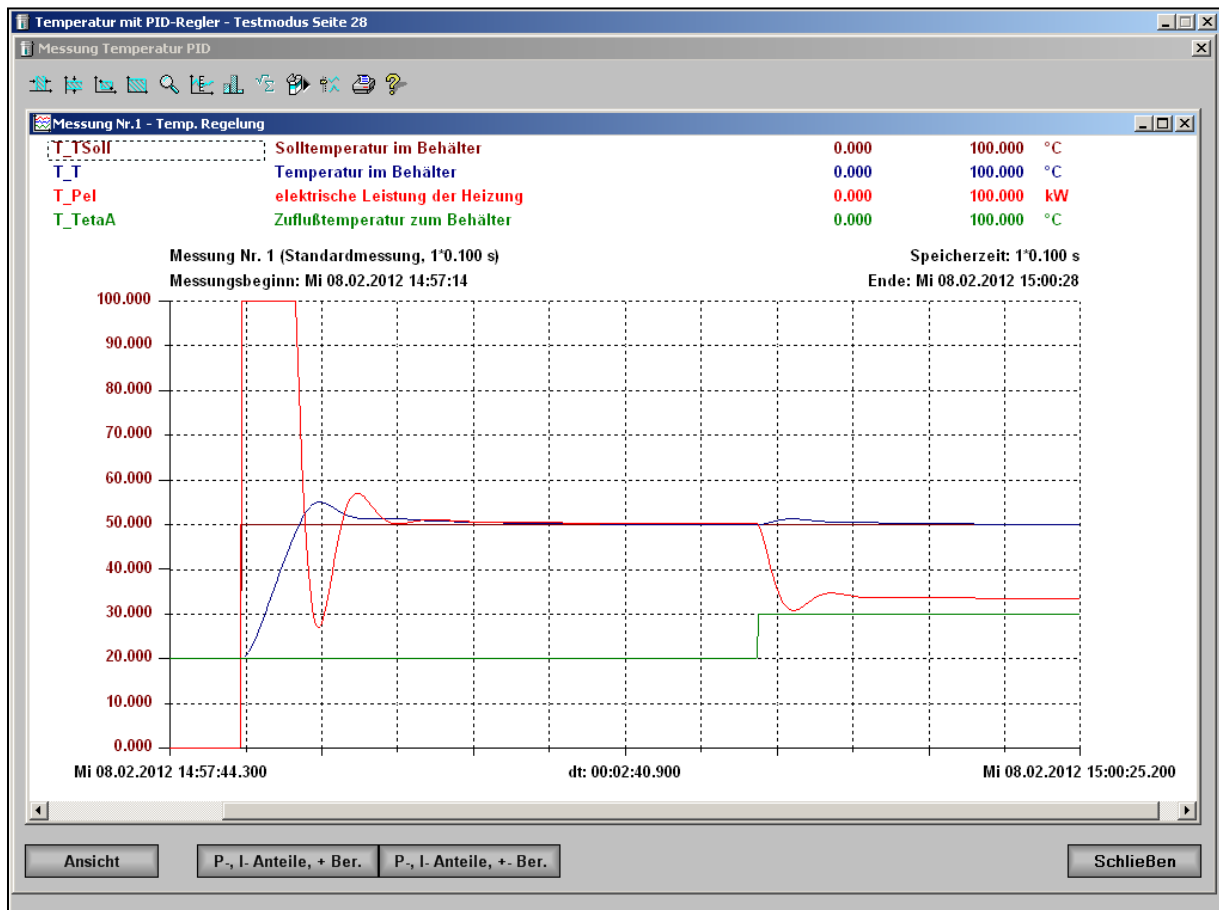


Abbildung 6-14 PID-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungs- und Störsprung

6.6 REGLEREINSTELLUNG NACH FAUSTFORMELN FÜR STRECKEN MIT AUSGLEICH

Die folgenden Faustformeln wurden aus dem Buch von Josef Uphaus, Grundlagen der Regelungstechnik, Dümmler Verlag entnommen.

K_s , T_g und T_u werden bestimmt wie im vorherigen Kapitel. Die Parameter errechnen sich nach folgender Tabelle.

Tabelle 3 Faustformeln aus dem Buch von Joseph Uphaus, Grundlagen der Regelungstechnik, Dümmler Verlag

Regler	K_v	T_i (T_n)	T_d (T_v)
P	$T_g / (K_s * T_u)$		
PI	$0,8 * T_g / (K_s * T_u)$	$3 * T_u$	
PID	$1,2 * T_g / (K_s * T_u)$	$2 * T_u$	$0,42 * T_u$

Damit ergibt sich für den PI-Regler:

$$K_p = 0,8 \cdot 16,27 / (0,597 \cdot 1,3) = 16,77$$

$$T_i (T_n) = 3 \cdot 1,3 = 3,9s$$

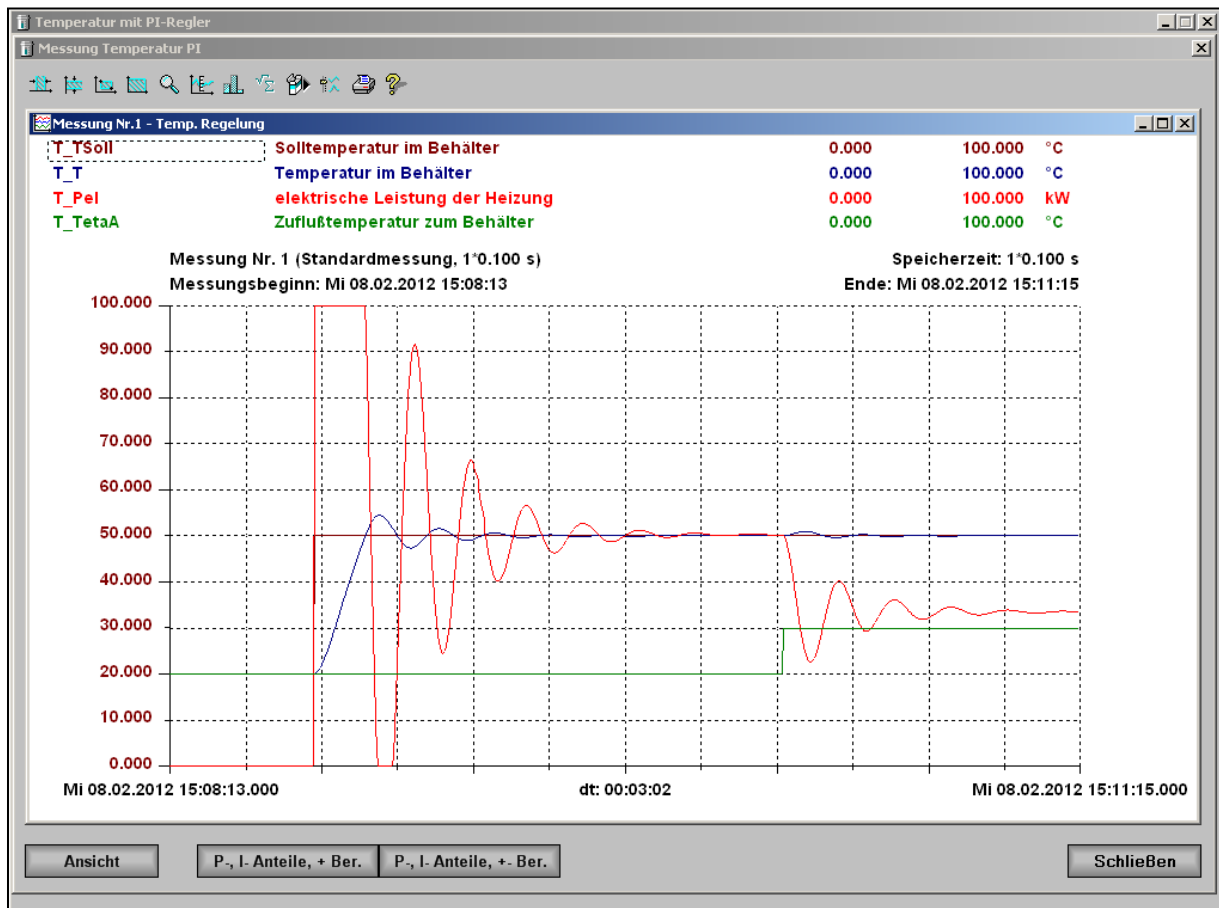


Abbildung 6-15 PI-Regler, Einstellung nach Faustformeln, Führungs- und Störverhalten

Wie in Abbildung 6-15 zu sehen ist, bringen die Parameter nach den Faustformeln bei dieser Strecke das System ziemlich zum Schwingen.

Allgemein lässt sich sagen, dass man mithilfe der Reglereinstellverfahren in die Nähe einer guten Parameterauslegung kommt. Allerdings lassen sich meistens für die Strecken noch bessere Reglerparameter finden.

Hingewiesen sei hier darauf, dass die berechneten Parameter auch immer nur für den Arbeitspunkt der Regelstrecke gelten, in dem der Sprung auf die Strecke gegeben wurde.

6.7 REGLEREINSTELLVERFAHREN FÜR DIE TEMPERATURREGELUNG MIT VERZÖGERUNG NACH CHIEN/HRONES/RESWICK

Bei der Temperaturstrecke mit Verzögerung handelt es sich um eine Strecke mit Ausgleich. Im Gegensatz zur Temperaturregelung (vorheriges Kapitel) wird hier die Temperatur nicht im Behälter, sondern im Rohr hinter dem Behälter gemessen. Die Temperatur steht damit erst nach einer Verzögerung (Totzeit) zur Verfügung. Der Regelkreis wird dadurch instabiler, d.h. er lässt sich wesentlich einfacher durch Verstellen der Reglerparameter zum Schwingen bzw. zum Aufschwingen bringen.

Wählen Sie bei der Temperaturregelung den Punkt „Strecke untersuchen“.

Geben Sie einen Sprung der Heizleistung von 0kW auf 30kW vor.

Wählen Sie „Auswertung“ und bestimmen Sie die Parameter K_s , T_u und T_g aus den gespeicherten Signalverläufen.

