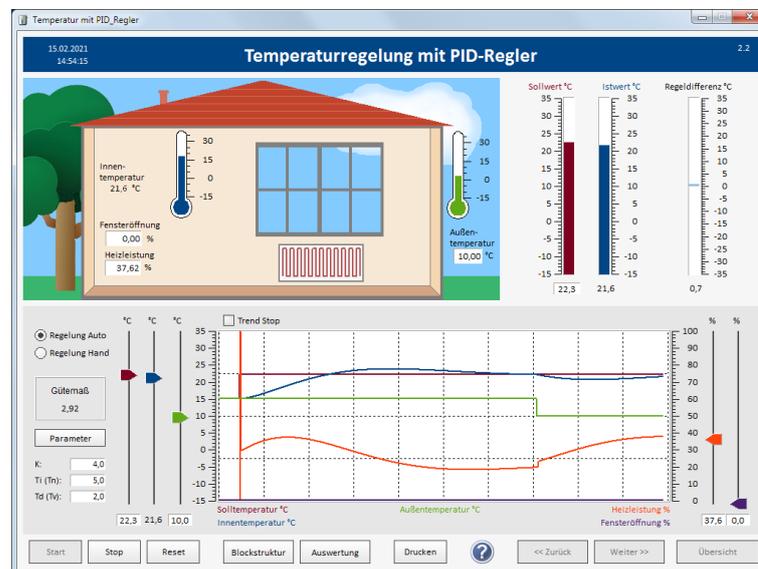
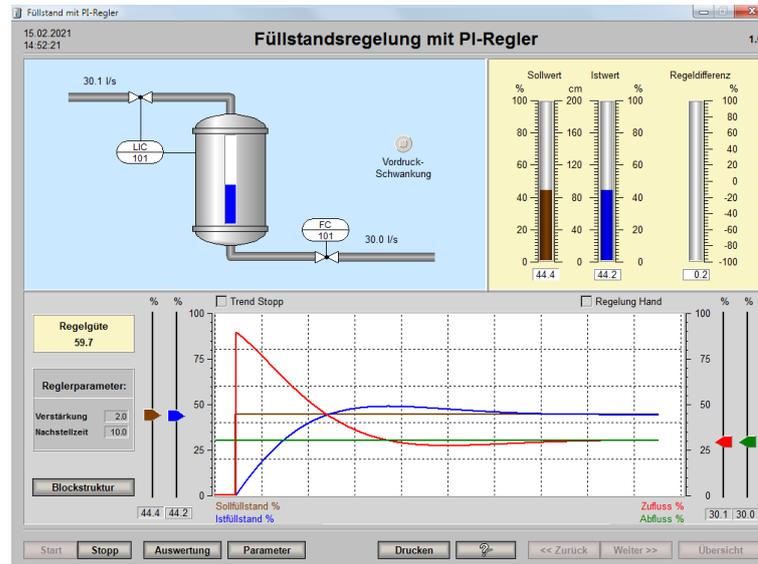


Aufgaben und Lösungen

Regelungstechnische Praktika I / II



Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schoop GmbH
 Riechelmannweg 4
 21109 Hamburg
 Tel.: +49 40 / 75 49 22 30
 Fax: +49 40 / 75 49 22 32
 Email: info@schoop.de
www.schoop.de

Stand: 2023-11

Inhalt

1	Einführung Regelungstechnische Praktika _____	6
2	Reglerverhalten, Regelungstechnisches Praktikum I/II _____	7
2.1	P-Regler _____	7
2.2	I-Regler _____	9
2.3	PI-Regler _____	13
2.4	PID-Regler _____	15
2.5	Dreipunkt-Regler _____	17
3	Zimmertemperatur-Regelung (Regelungstech. Praktikum II) _____	19
3.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung) _____	19
3.2	Regelkreisuntersuchung _____	24
3.2.1	Temperaturstrecke geregelt _____	24
3.2.2	Regelung mit P-Regler _____	25
3.2.3	Regelung mit I-Regler _____	27
3.2.4	Regelung mit PI-Regler _____	30
3.2.5	Regelung mit PID-Regler _____	36
3.3	Strecke untersuchen _____	39
3.4	Reglereinstellverfahren _____	40
3.5	Beurteilung Reglereinstellverfahren _____	49
4	Füllstandregelung, Regelungstechnisches Praktikum I _____	50
4.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung) _____	50
4.2	Regelkreisuntersuchung _____	53
4.2.1	Geregelte Anlage _____	53
4.2.2	Regelung mit P-Regler _____	55
4.2.3	Regelung mit I-Regler _____	58

4.2.4	Regelung mit PI-Regler	60
4.2.5	Regelung mit PID-Regler	64
4.2.6	Regelung mit Zweipunkt-Regler	66
4.3	Strecke untersuchen	68
4.4	Reglereinstellverfahren	69
4.5	Beurteilung Reglereinstellverfahren	78
5	Durchfluss-Regelung, Regelungstechnisches Praktikum II	79
5.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)	79
5.2	Regelkreisuntersuchung	81
5.2.1	Geregelte Anlage	81
5.2.2	Regelung mit P-Regler	83
5.2.3	Regelung mit I-Regler	86
5.2.4	Regelung mit PI-Regler	88
5.2.5	Regelung mit PID-Regler	92
5.3	Strecke untersuchen	94
5.4	Reglereinstellverfahren	96
5.5	Beurteilung Reglereinstellverfahren	105
6	Temperaturregelung (ohne/mit Verzögerung), Regelungstechnisches Praktikum I	106
6.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)	106
6.2	Regelkreisuntersuchung	109
6.2.1	Geregelte Anlage	109
6.2.2	Regelung mit P-Regler	111
6.2.3	Regelung mit I-Regler	115
6.2.4	Regelung mit PI-Regler	120
6.2.5	Regelung mit PID-Regler	128
6.2.6	Regelung mit Zweipkt-Regler	132

6.3	Strecke untersuchen _____	133
6.3.1	Reglereinstellverfahren, Erstellen der Tabellen der Reglereinstellverfahren _____	134
6.3.2	Vergleich der Reglereinstellregeln _____	138
6.4	Reglereinstellverfahren _____	147
6.5	Beurteilung Reglereinstellverfahren _____	160
7	Rührkesselkaskade, Regelungstechnisches Praktikum I _____	161
7.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung) _____	161
7.2	Regelkreisuntersuchung _____	163
7.2.1	Geregelte Anlage _____	163
7.2.2	Regelung mit P-Regler _____	165
7.2.3	Regelung mit I-Regler _____	167
7.2.4	Regelung mit PI-Regler _____	168
7.2.5	Regelung mit PID-Regler _____	174
7.3	Strecke untersuchen _____	176
7.3.1	Reglereinstellverfahren, Erstellen der Tabellen von Reglereinstellverfahren _____	177
7.4	Reglereinstellverfahren _____	183
7.5	Beurteilung Reglereinstellverfahren _____	194
7.6	Kaskadenregelung _____	194
8	Füllstandregelung mit 3Pkt-Stellglied, Regelungstechnisches Praktikum II _____	197
8.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung) _____	197
8.2	Regelkreisuntersuchung _____	200
8.2.1	Geregelte Anlage _____	200
8.2.2	Regelung mit P-Regler _____	202
8.2.3	Regelung mit I-Regler _____	205
8.2.4	Regelung mit PI-Regler _____	207
8.2.5	Regelung mit PID-Regler _____	212

9	Motordrehzahl-Regelung, Regelungstechnisches Praktikum II	215
9.1	Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)	215
9.2	Regelkreisuntersuchung	217
9.2.1	Geregelte Anlage	217
9.2.2	Regelung mit P-Regler	219
9.2.3	Regelung mit I-Regler	222
9.2.4	Regelung mit PI-Regler	224
9.2.5	Regelung mit PID-Regler	228
9.3	Strecke untersuchen	231
9.4	Reglereinstellverfahren	233
9.5	Beurteilung Reglereinstellverfahren	242

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 Regelungstechnische Praktika

Mit den Regelungstechnischen Praktika I/II kann an simulierten Strecken das Verhalten von Regelstrecken, Reglern und Regelkreisen untersucht werden.

Regelungstechnisches Praktikum I (Regelungstechnisches Praktikum I):

Übersicht

02.03.2021
09:28:12

Regelungstechnisches Praktikum I

10x Lizenz, Schoop, Leihversion

Version: 20.0609

- 1. Füllstandsregelung**
 - 1.1 Ungeregelte Anlage
 - 1.2 Geregelter Anlage
 - 1.3 Strecke untersuchen
 - 1.4 Regelung mit P-Regler
 - 1.5 Regelung mit I-Regler
 - 1.6 Regelung mit PI-Regler
 - 1.7 Regelung mit PID-Regler
 - 1.8 Regelung mit Zweipkt-Regler
- 2. Füllstandsregelung mit Verzögerung**
 - 2.1 Ungeregelte Anlage
 - 2.2 Geregelter Anlage
 - 2.3 Strecke untersuchen
 - 2.4 Regelung mit P-Regler
 - 2.5 Regelung mit I-Regler
 - 2.6 Regelung mit PI-Regler
 - 2.7 Regelung mit PID-Regler
 - 2.8 Regelung mit Zweipkt-Regler
- 3. Temperaturregelung**
 - 3.1 Ungeregelte Anlage
 - 3.2 Geregelter Anlage
 - 3.3 Strecke untersuchen
 - 3.4 Regelung mit P-Regler
 - 3.5 Regelung mit I-Regler
 - 3.6 Regelung mit PI-Regler
 - 3.7 Regelung mit PID-Regler
 - 3.8 Regelung mit Zweipkt-Regler
- 4. Temperaturregelung mit Verzögerung**
 - 4.1 Ungeregelte Anlage
 - 4.2 Geregelter Anlage
 - 4.3 Strecke untersuchen
 - 4.4 Regelung mit P-Regler
 - 4.5 Regelung mit I-Regler
 - 4.6 Regelung mit PI-Regler
 - 4.7 Regelung mit PID-Regler
 - 4.8 Regelung mit Zweipkt-Regler
- 5. Rührkesselkaskade**
 - 5.1 Ungeregelte Anlage
 - 5.2 Geregelter Anlage
 - 5.3 Strecke untersuchen
 - 5.4 Regelung mit P-Regler
 - 5.5 Regelung mit I-Regler
 - 5.6 Regelung mit PI-Regler
 - 5.7 Regelung mit PID-Regler
 - 5.8 Kaskadenregelung
- 6. PTn-Strecken**
 - 6.1 Strecke auswählen
 - 6.2 Strecke untersuchen
 - 6.3 Regelung mit P-Regler
 - 6.4 Regelung mit I-Regler
 - 6.5 Regelung mit PI-Regler
 - 6.6 Regelung mit PID-Regler
- 7. Reglerverhalten**
 - 7.1 P-Regler
 - 7.2 I-Regler
 - 7.3 PI-Regler
 - 7.4 PID-Regler

Ende Reset Drucker einrichten ?