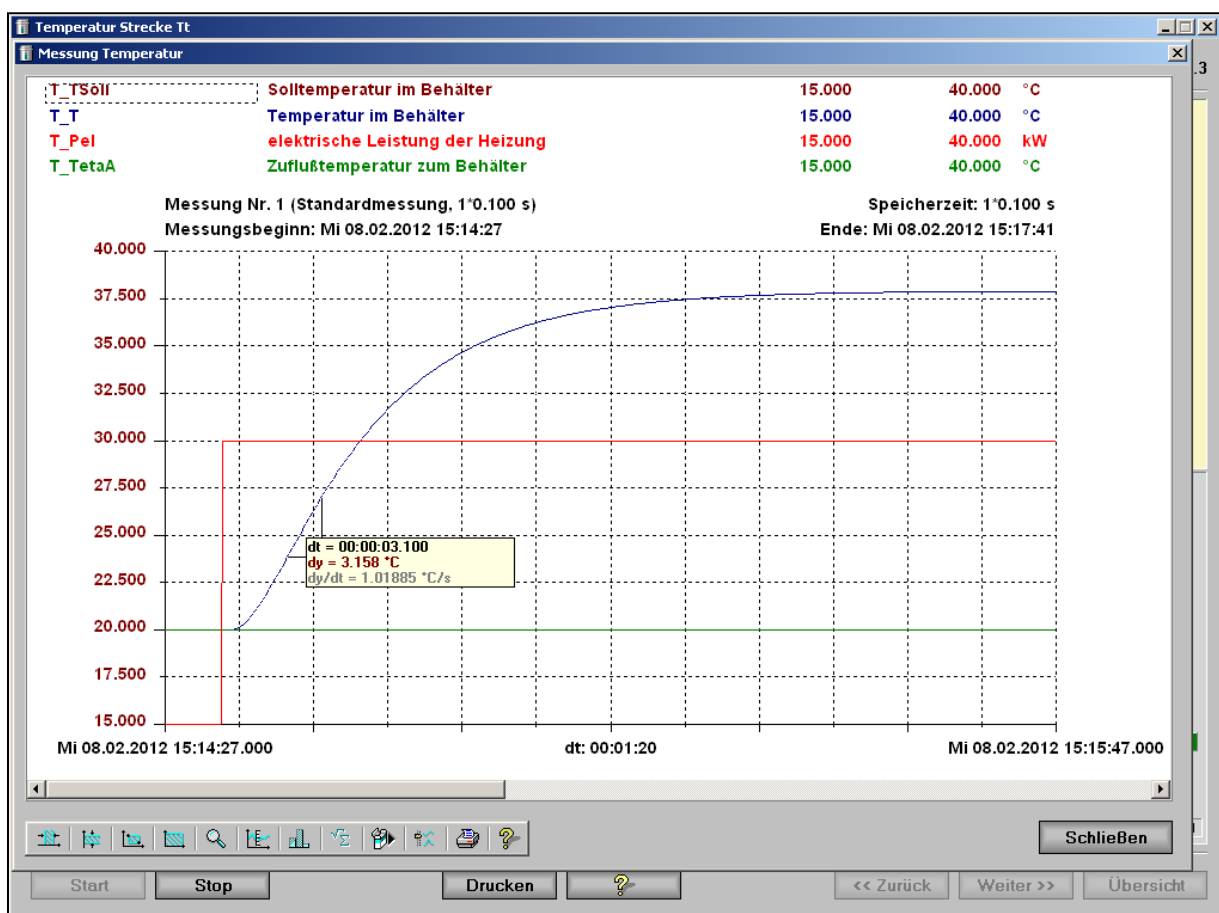


Abbildung 6-16 Sprungantwort auf einen Stellwertsprung

Aus dem Kurvenverlauf lässt sich ungefähr die Steigung der Tangente bestimmen $dx/dt = 1,1^\circ\text{C/s}$.

Bei der sprunghaftigen Änderung der Heizleistung von 0kW auf 30kW schwingt die Isttemperatur von 20°C auf $37,9^\circ\text{C}$ ein.

Damit lässt sich die Ausgleichszeit T_g berechnen (T = Isttemperatur):

$$dx/dt = (\text{Endwert}(T) - \text{Anfangswert}(T)) / T_g, \text{ also}$$

$$T_g = (37,9^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) / 1,1^\circ\text{C/s} = 16,27\text{s}$$

K_s ergibt sich aus:

$$K_s = (\text{Endwert}(T) - \text{Anfangswert}(T)) / \text{Sprunghöhe(Heizleistung)}$$

$$= (37,9^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) / 30\text{kW} = 0,597$$

Die Verzugszeit T_u lässt sich ausmessen und ist ungefähr 2,3s.

$$\text{Also: } T_u = 2,3\text{s}, T_g = 16,27\text{s}, K_s = 0,597$$

Damit ergeben sich aus der Tabelle für den PI-Regler folgende Reglerparameter beim Führungsverhalten mit ca. 20% Überschwingen:

$$\text{PI: } K_p = 0,6 \cdot T_g / (K_s \cdot T_u) = 0,6 \cdot 16,27 / (0,597 \cdot 2,3) = 7,11$$

$$T_i (T_n) = T_g = 16,27\text{s}$$

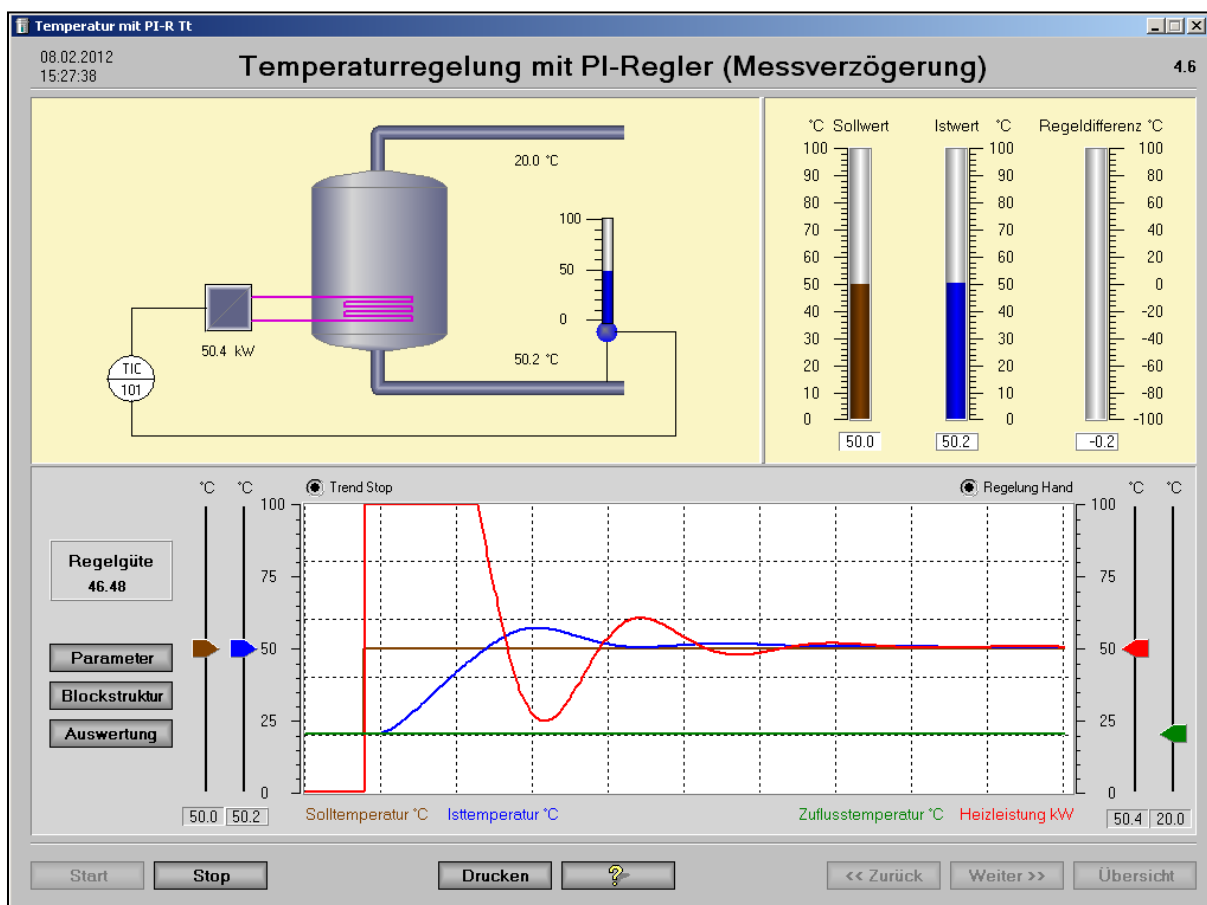


Abbildung 6-17 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung mit 20% Überschwingen

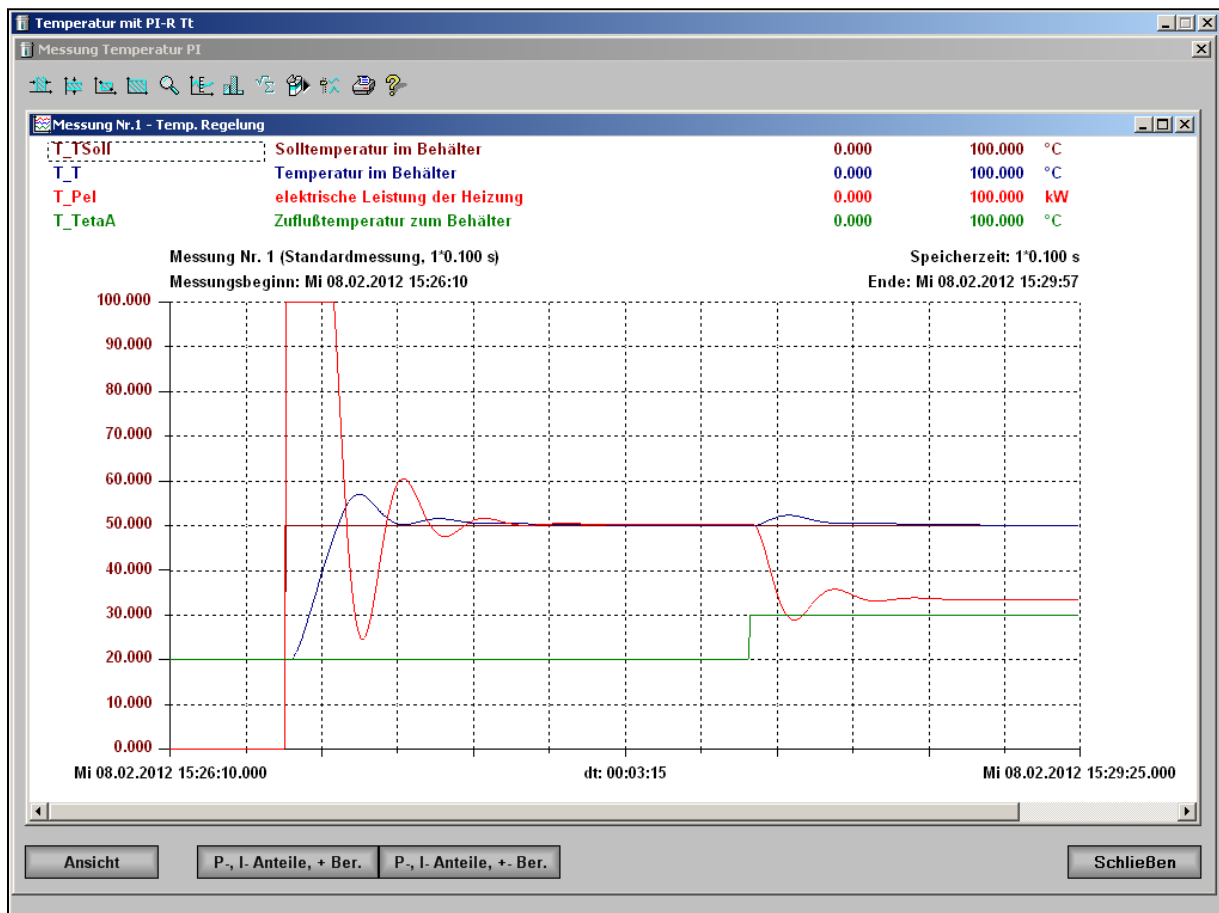


Abbildung 6-18 Stör- und Führungsverhalten beim PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung mit 20% Überspringen

Wie an dem Einschwingverhalten zu sehen ist, schwingt der Istwert ungefähr 20% über den Sollwert. Die Störung wird einigermaßen ausgeglichen.

Als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überspringen ergeben sich folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,35 \cdot T_g / (K_s \cdot T_u) = 0,35 \cdot 16,27 / (0,597 \cdot 2,3) = 4,15$$

$$T_i (T_n) = 1,2 \cdot T_g = 1,2 \cdot 16,27s = 19,52s$$

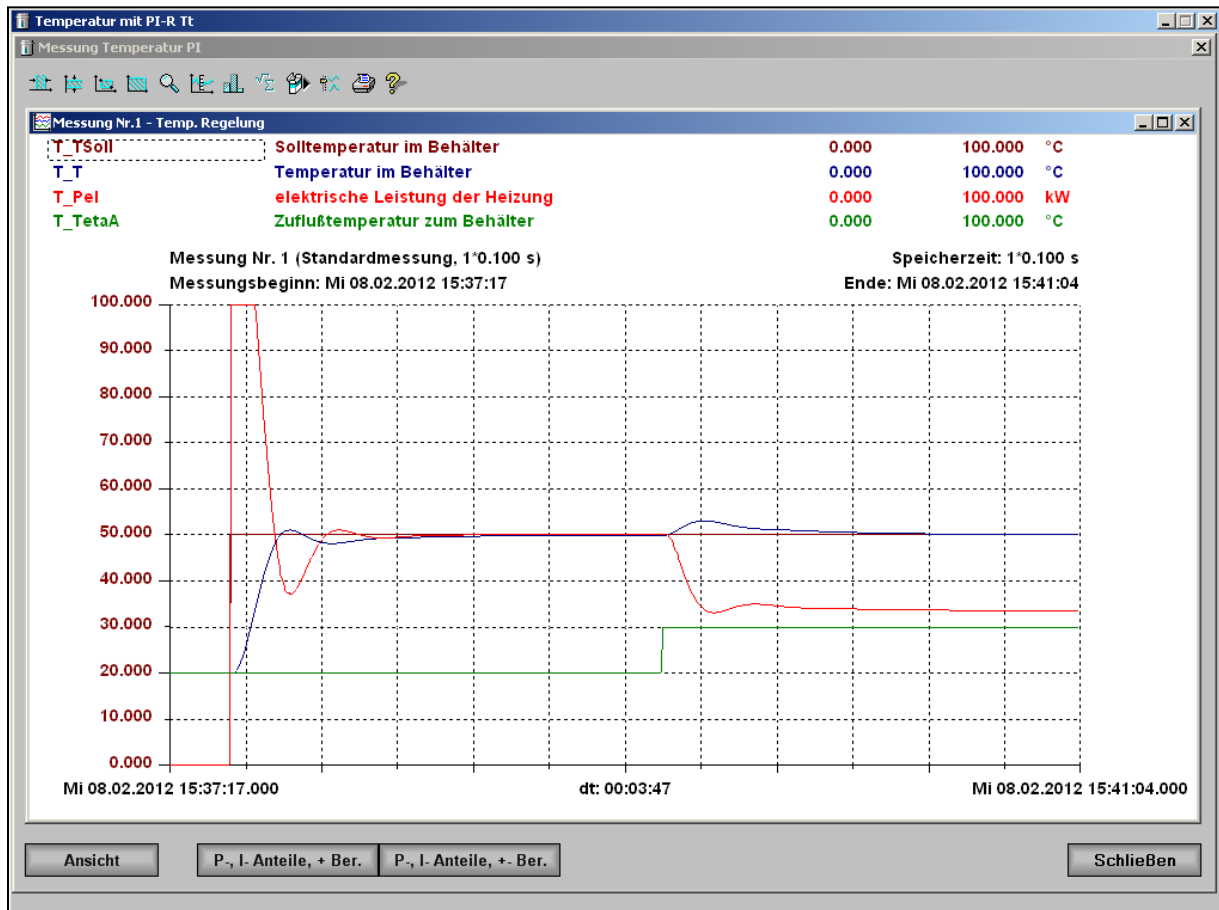


Abbildung 6-19 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung ohne Überschwingen

Wie man sieht schwingt der Regelkreis leicht über, obwohl die Parameter für den aperiodischen Verlauf gewählt wurden. Allerdings sind das Führungs- und das Störverhalten bei diesen Parametern akzeptabel.

Für das Störverhalten ergeben sich mit 20% Überschwingen folgende Reglerparameter:

PI: $K_p = 0,7 \cdot T_g / (K_s \cdot T_u) = 0,7 \cdot 16,27 / (0,597 \cdot 2,3) = 8,29$

$T_i (T_n) = 2,3 \cdot T_u = 2,3 \cdot 2,3 = 5,29 \text{ s}$

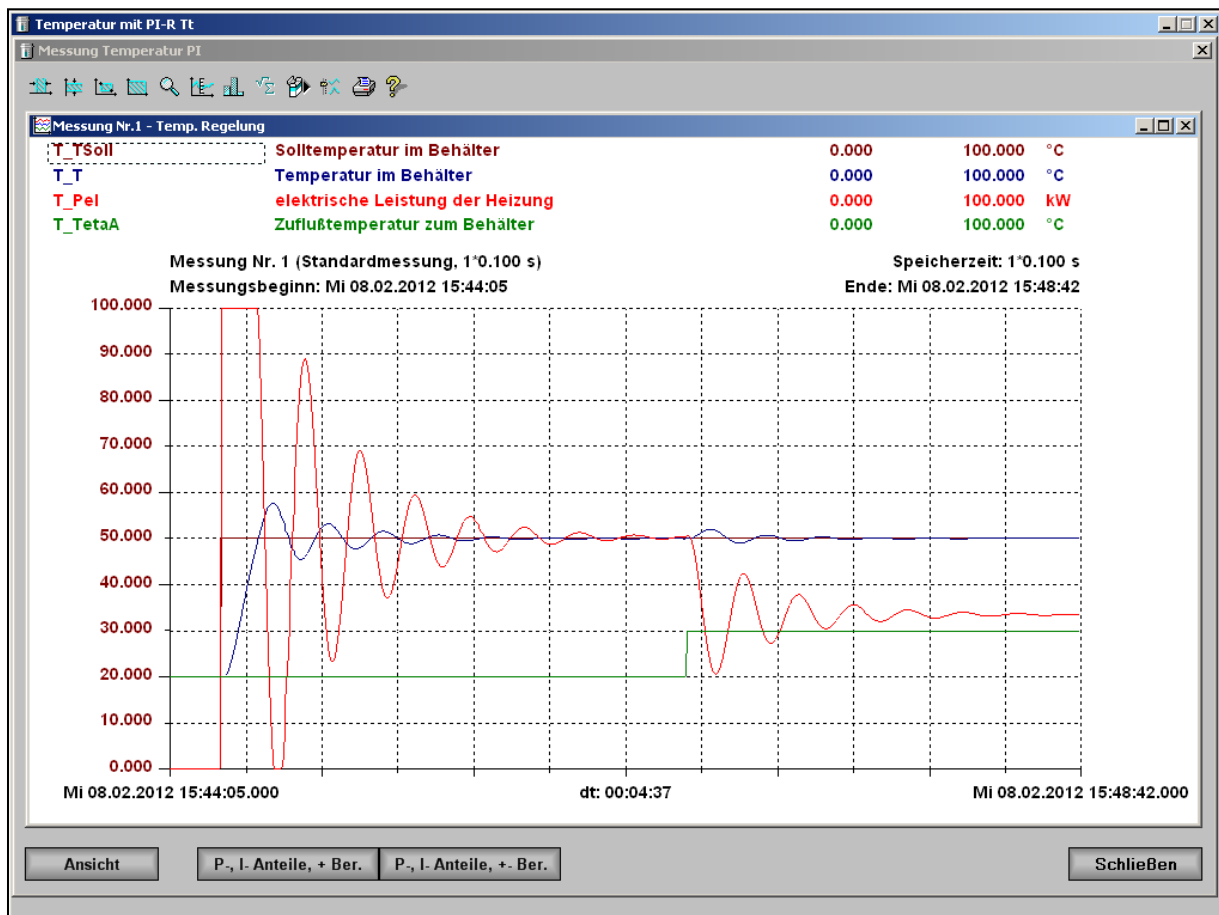


Abbildung 6-20 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Störverhalten mit Überspringen

In Abbildung 6-20 wurde ein Führungssprung von 0°C auf 50°C vorgegeben sowie eine Störung der Zuflusstemperatur von 20°C auf 30°C.

Der Führungsverhalten wird mit diesen Parametern nicht gut ausgeregelt. Das Ausregeln der Störung ist in Ordnung.

Besteht die Aufgabe Störungen und Sollwertänderungen auszuregeln, so sind diese Parameter nicht unbedingt geeignet.

Soll der Regelkreis mit dem PID-Regler geregelt werden, ergeben sich als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überspringen folgende Reglerparameter:

$$\text{PID: } K_p = 0,6 \cdot T_g / (K_s \cdot T_u) = 0,6 \cdot 16,27 / (0,597 \cdot 2,3) = 7,11$$

$$T_i (T_n) = T_g = 16,27$$

$$T_d (T_v) = 0,5 \cdot T_u = 1,15s$$

Wie in Abbildung 6-21 zu sehen ist, reagiert der PID-Regler verhältnismäßig schnell auf eine Sollwertänderung sowie auf eine Störwertänderung. Allerdings schwingt das System über beim Führungssprung.

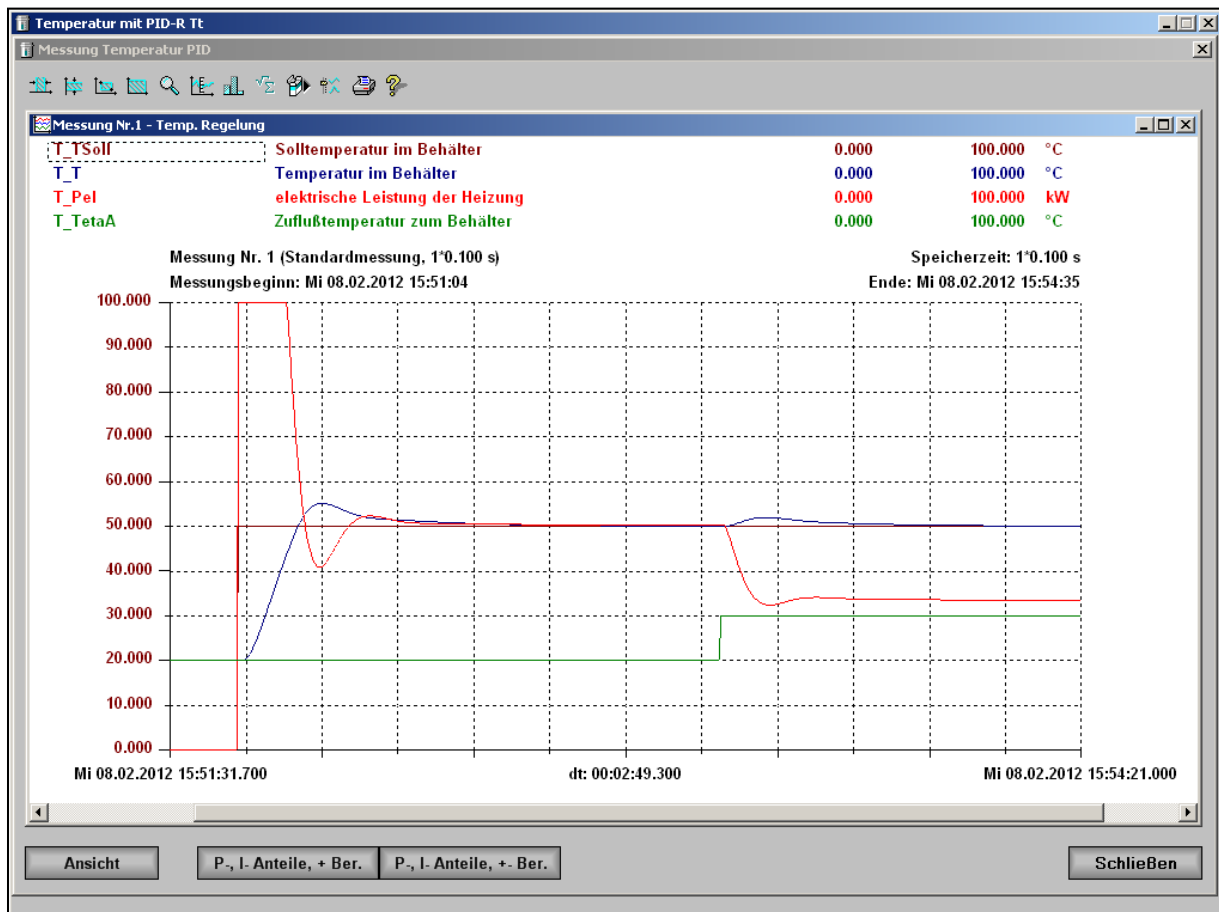


Abbildung 6-21 PID-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungs- und Störsprung