Germany UK France E

Regelungstechnisches Praktikum II (Regelungstechnisches Praktikum II):

Startseite

08.02.2021
15:59:25

Regelungstechnisches Praktikum II

10x Lizenz, Schoop, Leihversion

Version: 20.1028

- 1. Reglerverhalten**
 - 1.1 P-Regler
 - 1.2 I-Regler
 - 1.3 PI-Regler
 - 1.4 PID-Regler
 - 1.5 Dreipunkt-Regler
- 2. Zimmertemperatur-Regelung**
 - 2.1 Ungeregelte Anlage
 - 2.2 Geregelter Anlage
 - 2.3 Strecke untersuchen
 - 2.4 Regelung mit P-Regler
 - 2.5 Regelung mit I-Regler
 - 2.6 Regelung mit PI-Regler
 - 2.7 Regelung mit PID-Regler
- 3. Motordrehzahl-Regelung**
 - 3.1 Ungeregelte Anlage
 - 3.2 Geregelter Anlage
 - 3.3 Strecke untersuchen
 - 3.4 Regelung mit P-Regler
 - 3.5 Regelung mit I-Regler
 - 3.6 Regelung mit PI-Regler
 - 3.7 Regelung mit PID-Regler
- 4. Durchfluss-Regelung**
 - 4.1 Ungeregelte Anlage
 - 4.2 Geregelter Anlage
 - 4.3 Strecke untersuchen
 - 4.4 Regelung mit P-Regler
 - 4.5 Regelung mit I-Regler
 - 4.6 Regelung mit PI-Regler
 - 4.7 Regelung mit PID-Regler
- 5. Füllstands-Regelung**
 - 5.1 Ungeregelte Anlage
 - 5.2 Geregelter Anlage
 - 5.3 Strecke untersuchen
 - 5.4 Regelung mit P-Regler
 - 5.5 Regelung mit I-Regler
 - 5.6 Regelung mit PI-Regler
 - 5.7 Regelung mit PID-Regler
 - 5.8 Regelung mit Dreipunkt-Regler
- 6. Kühlraum-Regelung**
 - 6.1 Ungeregelte Anlage
 - 6.2 Geregelter Anlage
 - 6.3 Strecke untersuchen
 - 6.4 Regelung mit Dreipunkt-Regler

Ende ? E

Germany UK France Drucker einrichten

2 Reglerverhalten, Regelungstechnisches Praktikum I/II

Hier können Sie das Verhalten des P-, I-, PI- und PID-Reglers untersuchen.

Die Untersuchungen der Regler sind für beide Praktika gleich.

Im Regelungstechnisches Praktikum II besteht zusätzlich die Möglichkeit, das Verhalten des Dreipunktreglers zu untersuchen.

2.1 P-Regler

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum I oder im Regelungstechnisches Praktikum II unter Reglerverhalten den P-Regler (Pkt. 1.1 bzw. 7.1)

Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker.

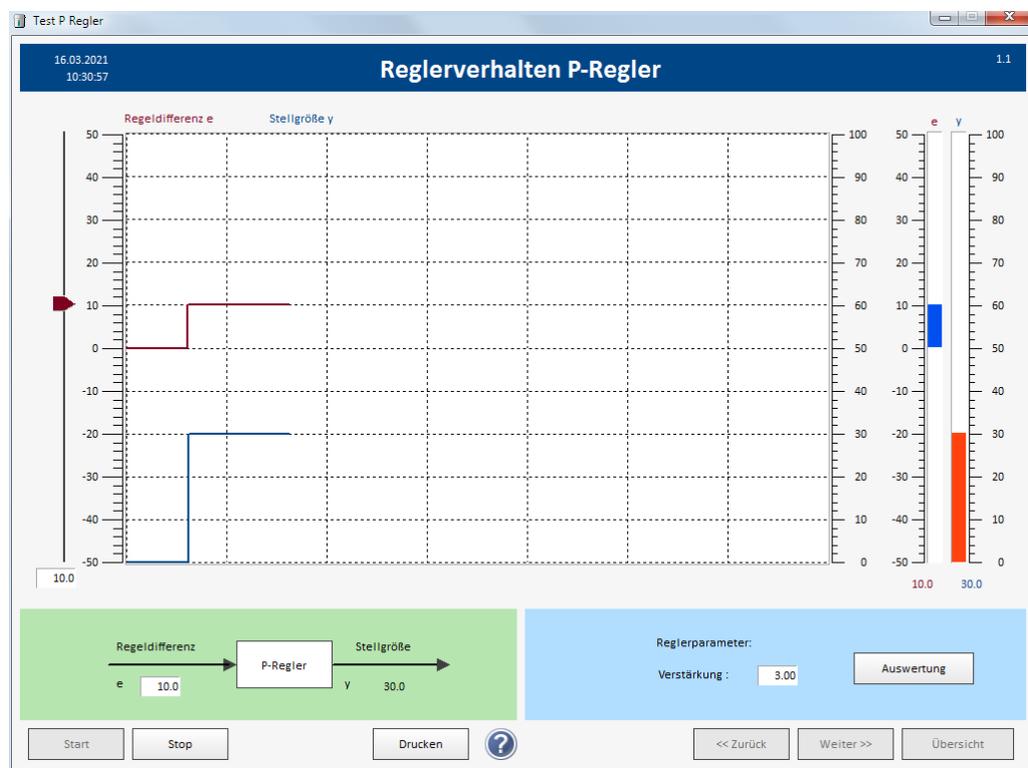
Aufgabe 1:

Drücken Sie „Start“.

Stellen Sie den Reglerparameter „Verstärkung“ auf 3.

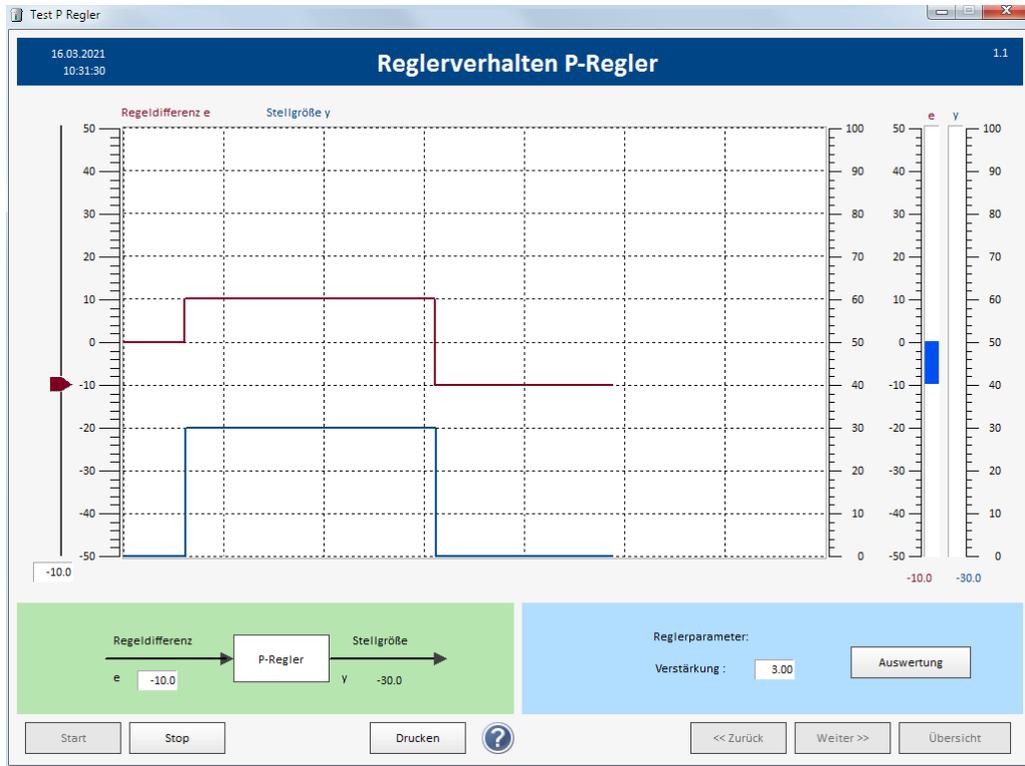
Geben Sie bei der Regeldifferenz e den Wert 10 ein.

Beobachten Sie den Reglerausgang (Stellgröße) y.



Der Eingangswert des Reglers $e = 10$ wird mit der Verstärkung 3 verstärkt. Der Reglerausgang y nimmt dann den Wert $y = 30$ an.

Gibt man für e den Wert -10 ein, erhält y den Wert -30 . Vielfach ist der Reglerausgang auf z.B. 0% bis 100% beschränkt, so dass der Regler keine negativen Werte ausgeben kann. In der Trenddarstellung wird für y deshalb nur der Wert 0 angezeigt.



2.2 I-Regler

Wählen Sie bei Reglerverhalten den I-Regler (Pkt. 1.2 bzw. 7.2)

Der I-Regler arbeitet wie ein Integrator.

Ein Integrator hat folgendes Verhalten:

- Ist der Eingang des Integrators positiv (größer 0), fängt der Ausgang des Integrators an zu steigen.
- Ist der Eingang des Integrators negativ (kleiner 0), fängt der Ausgang des Integrators an zu fallen.
- Ist der Eingang des Integrators gleich 0, behält der Ausgang des Integrators seinen Wert bei.

Aufgabe 2:

Drücken Sie „Start“.

Stellen Sie den Reglerparameter „Nachstellzeit“ auf 1.

Geben Sie für die Regeldifferenz $e = 1$ (Differenz zwischen Soll- und Istwert) ein.

Beobachten Sie das Verhalten.



Der Ausgang y des Reglers fängt an zu steigen.

Die Steigung des Anstiegs von y beträgt 1, d.h. in einer Sekunde erhöht sich der Ausgang y um 1.

Aufgabe 3:

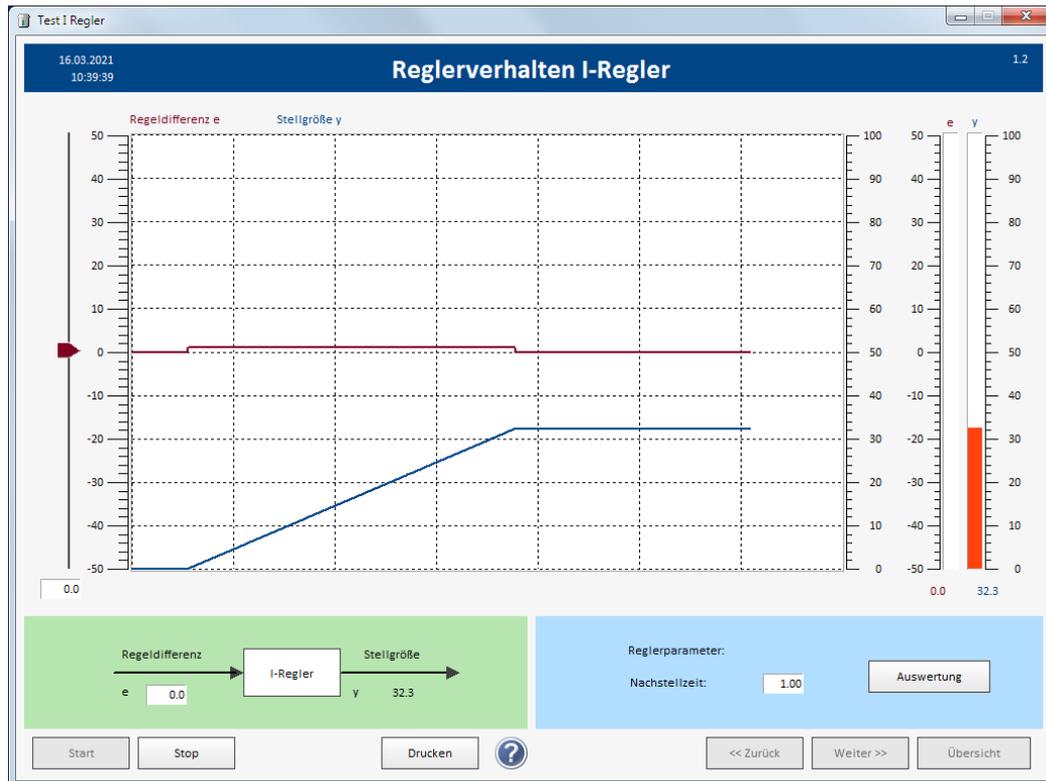
Drücken Sie „Start“.

Stellen Sie den Reglerparameter „Nachstellzeit“ auf 1.

Geben Sie für e den Wert 1 ein. Warten Sie bis y den Wert 30 überschritten hat.

Ändern Sie den Wert von e = 1 auf e = 0.

Beobachten Sie das Verhalten.



Wenn der Eingang e des I-Reglers (Integrator) 0 ist, behält der Ausgang des I-Reglers seinen Wert bei (y bleibt konstant).

Aufgabe 4:

Verändern Sie jetzt den Eingang e auf -1.

Beobachten Sie das Verhalten.

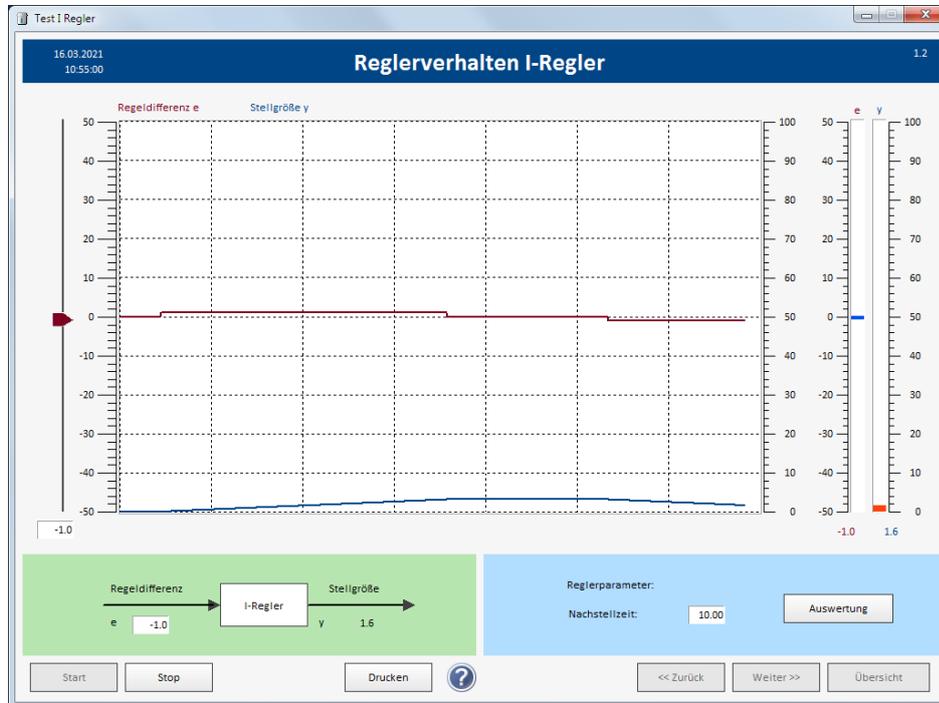


Zunächst hat der Eingang e des Reglers den Wert 0 und der Ausgang y ist konstant. Nachdem der Eingang e auf -1 gesetzt wird, fängt der Ausgang y an zu fallen. Er fällt konstant mit der Steigung -1, d.h. der Ausgang y nimmt in einer Sekunde um 1 ab.

Aufgabe 5:

Führen Sie die obigen Versuche mit der Nachstellzeit 10 durch.

Beobachten Sie das Verhalten.



Beim Eingang $e = 1$ fängt der Ausgang y mit einem Faktor 10 langsamer an zu steigen als bei den vorherigen Aufgaben. Ist $e = 0$ bleibt der Ausgang konstant. Bei negativem Eingang fällt der Ausgang mit einem 10x langsameren Faktor.

Die Steigung des Ausgangs ist abhängig von der Nachstellzeit. Die Steigung des Ausgangs y beträgt $1/\text{Nachstellzeit}$ bzw. $-1/\text{Nachstellzeit}$, je nachdem ob der Eingang e positiv oder negativ ist

Wird der Eingang e vergrößert, fängt der Ausgang an, um den Vergrößerungsfaktor schneller zu steigen. Entsprechendes gilt, wenn der Eingang negativ ist.

Wie an diesen Aufgaben zu sehen ist, verhält sich der I-Regler wie ein Integrator. Ist sein Eingang positiv, steigt der Ausgang an kontinuierlich. Ist der Eingang Null, behält der Ausgang seinen Wert bei. Bei negativem Eingang, fällt der Ausgang kontinuierlich.

Folgerung:

Aus dem Verhalten des I-Reglers lässt sich folgern, dass ein Regler mit I-Anteil (Integrator) entweder den Istwert (Regelgröße) nach einer Einschwingphase auf den Sollwert (Führungsgröße) bringt oder der Regelkreis wird instabil.

Dies folgt aus der Tatsache, dass der I-Regler nur dann einen konstanten Wert ausgibt, wenn sein Eingang e gleich 0 ist. Der Eingang des Reglers ist die Differenz zwischen Soll- und Istwert, also nur wenn der Istwert gleich dem Sollwert ist, ist der Eingang e gleich 0.

2.3 PI-Regler

Wählen Sie bei Reglerverhalten den PI-Regler (Pkt. 1.3 bzw. 7.3)

Der Ausgang des PI-Reglers berechnet sich nach folgender Formel:

$$y(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau) \quad K = \text{Verstärkung, } T_i = \text{Nachstellzeit.}$$

Der PI-Regler ist also eine Kombination aus P- und I-Regler, wobei die Verstärkung K auf den Eingang e und auf den Integrator wirkt.

Aufgabe 6:

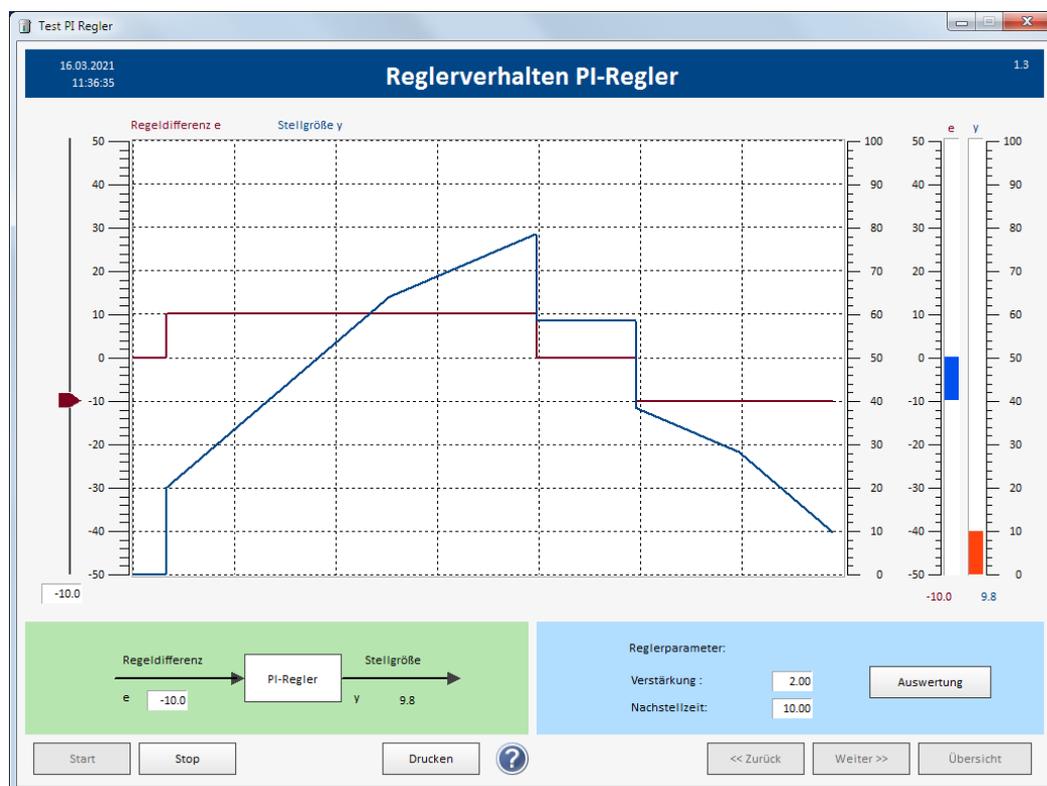
Drücken Sie „Start“.

Stellen Sie folgende Parameter ein: Verstärkung K = 2, Nachstellzeit Ti = 10.

Geben Sie nacheinander mit Zeitverzögerung folgende Werte ein:

e = 10, Ti = 20, e = 0, e = -10, Ti = 10

Beobachten Sie das Verhalten.



Sie erhalten in etwa obige Trenddarstellung für e und y.

Die Untersuchung des Zeitverhaltens des PI-Reglers ist in obiger Abbildung dargestellt. Zuerst wurde ein Sprung von 0 auf 10 auf den Eingang e des PI-Reglers gegeben. Das Eingangssignal e (braunes Signal, Regeldifferenz) ging 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-Anteils hatte zuerst den Wert 10. Durch die Verstärkung 2 ergibt sich insgesamt eine Zeitkonstante von $10/2 = 5$. Das Ausgangssignal y (blaues Signal, Stellgröße) steigt gleichmäßig kontinuierlich an und erreicht deshalb nach 10s einen um 20 erhöhten Wert (Sprung e auf 10).