6.8 REGLEREINSTELLVERFAHREN FÜR DIE TEMPERATURREGELUNG MIT VERZÖGERUNG NACH ZIEGLER UND NICHOLS

Hier wird das Reglereinstellverfahren von Ziegler und Nichols nach der Methode des Stabilitätsrandes für die Temperaturregelung mit Verzögerung untersucht.

Bei dieser Methode untersucht man im Gegensatz zu den anderen Verfahren den geschlossenen Regelkreis mit dem P-Regler.

Vorgehensweise:

- Untersuchen des Regelkreises mit dem P-Regler
- Verstärkung des P-Reglers solange erhöhen, bis der geschlossene Regelkreis eine Dauerschwingung durchführt
- Verstärkungswert K_{krit} merken und Periodendauer T_{krit} (kritische Periodendauer) der Dauerschwingung ausmessen

Anhand von K_{krit} und T_{krit} werden die Parameter der Regler entsprechend der angegebenen Tabelle berechnet.

Tabelle 4 Reglerparameter nach Ziegler und Nichols

Reglertyp	Verstärkung	Nachstellzeit	Vorhaltezeit
P-Regler	$0,5 * K_{krit}$		
PI-Regler	$0,45 * K_{krit}$	$0,85 * T_{krit}$	
PID-Regler	$0,6 * K_{krit}$	$0,5 * T_{krit}$	$0,125 * T_{krit}$

Die oben beschriebene Methode kann natürlich nicht bei jedem Regelkreis durchgeführt werden. Eine Dauerschwingung an der Stabilitätsgrenze kann nur dort durchgeführt werden, wo das Schwingen des realen Systems keine Folgen für den Prozess hat. So kann z.B. das Schwingen der Temperatur in einem Bioreaktor zum Absterben der Lebewesen führen. Den Autopiloten eines Passagierflugzeugs zum Schwingen zu bringen, ist sicherlich auch nicht sinnvoll.

Zum Anwenden dieser Methode wählen Sie bei der Temperaturregelung den Punkt „Regelung mit P-Regler“. Geben Sie einen Sollwertsprung vor und erhöhen Sie dann die Verstärkung des P-Reglers solange bis der Regelkreis eine Dauerschwingung durchführt.

Bei einer Verstärkung K_{krit} von ungefähr 27 führte der Regelkreis die Dauerschwingung durch. Die kritische Periodendauer lässt sich aus den aufgezeichneten Kurvenverläufen bestimmen.

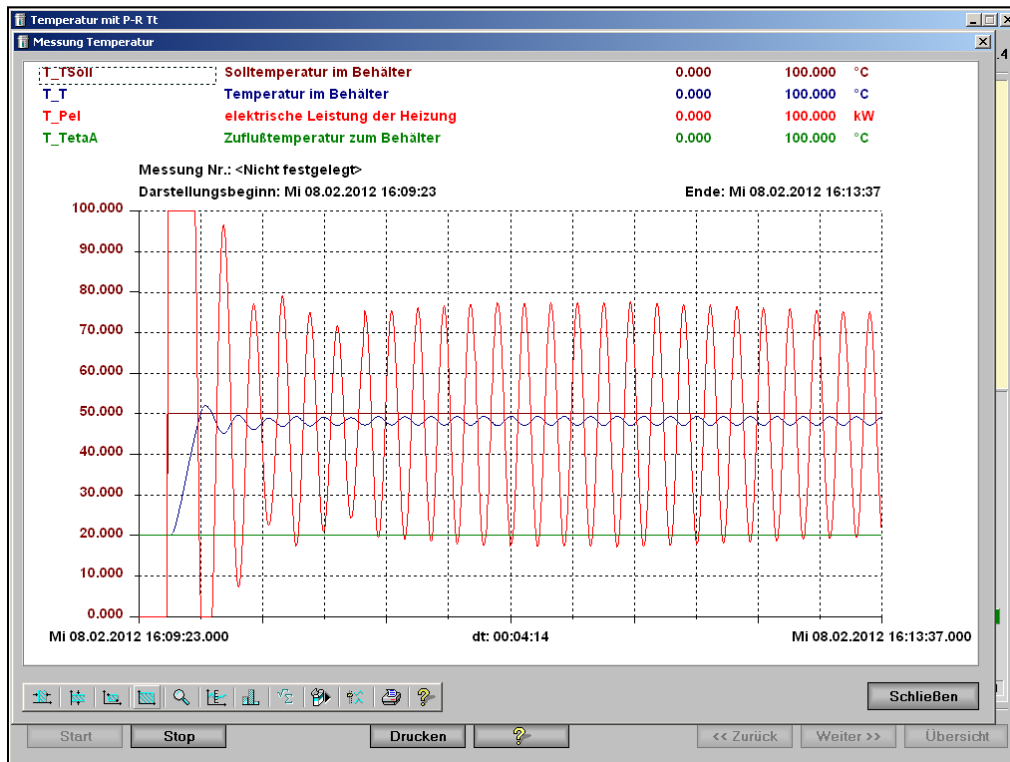


Abbildung 6-22 Regelkreis mit P-Regler, Sollwertsprung auf 50°C, Dauerschwingung bei der kritischen Reglerverstärkung von 27

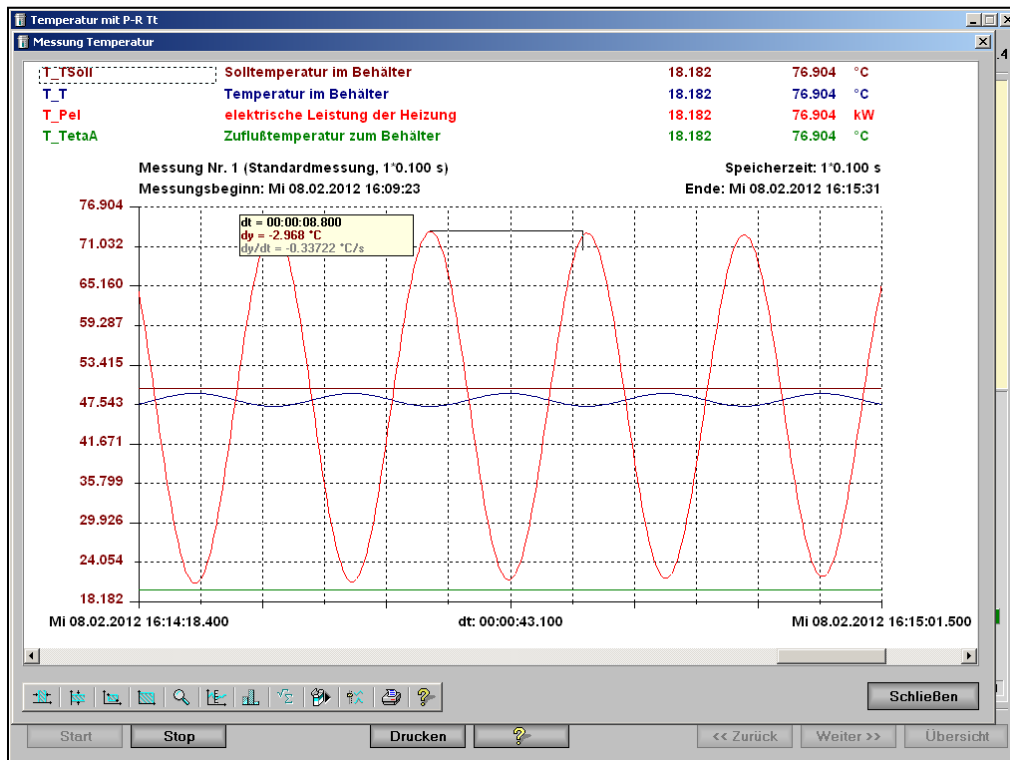


Abbildung 6-23 Bestimmen der kritischen Periodendauer

Damit lassen sich K_{krit} und T_{krit} bestimmen: $K_{krit} = 27,2$ und $T_{krit} = 9,1s$

Aus der Tabelle ergibt sich für den PI-Regler:

$$K_s = 0,45 * K_{krit} = 0,45 * 27,2 = 12,24$$

$$T_i (T_n) = 0,85 * T_{krit} = 0,85 * 9,1 = 7,735s$$

Für den PID-Regler ergibt sich:

$$K_s = 0,6 * K_{krit} = 0,6 * 27,2 = 16,32$$

$$T_i (T_n) = 0,5 * T_{krit} = 0,5 * 9,1 = 4,55s$$

$$T_d (T_v) = 0,125 * T_{krit} = 0,125 * 9,1 = 1,092s$$

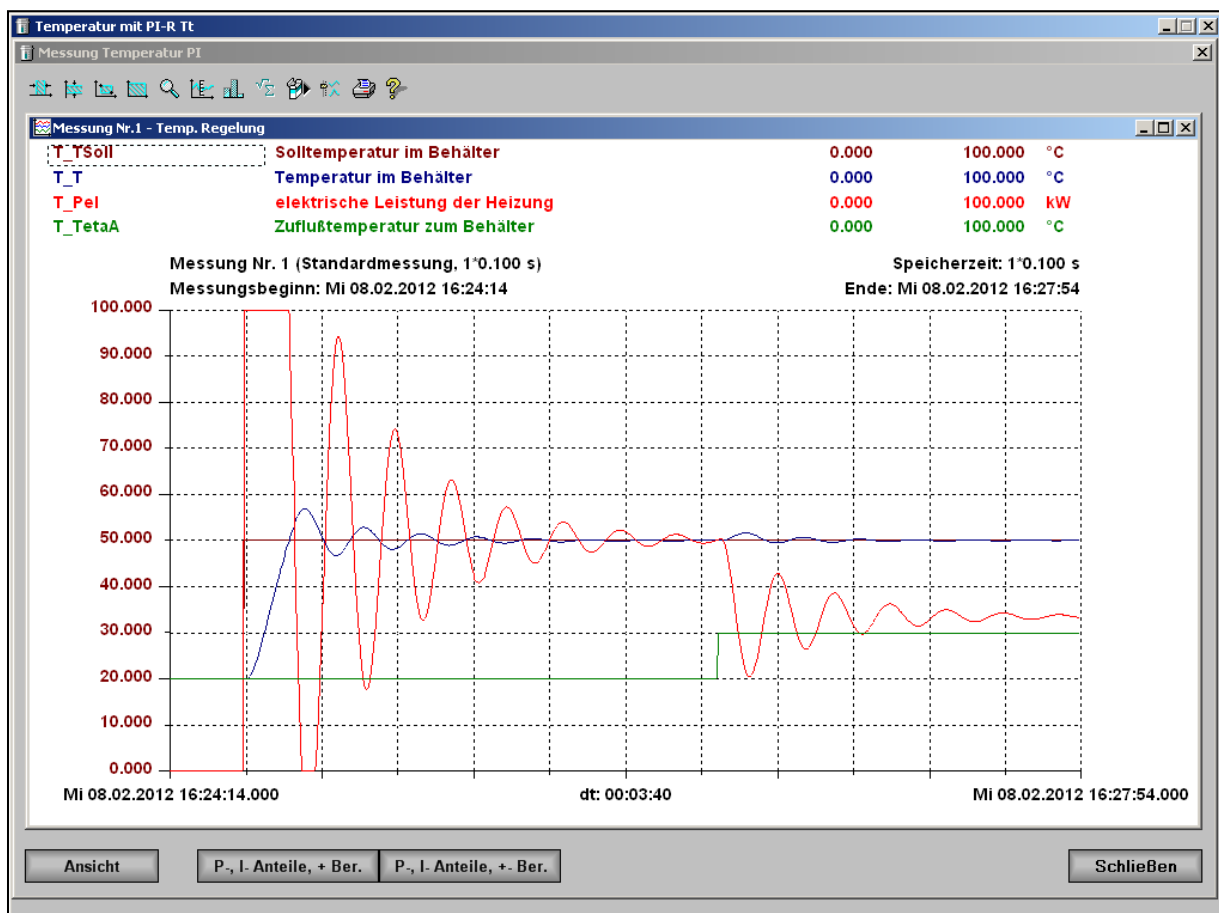


Abbildung 6-24 Führungs- und Störverhalten mit PI-Regler: $K_s = 12,24$, $T_i (T_n) = 7,735$

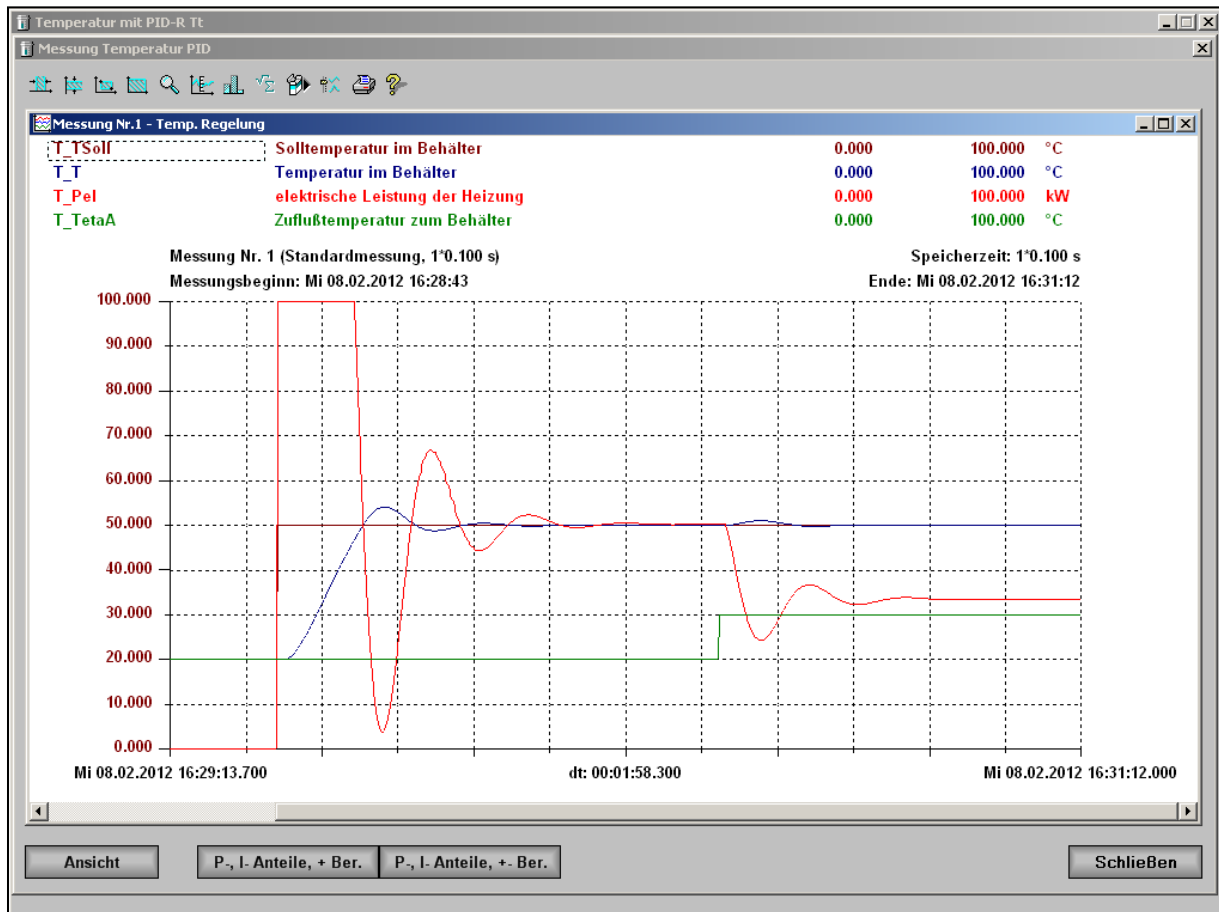


Abbildung 6-25 Führungs- und Störverhalten: PID-Regler mit $K_s = 16,32$, $T_i (T_n) = 4,55$, $T_d (T_v) = 1,1$

Wie die Versuche zeigen, ist das Einschwingen auf den Führungsprung mit den Parametern von Ziegler und Nichols schlechter als das Einschwingen mit den Parametern von Chien/Hrones/Reswick.

6.9 REGLEREINSTELLVERFAHREN FÜR DIE RÜHRKESSELKASKADE NACH CHIEN/HRONES/RESWICK

Der Anlagenaufbau besteht aus drei Rührkesseln, die je einen Zufluss und einen Abfluss besitzen. Dabei ist der Abfluss des ersten Kessels mit dem Zufluss des zweiten, der Abfluss des zweiten Kessels mit dem Zufluss des dritten verbunden.

In diesem Simulationsbeispiel wird eine Salzlösung mit Wasser gemischt. Dem ersten Kessel fließt eine Mischung aus einem Wasserstrom und einem Salzlösungsstrom zu. Die Durchflussmengen dieser Ströme können über Ventile getrennt voneinander variiert werden. Die regelungstechnische Aufgabe besteht darin, die Salzkonzentration des dritten Kessels so zu regeln, dass diese einem vorgegebenen Sollwert entspricht. Dabei wird die Durchflussmenge des Salzlösungsstroms als Stellgröße angesehen, die Salzkonzentration der aus dem dritten Kessel fließenden Flüssigkeit ist die Regelgröße des Systems. Schwankungen in der Durchflussmenge des zufließenden Wasserstroms sowie Änderungen der Salzkonzentration der Salzlösung stellen Störgrößen dar.

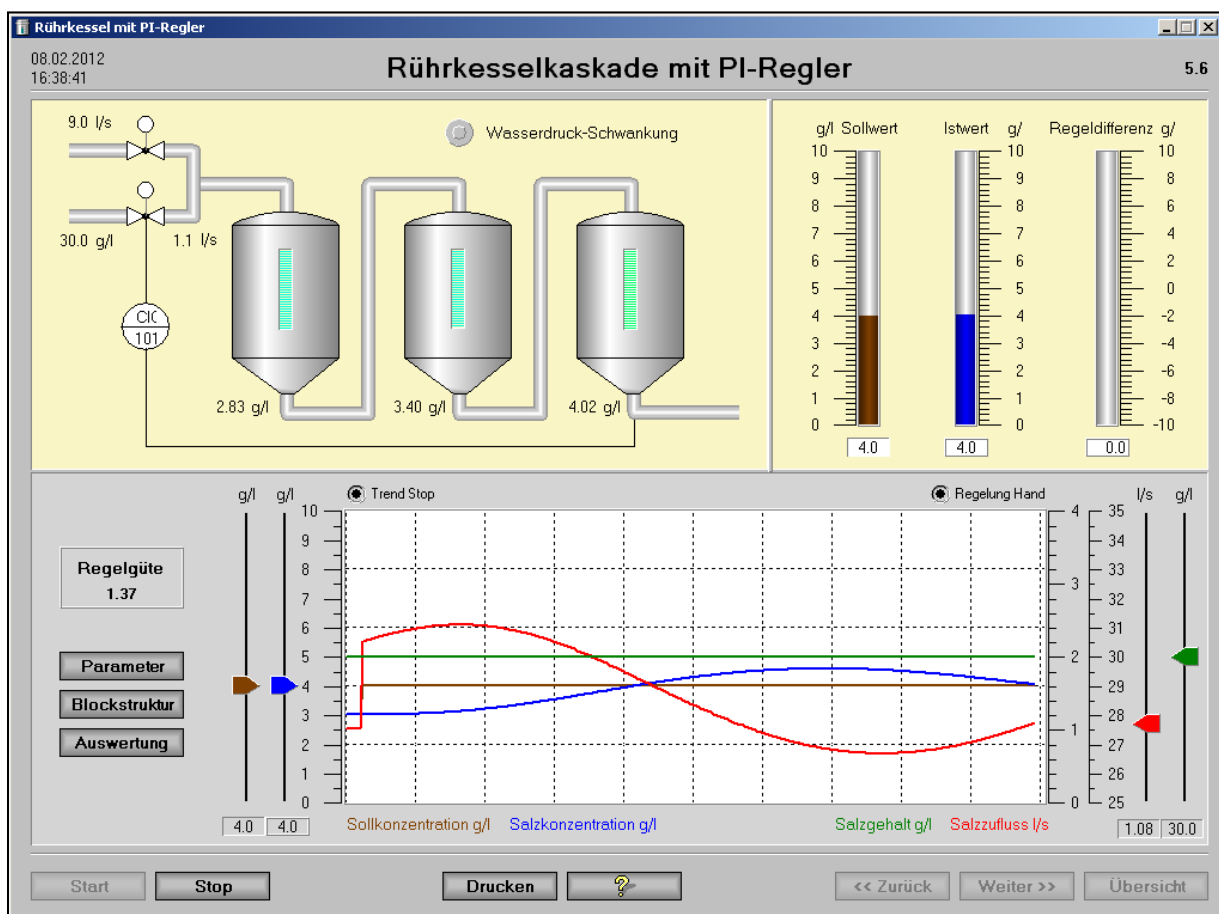


Abbildung 6-26 Führungsverhalten mit PI-Regler bei der Rührkesselkaskade

Für das Reglereinstellverfahren nach Chien/Hrones/Reswick wählen Sie bei der Rührkesselkaskade den Punkt „Strecke untersuchen“.

Geben Sie einen Sprung des Salzzuflusses von 1 l/s auf 2 l/s vor.