Nach ca. 22 Sekunden wurde die Nachstellzeit T_i von 10 auf 20 verstellt. Der Anstieg des Ausgangssignals y erfolgt jetzt langsamer, da die Zeitkonstante jetzt $20/2 = 10$ beträgt. Durch die Zeitkonstante 10 erreicht der Ausgang nach 10 Sekunden den Wert 1 bei einem Eingangssprung von 1. Da wir einen Eingangssprung von $e = 10$ vorgegeben haben, steigt der Ausgang y nach 10 Sekunden um 10.

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. Der I-Anteil des PI-Reglers behält seinen Wert, so dass ab diesem Zeitpunkt ein konstanter Wert ausgegeben wird. Der konstante Wert ist um 20 kleiner als der Wert des Ausgangssignals zum Schaltzeitpunkt.

Es folgte ein Sprung von e auf -10. Durch die Verstärkung von 2 (P-Anteil) wurde das Ausgangssignal y sofort um 20 kleiner. Durch den I-Anteil nimmt y dann kontinuierlich ab. Der Ausgang y nimmt innerhalb von 10 Sekunden um 10 ab wegen der Nachstellzeit $T_i = 20s$ und der Verstärkung $K = 2$ (Berechnung wie oben).

Die Veränderung der Nachstellzeit auf $T_i = 10$ bewirkte dann eine doppelt so schnelle Abnahme des Ausgangs.

2.4 PID-Regler

Wählen Sie bei Reglerverhalten den PID-Regler (Pkt. 1.4 bzw. 7.4)

Der Ausgang des PID-Reglers berechnet sich nach folgender Formel:

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

K = Verstärkung Ti = Nachstellzeit,

Td = Vorhaltezeit.

Der PID-Regler ist also eine Kombination aus P-, I- und D-Anteil, wobei die Verstärkung K auf den Eingang e, den Integrator und den D-Anteil wirkt.

Aufgabe 7:

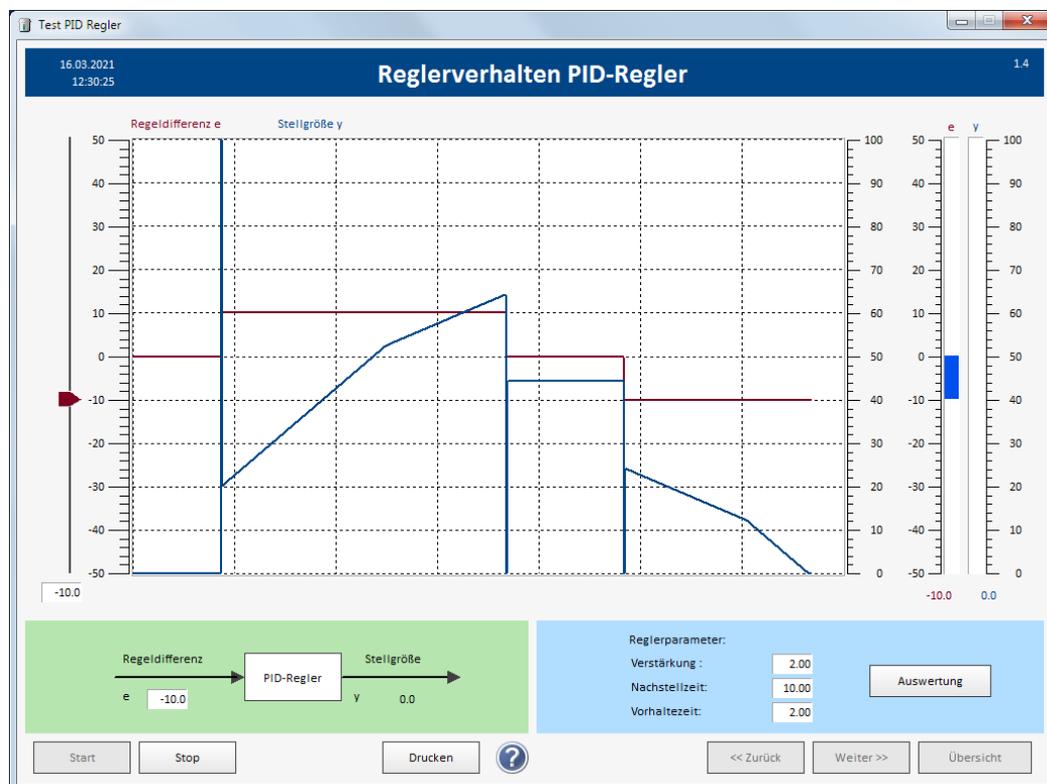
Drücken Sie „Start“.

Stellen Sie folgende Parameter ein: Verstärkung K = 2, Nachstellzeit Ti = 10, Vorhaltezeit Td = 2.

Nehmen Sie nacheinander mit Zeitverzögerung folgende Eingaben vor:

e = 10, Ti = 20, e = 0, e = -10, Ti = 10

Beobachten Sie das Verhalten.



In der obigen Abbildung 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 Peak 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 Peak im nächsten Zeitschritt auf 2x Eingangssignal, also auf 20 zurück (blaues Signal).

Der D-Anteil wirkt nicht mehr, da keine Änderung am Eingangssignal e auftritt.

Die Nachstellzeit T_i des PID-Reglers war auf 10s eingestellt. Da die Verstärkung von 2 auch auf den I-Anteil des PID-Reglers wirkt, ergibt sich insgesamt eine Zeitkonstante von $10/2 = 5$. Das Ausgangssignal y (blaues Signal, Stellgröße) steigt gleichmäßig kontinuierlich an und erreicht nach 10s einen um 20 höheren Wert (Eingangssprung $e = 10$).

Nach ca. 16 Sekunden wurde die Nachstellzeit von 10 auf 20 verstellt. Der Anstieg des Ausgangssignals y erfolgt nun langsamer, da die Zeitkonstante jetzt $20/2 = 10$ beträgt. Das bedeutet, bei einem Eingangssprung von 1 erreicht der Ausgang nach 10 Sekunden den Wert 1. Da wir einen Eingangssprung von $e = 10$ eingegeben haben, steigt der Ausgang y nach 10 Sekunden um 10.

Dann wurde das Eingangssignal e auf 0 geschaltet. Durch die schlagartige Änderung des Eingangssignals wirkt sofort wieder der D-Anteil des PID-Reglers und das Ausgangssignal y erhielt einen Peak 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 ausgegeben wurde. Der Wert war um 20 kleiner als der Wert des Ausgangssignals zum Schaltpunkt.

Danach erfolgte ein Sprung von e auf -10. Der D-Anteil bewirkte einen negativen Peak und der P-Anteil bewirkt, dass das Ausgangssignal nach dem Peak schlagartig um 20 kleiner wurde. Der I-Anteil nimmt dann kontinuierlich ab mit der Nachstellzeit T_i .

Durch Verstellen der Nachstellzeit auf 10s wurde die Geschwindigkeit des Abnehmens verdoppelt.

Der D-Anteil des PID-Reglers reagierte in diesem Beispiel dreimal, nämlich immer, 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.

2.5 Dreipunkt-Regler

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum II unter Reglerverhalten den Dreipunkt-Regler (Pkt. 1.5)

Der Dreipunkt-Regler ist ein unstetiger Regler, der als Stellsignal drei Zustände ausgeben kann. Abhängig von der Differenz zwischen Soll- und Istwert wird der erste Zustand, der zweite Zustand oder der dritte Zustand eingenommen.

Ein Beispiel für den Einsatz eines Dreipunktreglers ist die Temperaturregelung in einer Kühlkammer. Wenn die Temperatur zu hoch ist, muss gekühlt werden. Ist die Temperatur zu niedrig, muss geheizt werden. Liegt die Temperatur in einem Bereich um den Sollwert wird weder geheizt noch gekühlt.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz eines Dreipunktreglers ist ein Motorventil, mit dem ein Durchfluss geregelt werden soll. Ist der Durchfluss zu hoch, muss das Motorventil zufahren (Linkslauf). Ist der Durchfluss zu gering, muss das Motorventil auffahren (Rechtslauf). Liegt der Durchfluss in einem Bereich um den Sollwert, wird der Motor nicht angesteuert.

Auf der Seite zum Untersuchen des Dreipunkt-Reglers wird ein Diagramm dargestellt, indem das Stellsignal y über dem Regelfehler e aufgetragen wird. Der Regelfehler e kann mithilfe der Pfeil Schaltflächen automatisch zwischen -100 und 100 gefahren werden. Das Stellsignal nimmt dann abhängig vom Regelfehler e und den eingestellten Reglerparametern die Werte -1, 0 oder 1 an.

Aufgabe 8:

Drücken Sie „Start“.

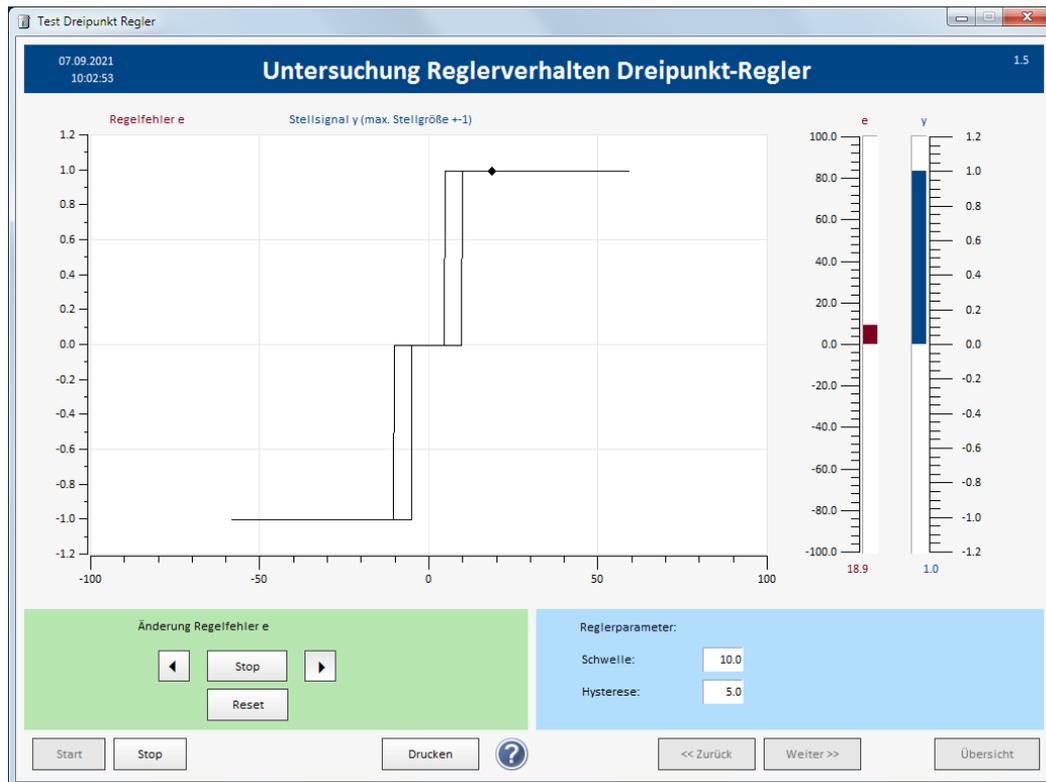
Stellen Sie die Reglerparameter „Schwelle“ auf 10 und „Hysterese“ auf 5.

Drücken Sie auf den Pfeil rechts des Buttons „Stopp“. Warten Sie bis der Regelfehler ungefähr den Wert 50 erreicht hat. Drücken Sie dann auf den Pfeil links von „Stopp“.

Lassen Sie den Regelfehler ungefähr bis -50 laufen und drücken Sie dann wieder auf den rechten Pfeil.

Beobachten Sie das Diagramm.

Wie verhält sich das Stellsignal y abhängig vom Regelfehler bei den eingestellten Reglerparametern „Schwelle“ und „Hysterese“ und der Richtung (Vergrößern bzw. Verkleinern) des Regelfehlers e .



Nach Drücken des Pfeils neben dem Button „Stopp“ fängt der Regelfehler e langsam an kontinuierlich größer zu werden.

Das Stellsignal y bleibt auf 0 bis der Regelfehler die Schwelle 10 erreicht hat. Dann springt das Stellsignal y auf seinen Maximalwert 1 und bleibt auf 1.

Wird der Pfeil links neben dem Button „Stopp“ gedrückt, wird der Regelfehler e langsam kontinuierlich kleiner.

Erst wenn der Regelfehler e kleiner als die eingestellte Hysterese von 5 wird, springt das Stellsignal y auf 0.

Unterschreitet der Regelfehler e den Wert -10 (-Schwelle) springt das Stellsignal y auf seinen Minimalwert -1.

Lässt man den Regelfehler e durch Drücken des rechten Pfeils wieder anwachsen, bleibt das Stellsignal y auf -1 bis die Hysterese -5 erreicht wird, dann geht y auf 0.

Folgerung:

Das Stellsignal y nimmt also die Werte -1, 0, 1 an, abhängig vom Regelfehler (Differenz zwischen Soll- und Istwert), der eingestellten „Schwelle“ und „Hysterese“ sowie der Richtung (Vergrößern bzw. Verkleinern) aus der der Regelfehler e kommt.

3 Zimmertemperatur-Regelung (Regelungstech. Praktikum II)

Die Zimmertemperatur-Regelung des Regelungstechnischen Praktikums II ist das typische Einführungsbeispiel in die Regelungstechnik. Das Temperaturverhalten in einem Zimmer ist jedem durch eigene Erfahrung bekannt.

Bei dem Prozess handelt es sich um ein Zimmer, das von einer Elektroheizung geheizt wird. Die regelungstechnische Aufgabe besteht darin, die Temperatur des Raumes durch Verändern der Heizleistung so zu regeln, dass diese einem vorgegebenen Sollwert entspricht. Die Heizleistung ist die Eingangsgröße (Stellgröße), die Innentemperatur des Zimmers die Ausgangsgröße (Regelgröße) des Systems. Die Außentemperatur und der Grad der Fensteröffnung stellen Störgrößen dar.

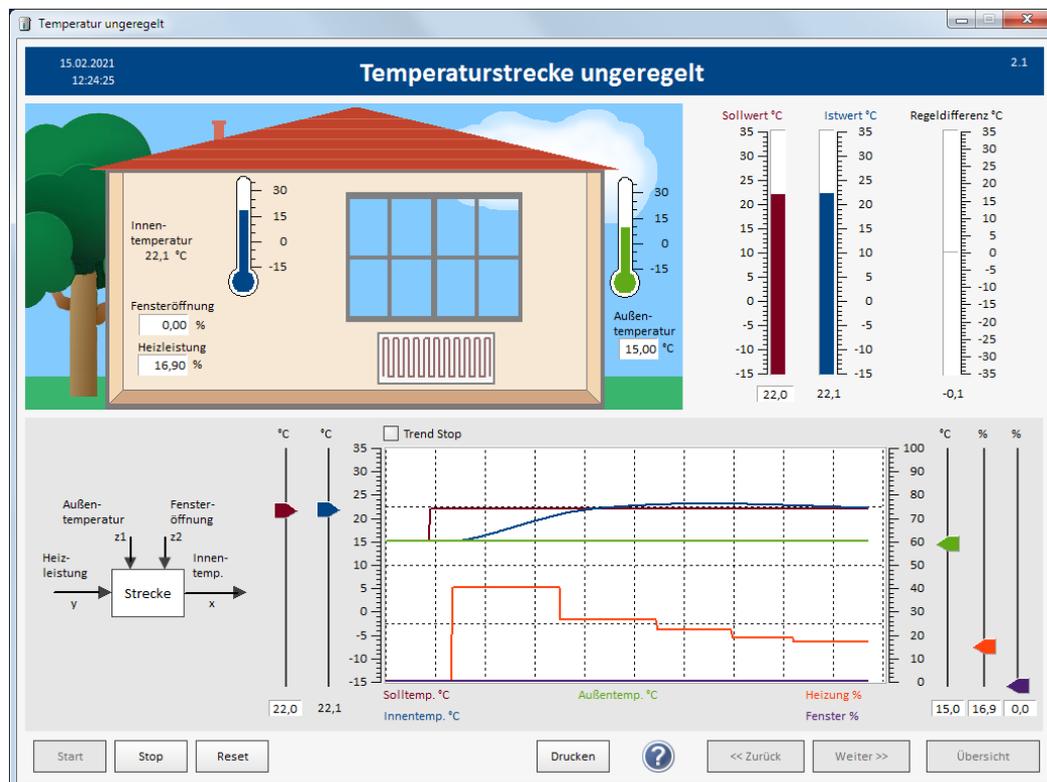
3.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum II den Punkt 2.1 „Ungeregelte Anlage“.

Drücken Sie auf „Start“. Sie können jetzt die Werte für den Sollwert (Solltemp. °C), die Heizleistung (Heizung %), die Außentemperatur (Außentemp. °C) sowie die Fensteröffnung (Fenster %) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

Aufgabe 1:

Stellen Sie den Sollwert (Führungsgröße) auf 22°C und versuchen Sie durch Verstellen der Heizleistung (Stellsignal) den Istwert (Regelgröße Isttemperatur) auf den Sollwert (Führungsgröße Solltemperatur) zu bringen.



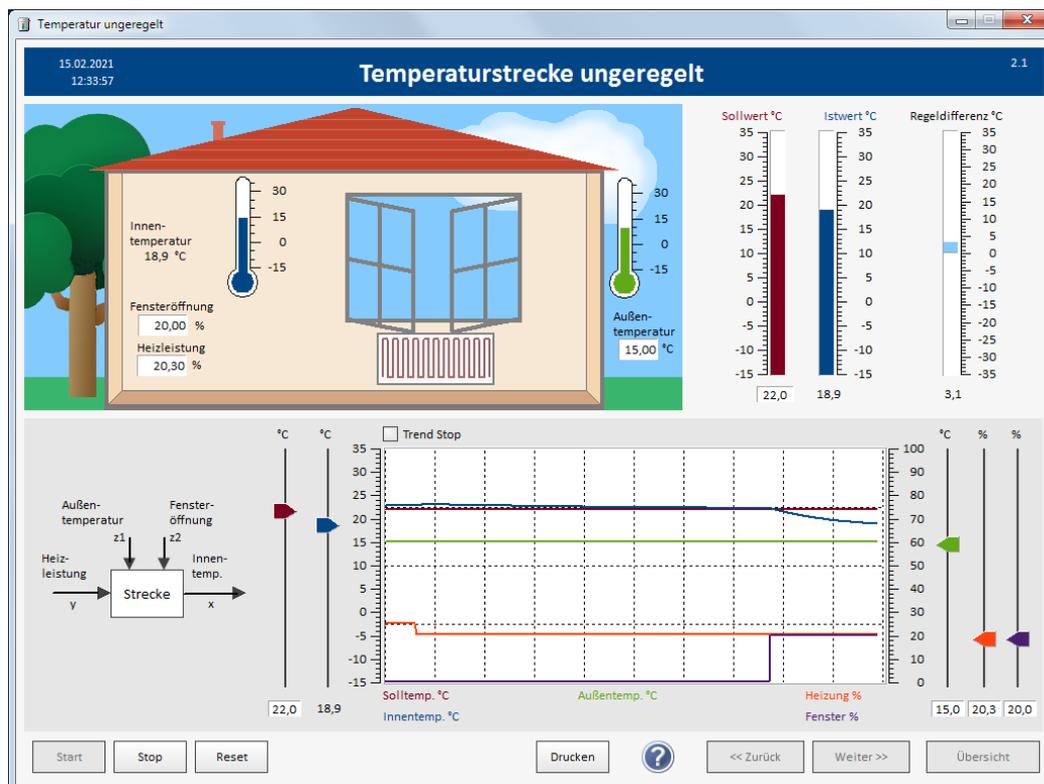
Info:

Wird der Sollwert verstellt und wird versucht den Istwert (Regelgröße) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen, spricht man vom Führungsverhalten.

Aufgabe 2:

Öffnen Sie das Fenster, stellen Sie die Fensteröffnung auf 20%.

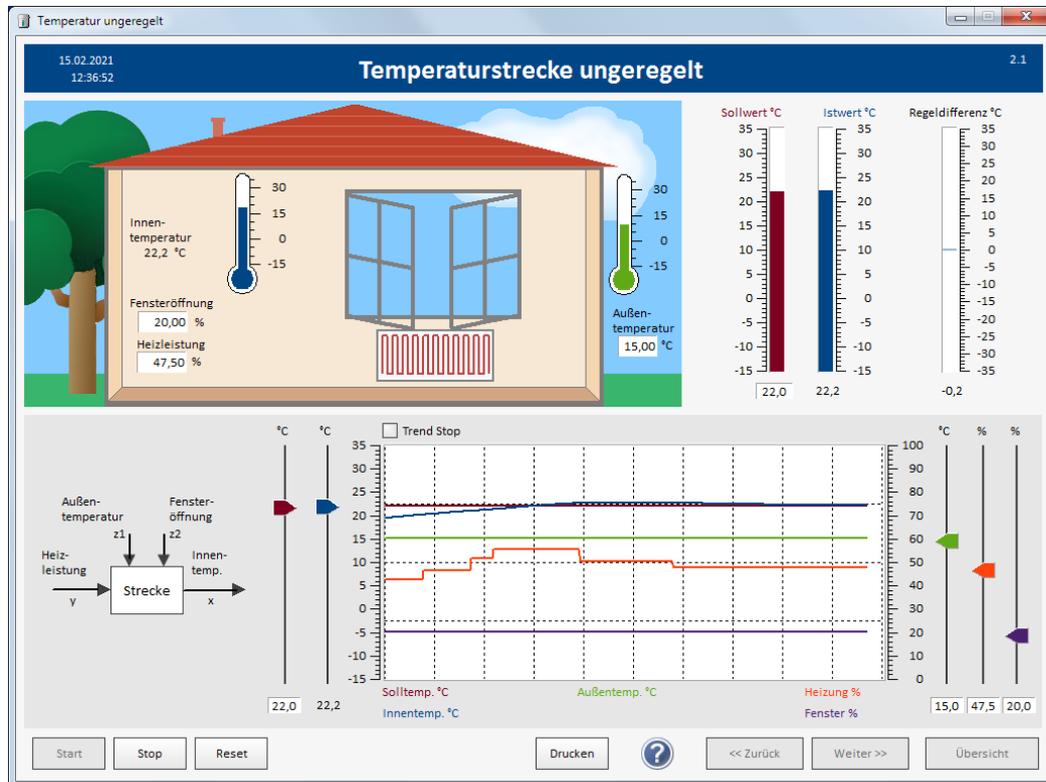
Was passiert?