Wählen Sie „Auswertung“ und bestimmen Sie die Parameter K_s , T_u und T_g aus den gespeicherten Signalverläufen.

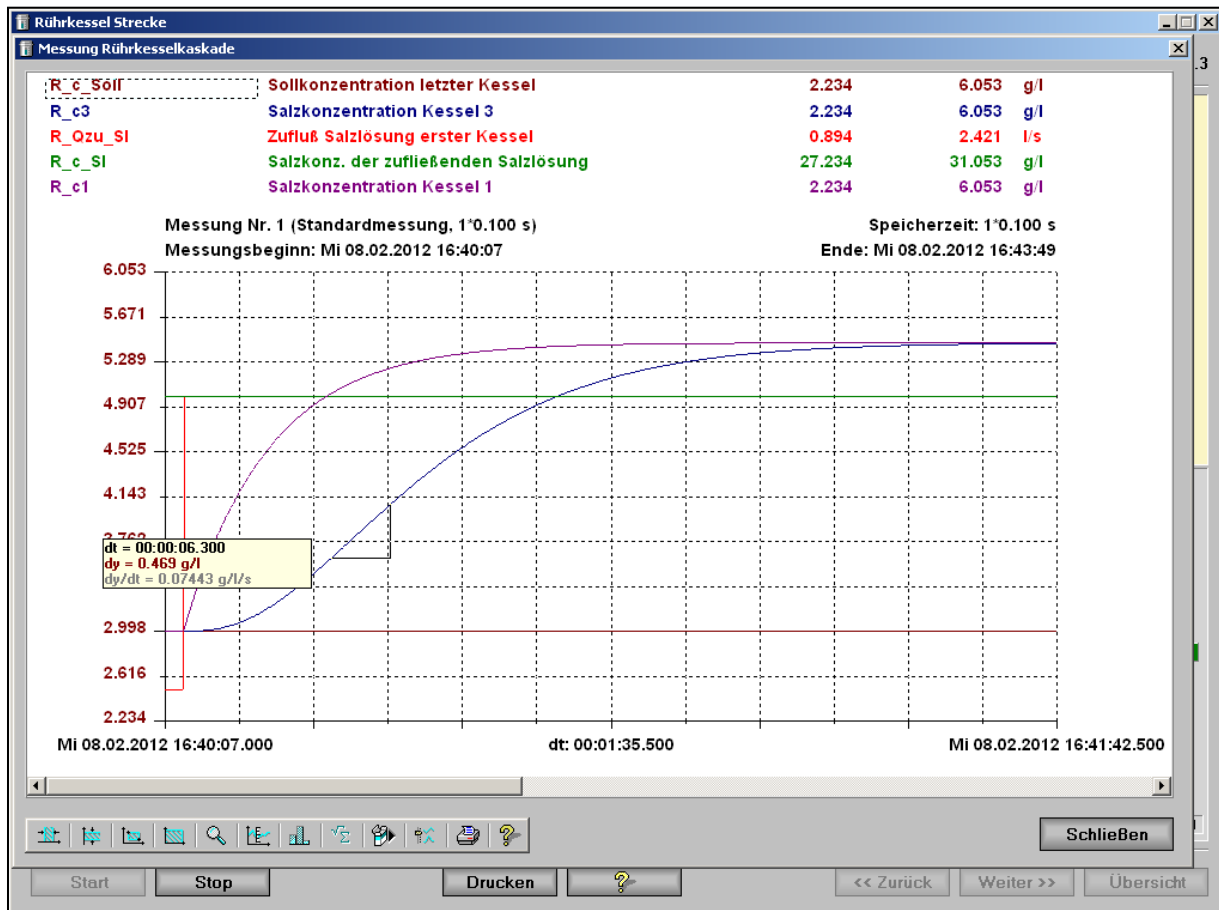


Abbildung 6-27 Sprungantwort auf einen Stellwertsprung des Salzzuflusses von 1 l/s auf 2 l/s

Aus dem Kurvenverlauf lässt sich ungefähr die Steigung der Tangente bestimmen $dx/dt = 0,074$ g/l/s.

Bei der sprunghaftigen Änderung des Salzzuflusses von 1 l/s auf 2 l/s schwingt der Istwert der Salzkonzentration von 3g/l auf 5,45g/l.

Damit lässt sich die Ausgleichszeit T_g berechnen (T = Isttemperatur):

$$dx/dt = (\text{Endwert(g/l)} - \text{Anfangswert(g/l)}) / T_g, \text{ also}$$

$$T_g = (5,45\text{g/l} - 3\text{g/l}) / 0,074\text{g/l/s} = 33,1\text{s}$$

Ks ergibt sich aus:

$$K_s = (\text{Endwert(g/l)} - \text{Anfangswert(g/l)}) / \text{Sprunghöhe(l/s)}$$

$$= (5,45\text{g/l} - 3\text{g/l}) / 1\text{l/s} = 2,45$$

Die Verzugszeit T_u lässt sich ausmessen und ist ungefähr 7,5s.

Also: $T_u = 7,5\text{s}$, $T_g = 33,1\text{s}$, $K_s = 2,45$

Damit ergeben sich aus der Tabelle für den PI-Regler folgende Reglerparameter beim Führungsverhalten mit ca. 20% Überspringen:

$$\text{PI: } K_p = 0,6 * T_g / (K_s * T_u) = 0,6 * 33,1 / (2,45 * 7,5) = 1,1$$

$$T_i (T_n) = T_g = 33,1\text{s}$$



Abbildung 6-28 Führungsverhalten PI-Regler: Sprung von 3g/l auf 5g/l mit $K = 1,1$ und $T_i (T_n) = 33,1\text{s}$

Nach ca. 3,3 Minuten schwingt der Regelkreis mit mehreren Überschwingern auf den gewünschten Sollwert ein.

Als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überschwingen ergeben sich folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,35 * T_g / (K_s * T_u) = 0,35 * 33,1 / (2,45 * 7,5) = 0,622$$

$$T_i (T_n) = 1,2 * T_g = 1,2 * 33,1 = 39,72s$$

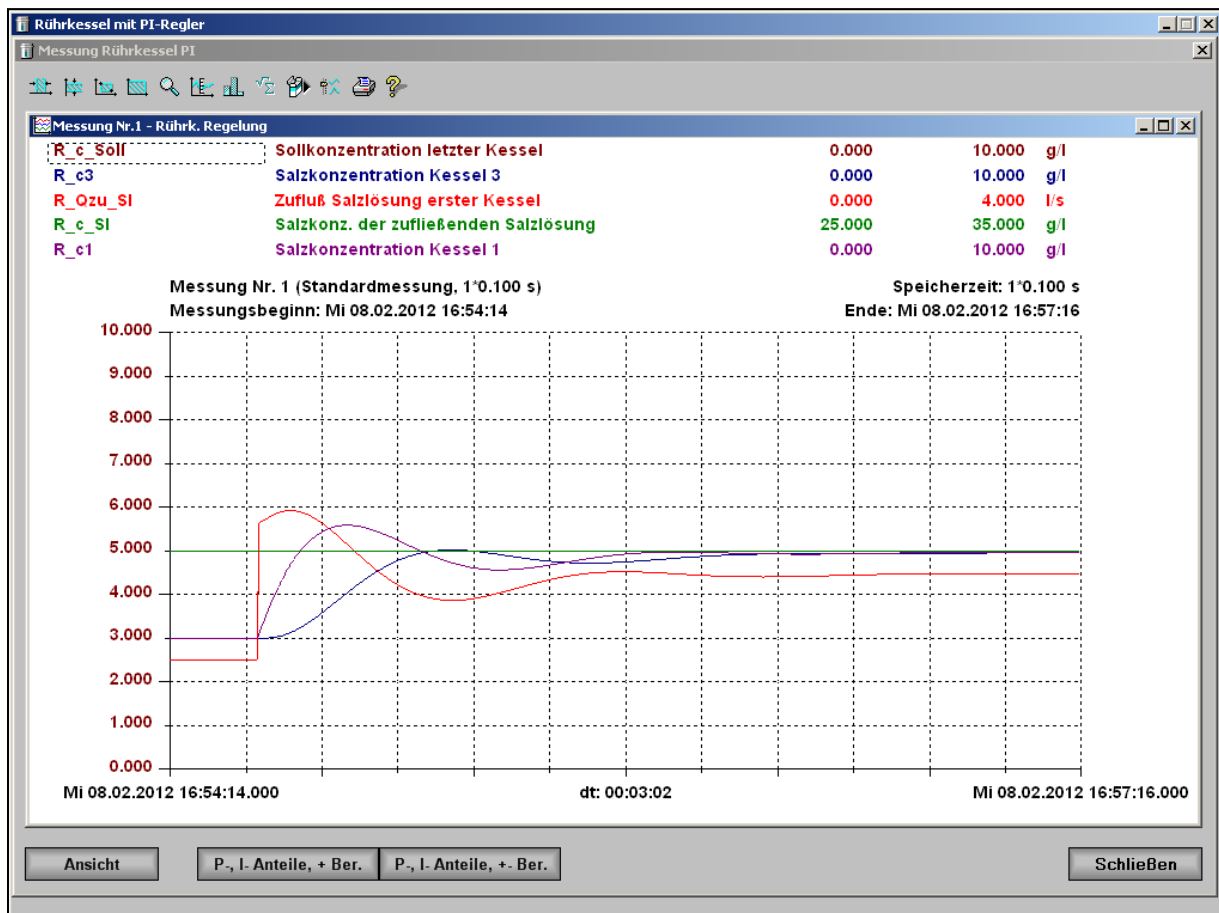


Abbildung 6-29 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungssprung ohne Überschwingen

Mit kleinen Schwingern schwingt der Regelkreis nach ca. 3 Minuten auf den neuen Sollwert ein.