Da die Außentemperatur 15°C beträgt, wird die Zimmertemperatur (Innentemperatur) bei geöffnetem Fenster sinken.

Aufgabe 3:

Versuchen Sie durch Verstellen der Heizleistung die Innentemperatur bei geöffnetem Fenster wieder auf den Sollwert von 22°C zu bringen.



Durch die Störung von außen muss versucht werden, durch Verstellen der Heizleistung (Vergrößern der Heizleistung) den Istwert (Regelgröße) wieder auf den Sollwert (Führungsgröße) zu bringen.

Info:

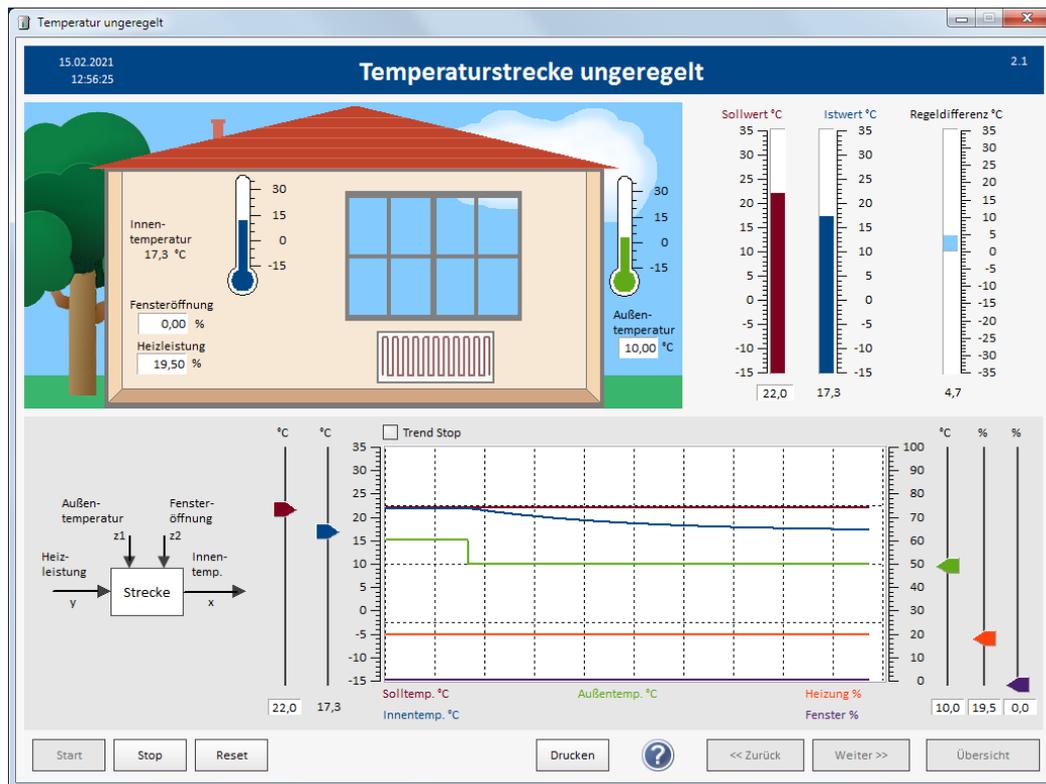
Bei der Reaktion auf eine Störung des Systems spricht man vom Störverhalten beim Regelkreis.

Aufgabe 4:

Schließen Sie das Fenster und versuchen Sie durch Verstellen der Heizleistung wieder die Innentemperatur auf den Sollwert von 22°C zu bringen.

Wenn der Istwert auf den Sollwert eingeschwungen ist, ändern Sie die Außentemperatur (Außentemp.) durch Verstellen von 15°C auf 10°C.

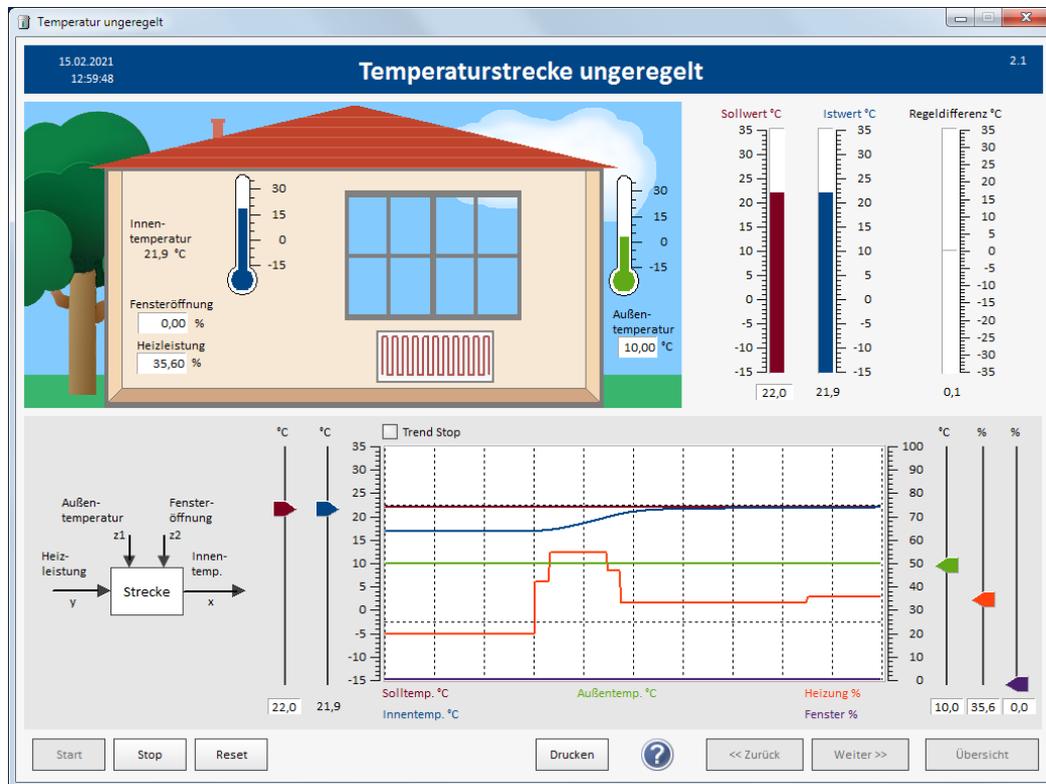
Was passiert?



Durch die fallende Außentemperatur sinkt die Innentemperatur im Zimmer.

Aufgabe 5:

Versuchen Sie die Störung durch die veränderte Außentemperatur auszuregeln, indem Sie die Heizleistung verstellen.



Durch die von außen auftretende Störung fällt die Innentemperatur.

Um diese Störung auszugleichen, muss die Heizleistung hochgedreht werden. Hier handelt es sich wieder um das Störverhalten beim Regelkreis.

Dass die Heizleistung bei fallender Außentemperatur erhöht werden muss, kennt jeder aus eigener Erfahrung.

3.2 Regelkreisuntersuchung

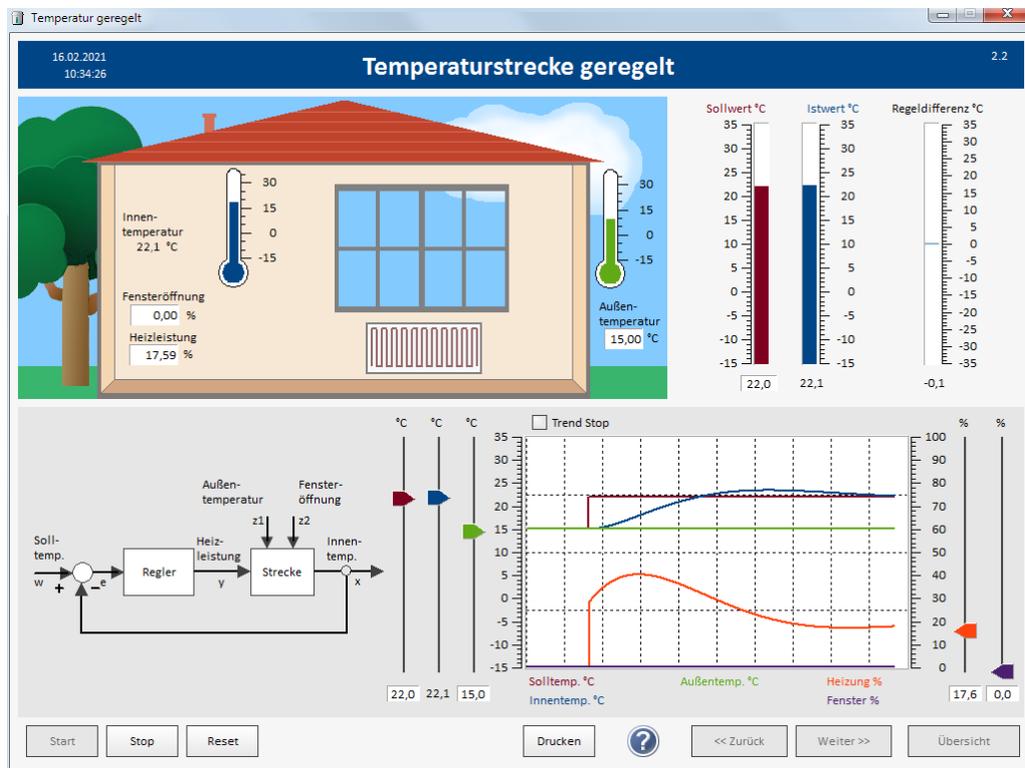
3.2.1 Temperaturstrecke geregelt

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 2.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung durch den Benutzer ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 6:

Drücken Sie „Start“ und stellen Sie den Sollwert auf 22°C.



Mit Überschwingen geht der Istwert nach einer gewissen Zeit auf den Sollwert.

Auch wenn Sie eine Störung durch Veränderung der Außentemperatur vorgeben, versucht der Regler, den Istwert wieder auf den Sollwert zu bringen.

3.2.2 Regelung mit P-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 2.4 „Regelung mit P-Regler“.

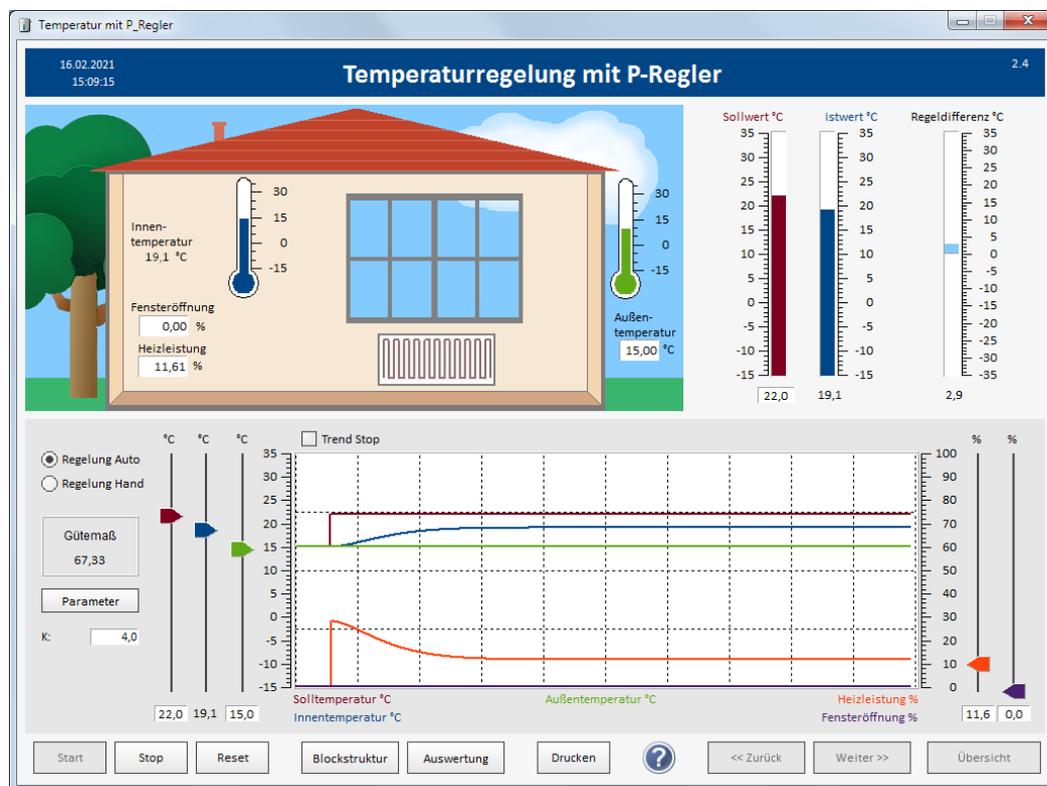
Aufgabe 7:

Drücken Sie „Start“.

Da der Istwert (Regelgröße) und der Sollwert (Führungsgröße) den Wert 15°C haben, muss nicht geheizt werden. Der Regler gibt deshalb als Stellsignal 0% Heizleistung aus.

Verändern Sie den Sollwert auf 22°C und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.

Was passiert?



Nach der Einschwingphase erreicht der Istwert (Regelgröße) nicht den Sollwert (Führungsgröße). Wir erhalten eine bleibende Regeldifferenz.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$.

Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $w - x$ (Sollwert - Istwert) wird mit dem eingestellten Verstärkungsfaktor (in unserem Fall 4) verstärkt.

In unserem Fall war der Sollwert w auf 22°C eingestellt. Erreicht wurde ein Istwert x von 19,1°C. Die Regeldifferenz beträgt also 2,9°C ($w-x$). Da die Verstärkung K des P-Reglers auf 4 eingestellt war, wird

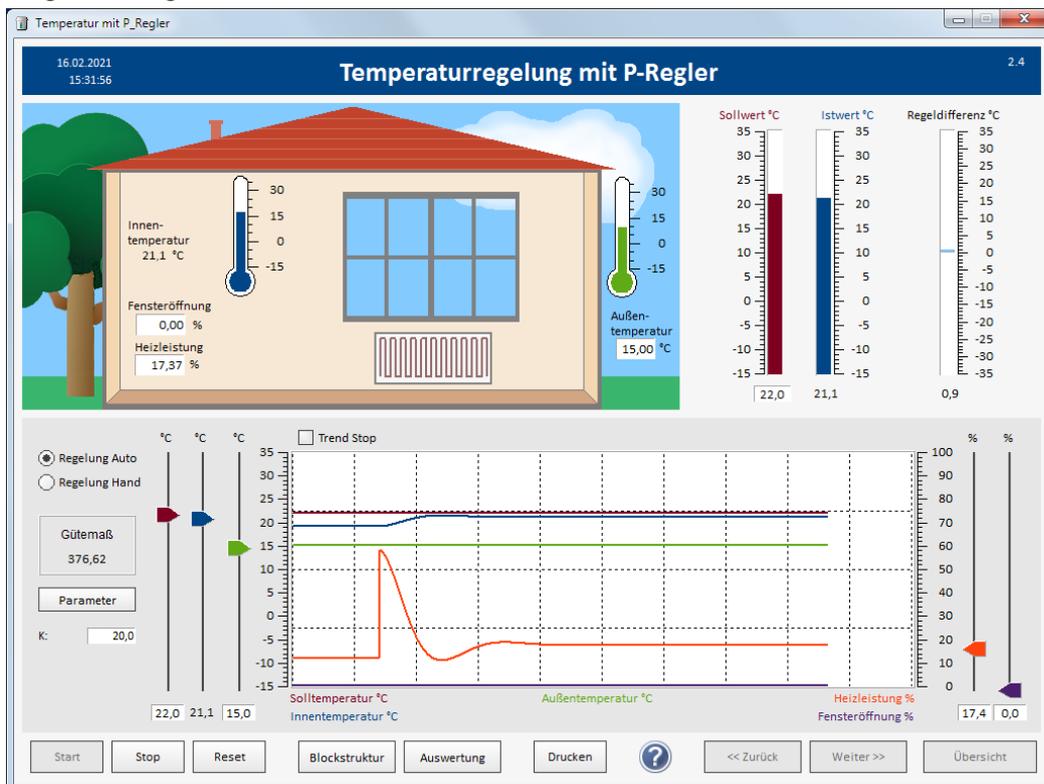
die Regeldifferenz mit 4 multipliziert. Damit ergibt sich ein Stellsignal von $(22-19,1) \cdot 4 = 11,6$. Dieses Stellsignal lässt sich auch im Prozessbild ablesen.

Info:

Damit der P-Regler ein Stellsignal (eine Heizleistung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Aufgabe 8:

Verändern Sie die Verstärkung des P-Regler von 4 auf 20 und warten Sie bis der Regelkreis wieder eingeschwungen ist.



Die Regeldifferenz zwischen Sollwert und Istwert wird mit der Erhöhung der Verstärkung K von 4 auf 20 wesentlich kleiner. Allerdings schafft es der P-Regler auch hier nicht, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Wir erhalten aus dem oben beschriebenen Grund ebenso eine bleibende, wenn auch wesentlich kleinere Regeldifferenz ($e = w - x$). Wie oben angegeben können Sie auch hier berechnen, wie groß das Stellsignal wird.

Auf eine Störung (z.B. Veränderung der Außentemperatur) reagiert der P-Regler ebenfalls. Auch hierfür erhält man eine bleibende Regeldifferenz.

Folgerung:

Wie am Einschwingverhalten zu sehen ist, reagiert der P-Regler sofort und schnell auf Sollwert- und Störwertänderungen. Allerdings erhalten wir für diese Strecke mit dem P-Regler eine bleibende Regeldifferenz.

3.2.3 Regelung mit I-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 2.5 „Regelung mit I-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

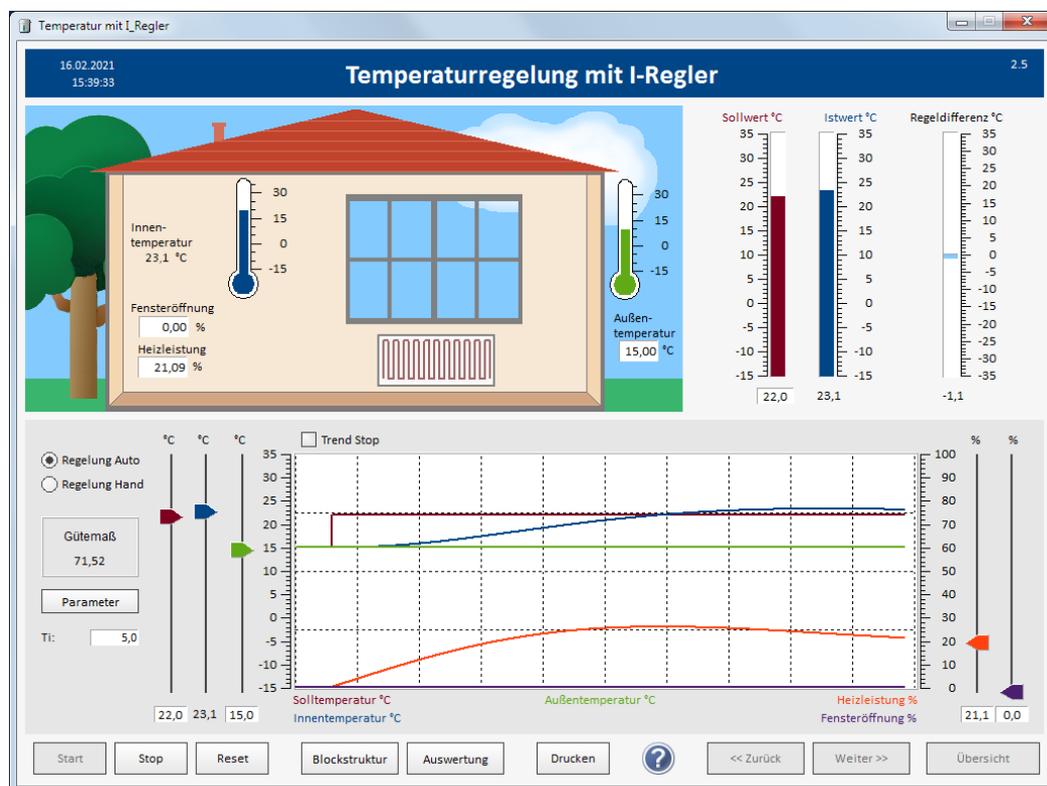
Aufgabe 9:

Da der Istwert (Regelgröße) und der Sollwert (Führungsgröße) den Wert 15°C haben, muss nicht geheizt werden. Der Regler gibt deshalb als Stellsignal 0% Heizleistung aus.

Lassen Sie die eingestellte Integrationszeit T_i auf 5.