Für das Störverhalten mit 20% Überschwingen ergeben sich folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,7 * T_g / (K_s * T_u) = 0,7 * 33,1 / (2,45 * 7,5) = 1,26$$

$$T_i (T_n) = 2,3 * T_u = 2,3 * 7,5 = 17,25 \text{ s}$$

Für das Störverhalten ohne Überschwingen ergeben sich folgende Reglerparameter:

$$PI: \quad K_p = 0,6 * T_g / (K_s * T_u) = 0,6 * 33,1 / (2,45 * 7,5) = 1,08$$

$$T_i (T_n) = 4 * T_u = 4 * 7,5 = 30 \text{ s}$$

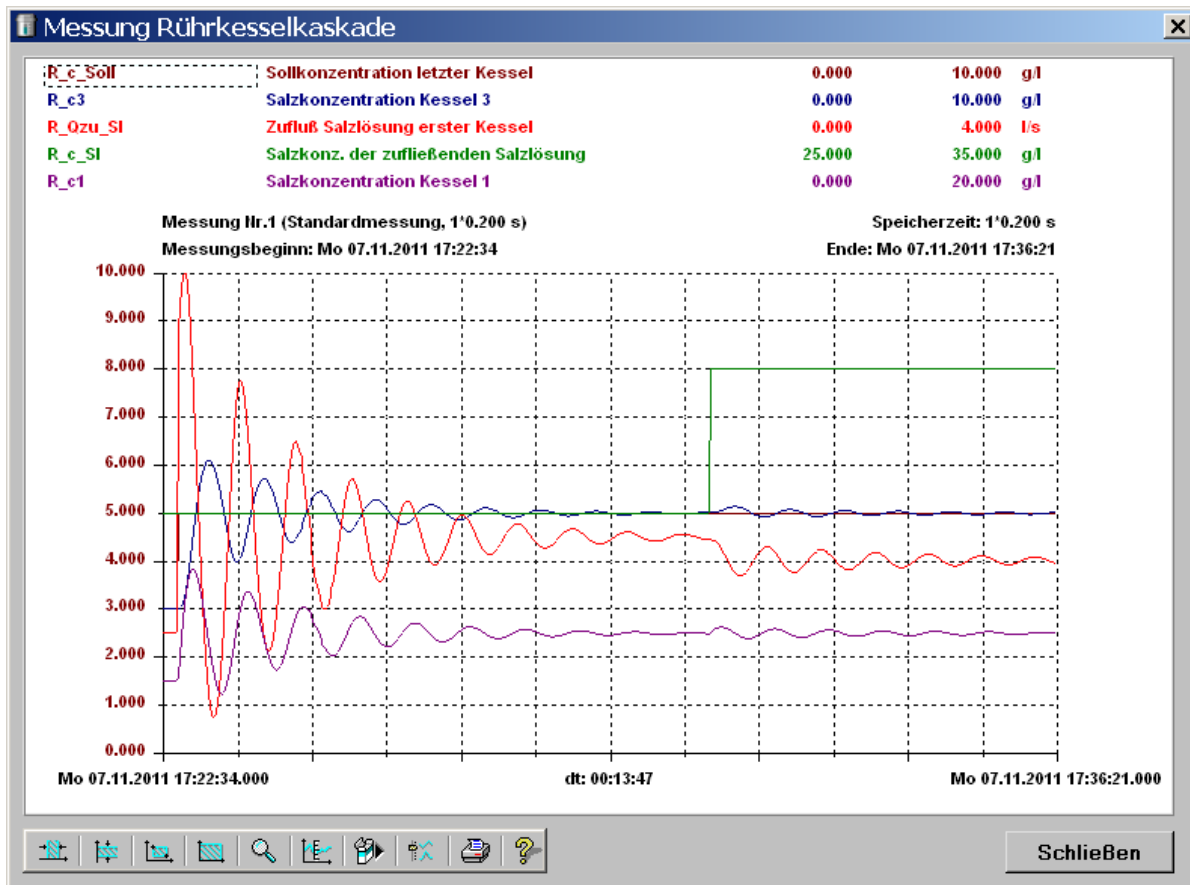


Abbildung 6-30 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Störverhalten mit Überschwingen

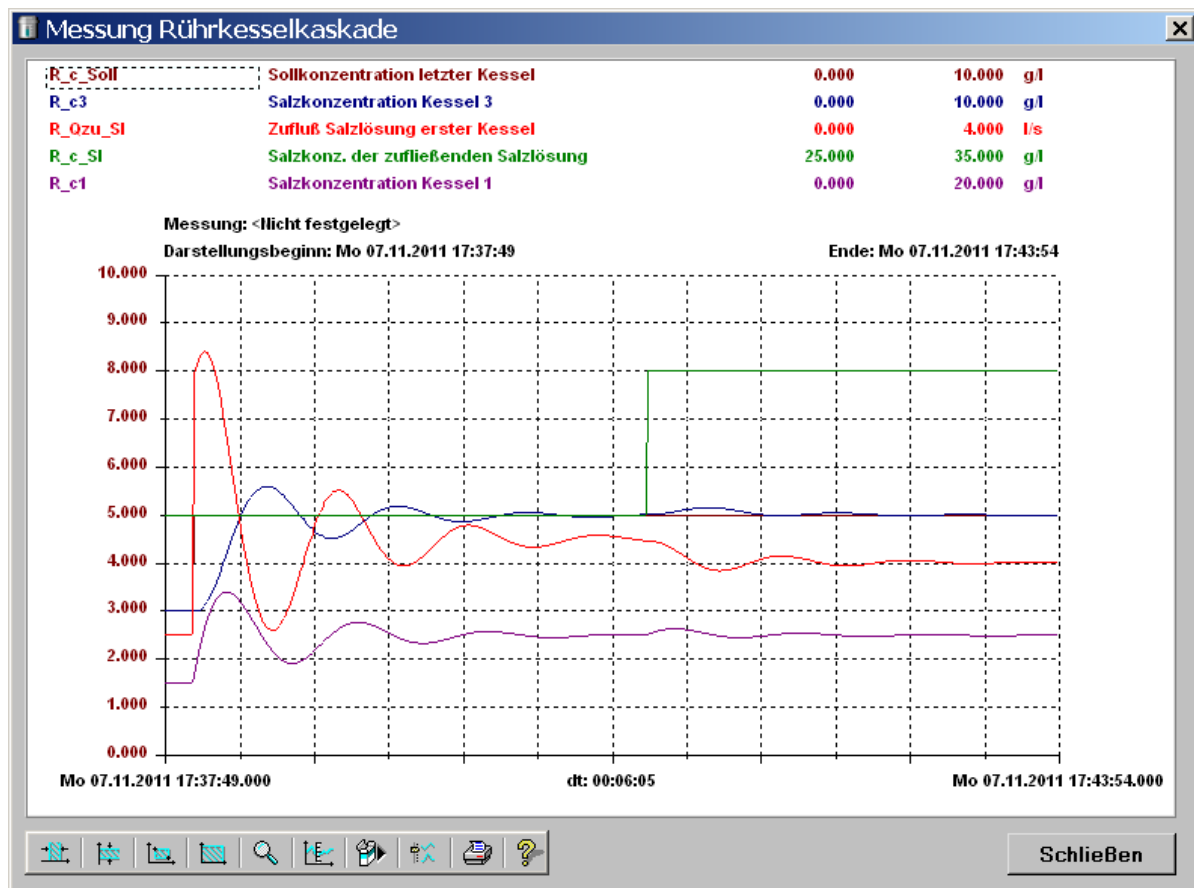


Abbildung 6-31 PI-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Störverhalten, aperiodisches Verhalten

Im obigen Bild wurde ein Führungssprung von 3g/l auf 5g/l vorgegeben sowie eine Störung des Salzgehaltes von 3g/l auf 3,3g/l.

Mit den Parametern für das Störverhalten mit Überschwingen wird das Führungsverhalten sehr schlecht ausgeregelt. Das Ausregeln der Störung ist in Ordnung.

Mit den Parametern für das Störverhalten mit dem aperiodischen Verhalten ist das Führungsverhalten und das Störverhalten in Ordnung

Besteht die Aufgabe Störungen und Sollwertänderungen auszuregeln, so sollte man die Parameter für das aperiodische Störverhalten wählen.

Soll der Regelkreis mit dem PID-Regler geregelt werden, ergeben sich als Reglerparameter für das Führungsverhalten ohne Überschwinger folgende Reglerparameter:

$$\text{PID: } K_p = 0,6 * T_g / (K_s * T_u) = 0,6 * 33,1 / (2,45 * 7,5) = 1.08$$

$$T_i (T_n) = T_g = 33,1s$$

$$T_d (T_v) = 0,5 * 7,5 = 3,75s$$

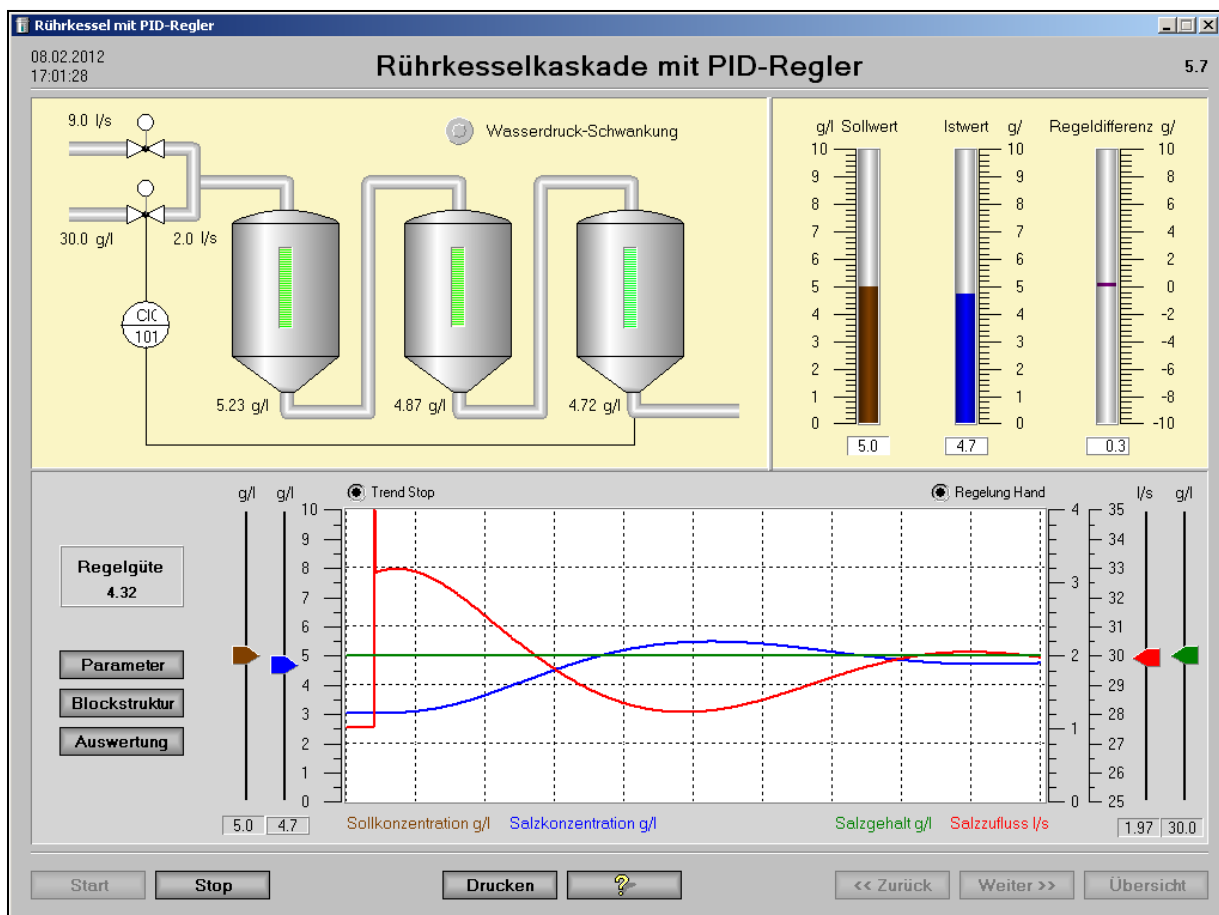


Abbildung 6-32 Rührkesselkaskade mit PID-Regler und Parametern nach Chien/Hrones/Reswick

Wie im unteren Bild zu sehen ist, reagiert der PID-Regler verhältnismäßig schnell auf eine Sollwertänderung sowie auf eine Störwertänderung.

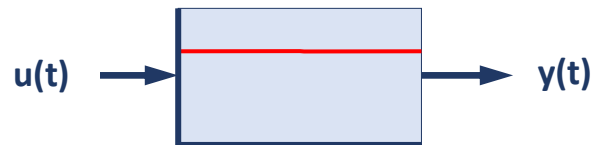


Abbildung 33 PID-Regler nach Chien/Hrones/Reswick für Führungs- und Störsprung

Mit den oben eingestellten Parametern (Führungsverhalten mit 20% Überschwingen) ist das Einschwingverhalten des Regelkreises für das Führungs- wie für das Störverhalten in Ordnung.

7 ANHANG: BLOCKSTRUKTURELEMENTE

7.1 P-BLOCK:



Der P-Block ist ein Verstärker. Das Eingangssignal $u(t)$ wird mit der Verstärkung K multipliziert und auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet.

GLEICHUNG: $y(t) = K \cdot u(t)$

$$G(s) = K$$

7.2 I-BLOCK:

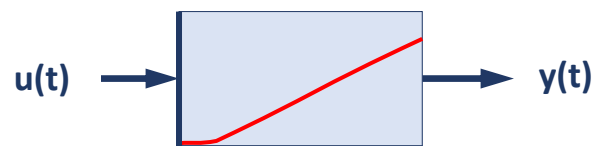


Der I-Block ist ein Integrator. Das Eingangssignal $u(t)$ wird über die Zeit integriert und auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Integrationszeitkonstante T_I gibt die Schnelligkeit der Integration an. Große T_I bewirken ein langsames Aufintegrieren.

GLEICHUNG: $y(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t u(\tau) \cdot d\tau$

$$G(s) = \frac{1}{T_I s}$$

7.3 IT1-BLOCK:

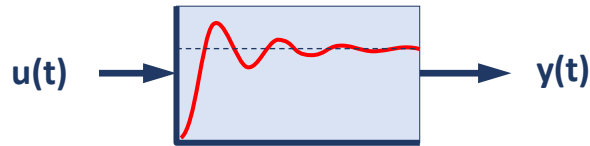


Der IT1-Block ist ein verzögerter Integrator. Das Eingangssignal $u(t)$ wird verzögert über die Zeit integriert und auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstante T_1 gibt den Verzögerungsfaktor, die Integrationszeitkonstante T_I gibt die Schnelligkeit der Integration an. Große T_I bewirken ein langsames Aufintegrieren.

GLEICHUNG: $T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t u(\tau) \cdot d\tau$

$$G(s) = \frac{1}{T_I s \cdot (T_1 s + 1)}$$

7.4 PT2-BLOCK (SCHWINGUNG):



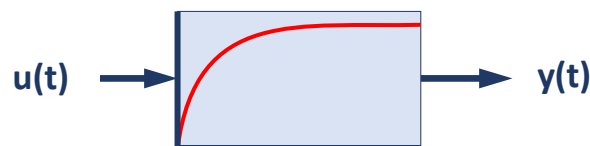
Die PT2-Schwingung hat ein schwingungsfähiges Übertragungsverhalten. Das Schwingungsverhalten ist abhängig von den einstellbaren Parametern, der Dämpfung D , der Eigenfrequenz ω und der Verstärkung K . Abhängig von der Dämpfung D schwingt das Ausgangssignal $y(t)$ bei einer sprungförmigen Änderung des Eingangssignals $u(t)$ nach einer gewissen Zeitdauer auf den Wert $K \cdot u$ ein. Bei der Dämpfung $D = 0$ erhält man eine Dauerschwingung, das heißt, das System schwingt mit einer Sinus-Schwingung um den Wert $K \cdot u$. Liegt die Dämpfung D zwischen 0 und 1, also $0 < D < 1$, so erreicht das System mit eventuell mehrfachem Überschwingen den Endwert. Gilt $D \geq 1$ so geht das System ohne Überschwingen nach einer gewissen Zeitdauer auf den Endwert. ω gibt die Frequenz an, mit der das System schwingt und K den Verstärkungsfaktor, der den neuen Endwert bestimmt.

GLEICHUNG:

$$\frac{1}{\omega^2} \cdot \ddot{y}(t) + \frac{2D}{\omega} \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t)$$

$$G(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega^2} s^2 + \frac{2D}{\omega} s + 1} = \frac{K \cdot \omega^2}{s^2 + 2D\omega s + \omega^2}$$

7.5 PT1-BLOCK:



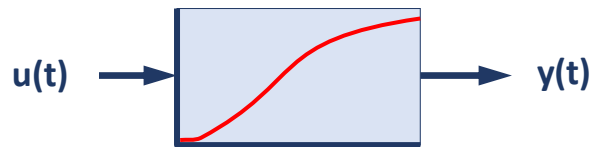
Der PT1-Block ist ein Verzögerungsblock. Das Eingangssignal $u(t)$ wird mit einer umgekehrten e-Funktion zeitverzögert und mit der Verstärkung K multipliziert auf das Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstante T_1 gibt den Verzögerungsfaktor, K die Verstärkung an. Ein großes T_1 bewirkt eine große Verzögerung, das bedeutet, dass bei einer Änderung des Eingangswertes $u(t)$ das Ausgangssignal $y(t)$ seinen neuen Endwert erst nach einer langen Zeitdauer annimmt. Ein PT1-Block kann auch wie ein Tiefpassfilter zur Glättung von Signalen eingesetzt werden.

GLEICHUNG:

$$T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t)$$

$$G(s) = \frac{K}{T_1 s + 1}$$

7.6 PT2-BLOCK:



Der PT2-Block ist ebenfalls ein Verzögerungsblock. Er wirkt, wie zwei hintereinander geschaltete PT1-Blöcke. Das Eingangssignal $u(t)$ wird zeitverzögert und mit der Verstärkung K multipliziert auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstanten T_1 und T_2 sind die zwei Zeitkonstanten der beiden hintereinander geschalteten PT1-Blöcke. K gibt die Verstärkung des PT2-Blocks an.

GLEICHUNG:

$$T_2 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = x_1(t) \quad T_1 \cdot \dot{x}_1(t) + x_1(t) = K \cdot u(t) \quad G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}$$

7.7 PT3-BLOCK:



Der PT3-Block ist ebenfalls ein Verzögerungsblock. Er wirkt, wie drei hintereinander geschaltete PT1-Blöcke. Das Eingangssignal $u(t)$ wird zeitverzögert und mit der Verstärkung K multipliziert auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstanten T_1 , T_2 und T_3 sind die drei Zeitkonstanten der drei hintereinander geschalteten PT1-Blöcke. K gibt die Gesamtverstärkung des PT3-Blocks an.

GLEICHUNG:

$$T_3 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = x_2(t) \quad T_2 \cdot \dot{x}_2(t) + x_2(t) = x_1(t) \quad T_1 \cdot \dot{x}_1(t) + x_1(t) = K \cdot u(t)$$

$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) \cdot (T_3 s + 1)}$$

7.8 PT4-BLOCK:



Der PT4-Block ist ebenfalls ein Verzögerungsblock. Er wirkt, wie vier hintereinander geschaltete PT1-Blöcke. Das Eingangssignal $u(t)$ wird zeitverzögert und mit der Verstärkung K multipliziert auf das Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstanten T_1 , T_2 , T_3 und T_4 sind die vier Zeitkonstanten der vier hintereinander geschalteten PT1-Blöcke. K gibt die Gesamtverstärkung des PT4-Blocks an.

GLEICHUNG:

$$\begin{aligned} T_1 \cdot \dot{x}_1(t) + x_1(t) &= K \cdot u(t) \\ T_2 \cdot \dot{x}_2(t) + x_2(t) &= x_1(t) \\ T_3 \cdot \dot{x}_3(t) + x_3(t) &= x_2(t) \\ T_4 \cdot \dot{y}(t) + y(t) &= x_3(t) \end{aligned} \quad G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) \cdot (T_3 s + 1) \cdot (T_4 s + 1)}$$

7.9 PT5-BLOCK:

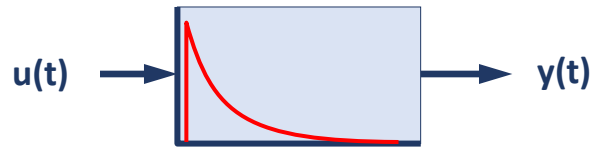


Der PT5-Block ist ebenfalls ein Verzögerungsblock. Er wirkt, wie fünf hintereinander geschaltete PT1-Blöcke. Das Eingangssignal $u(t)$ wird zeitverzögert und mit der Verstärkung K multipliziert auf das Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstanten T_1 , T_2 , T_3 , T_4 und T_5 sind die fünf Zeitkonstanten der fünf hintereinander geschalteten PT1-Blöcke. K gibt die Gesamtverstärkung des PT5-Blocks an.

GLEICHUNG:

$$\begin{aligned} T_1 \cdot \dot{x}_1(t) + x_1(t) &= K \cdot u(t) \\ T_2 \cdot \dot{x}_2(t) + x_2(t) &= x_1(t) \\ T_3 \cdot \dot{x}_3(t) + x_3(t) &= x_2(t) \\ T_4 \cdot \dot{x}_4(t) + x_4(t) &= x_3(t) \\ T_5 \cdot \dot{y}(t) + y(t) &= x_4(t) \end{aligned} \quad G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) \cdot (T_3 s + 1) \cdot (T_4 s + 1) \cdot (T_5 s + 1)}$$

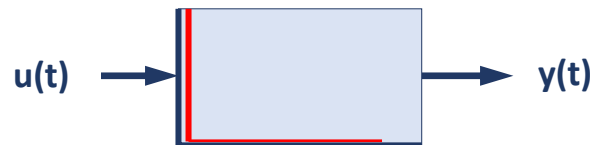
7.10 DT1-BLOCK:



Der DT1-Block ist ein Differenzierer mit Verzögerung. Das Eingangssignal $u(t)$ wird differenziert und verzögert auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstante T_D gibt die Verstärkung der Differentiation und die Zeitkonstante T_1 gibt die Verzögerung an. Bei einer sprungförmigen Änderung des Eingangssignals $u(t)$ von 0 springt das Ausgangssignal $y(t)$ auf den Wert $T_D \cdot \dot{u}(t) / T_1$ und fällt dann langsam mit einer umgekehrten e-Funktion wieder auf 0 ab.

GLEICHUNG: $T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = T_D \cdot \dot{u}(t)$ $G(s) = \frac{T_D s}{T_1 s + 1}$

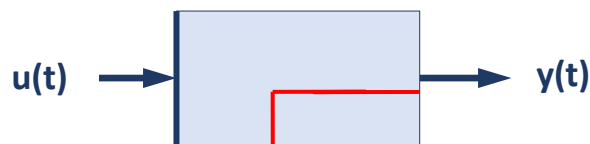
7.11 D-BLOCK:



Der D-Block ist ein Differenzierer ohne Verzögerung. Das Eingangssignal $u(t)$ wird differenziert und auf den Ausgang $y(t)$ geschaltet. Die Zeitkonstante T_D gibt die Verstärkung der Differentiation an.

GLEICHUNG: $y(t) = \frac{u(t_1) - u(t_0)}{\Delta t}$ $G(s) = T_D s$

7.12 T_T-BLOCK / TOTZEIT-BLOCK:



Der Totzeit-Block gibt das Eingangssignal $u(t)$ um die Totzeit T_T verzögert auf das Ausgangssignal $y(t)$ aus.

GLEICHUNG: $y(t) = u(t - T_T)$ $G(s) = e^{-sT_T}$

Haben Sie Fragen und Anmerkungen oder wünschen Sie Informationen über unsere weiteren Praktika oder über das Prozessleit- und Simulationssystem WinErs wenden Sie sich bitte an:

Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schoop GmbH

Riechelmannweg 4

D-21109 Hamburg

Tel.: 040 / 754 922 30

Fax.: 040 / 754 922 32

www.schoop.de

Mail: info@schoop.de