Verändern Sie den Sollwert auf 22°C und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.

Beschreiben Sie das Verhalten.



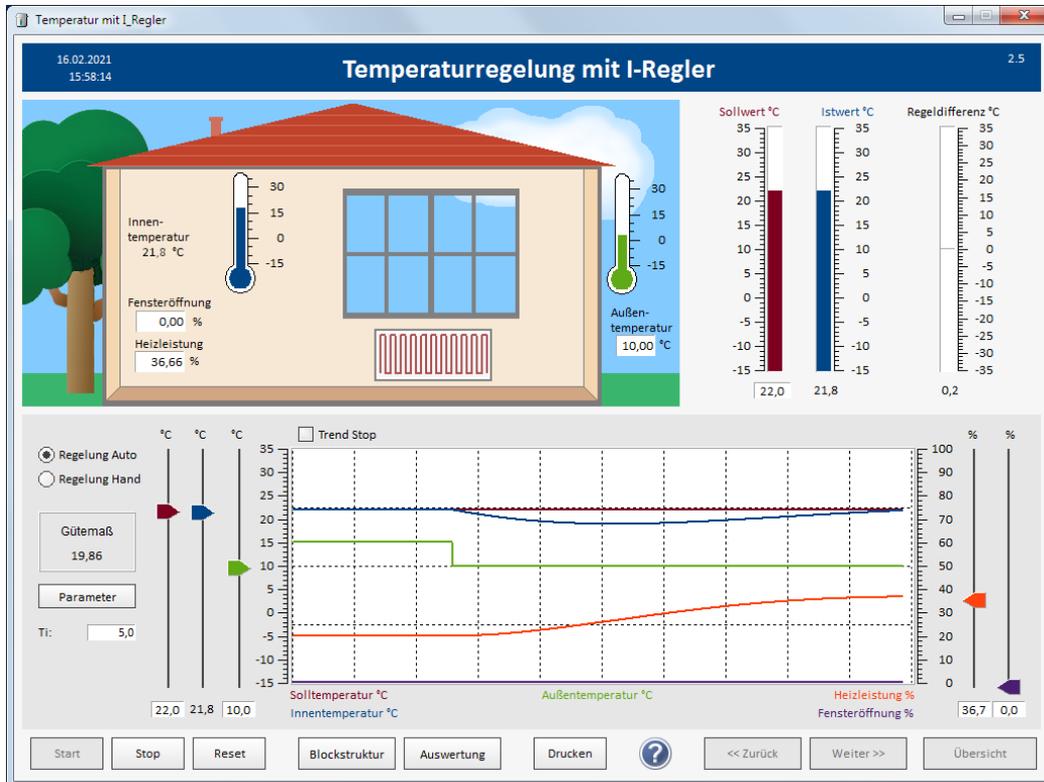
Nach einer wesentlich längeren Einschwingphase als beim P-Regler erreicht der Istwert bei der eingestellten Integrationszeit $T_i = 5$ mit einem kleinen Überschwinger den Sollwert. Man erhält keine bleibende Regeldifferenz.

Allerdings dauert es sehr lange, bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Aufgabe 10:

Geben Sie eine Störung ein, verändern Sie die Außentemperatur auf 10°C.

Wie verhält sich der Regelkreis.



Nach einer längeren Einschwingphase geht der Istwert wieder auf den Sollwert.

Man erhält auch für das Störverhalten keine bleibende Regeldifferenz.

Allerdings dauert das Einschwingen sehr lange.

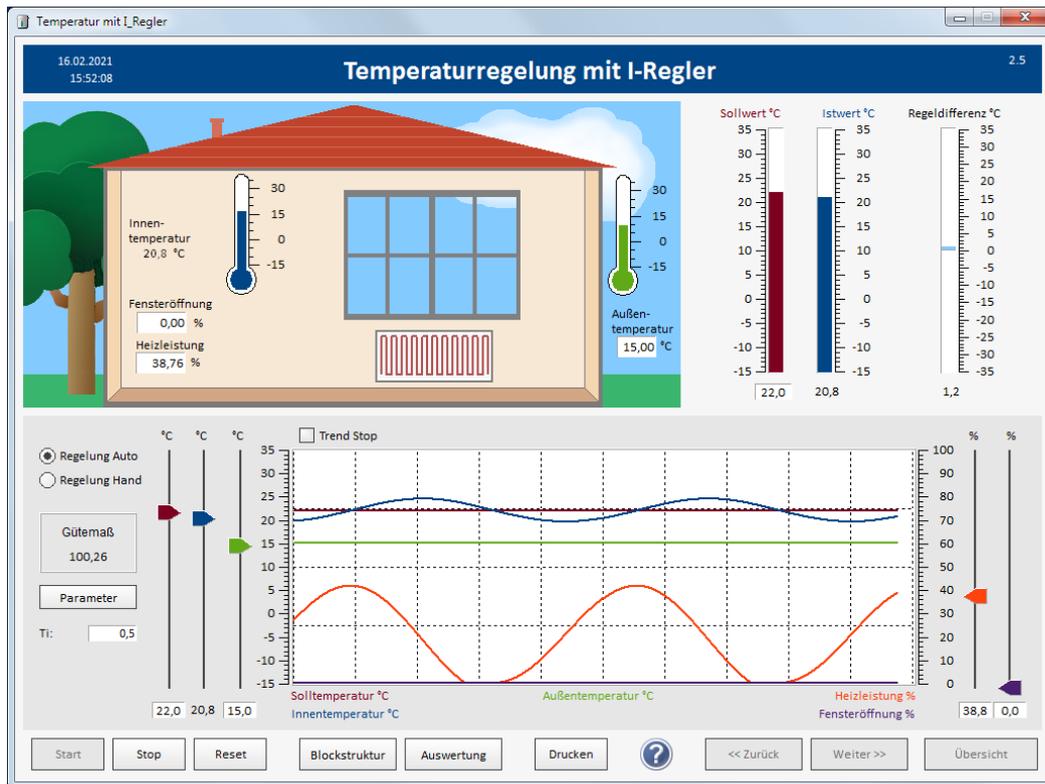
Aufgabe 11:

Drücken Sie „Reset“ oder starten Sie die Temperaturregelung mit dem I-Regler neu.

Der Istwert (Regelgröße) und der Sollwert (Führungsgröße) haben wieder den gleichen Wert 15°C. Deshalb muss nicht geheizt werden. Der Regler gibt als Heizleistung (Stellsignal) 0% aus.

Verändern Sie die eingestellte Integrationszeit T_i auf 0,5.

Stellen Sie den Sollwert auf 22°C und beobachten Sie den Regelkreis.



Der Regelkreis wird instabil. Der Istwert schwingt dauerhaft um den Sollwert.

Info:

Wenn ein I-Anteil (Integrator) im Regler vorhanden ist, schafft es der Regler entweder den Istwert nach einer Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen oder der Regelkreis wird instabil.

Dies erklärt sich aus dem Verhalten des Integrators:

Wenn der Wert des Eingangssignals in einen Integrator positiv ist, steigt der Wert des Ausgangssignals (Stellsignal). Ist das Eingangssignal gleich Null, behält der Integrator seinen Ausgangswert bei (der Wert bleibt konstant). Ist der Eingangswert negativ, nimmt der Ausgangswert des Integrators kontinuierlich ab.

Damit ein Regelkreis auf einen Wert einschwingt, muss das Stellsignal (Ausgang des Reglers) konstant sein. Der Ausgangswert eines Integrators ist nur dann konstant, wenn der Eingangswert des Integrators gleich Null ist, also wenn Sollwert und Istwert gleich sind.

3.2.4 Regelung mit PI-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 2.6 „Regelung mit PI-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

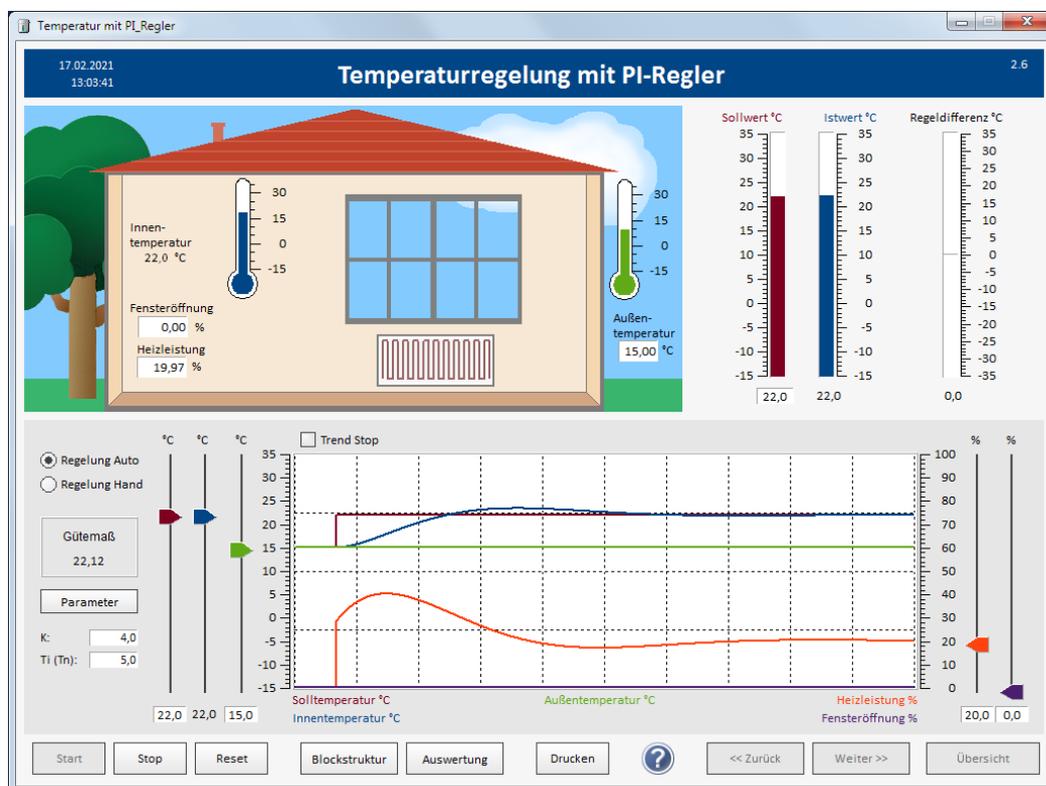
Aufgabe 12:

Da der Istwert (Regelgröße) und der Sollwert (Führungsgröße) den gleichen Wert 15°C haben, muss nicht geheizt werden. Der Regler gibt deshalb als Stellsignal (Heizleistung) 0% aus.

Behalten Sie die eingestellten Parameter bei: $K = 4$, $T_i = 5$.

Verändern Sie den Sollwert von 15°C auf 22°C.

Beobachten Sie das Einschwingverhalten.



Der Regelkreis mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern schwingt mit einem kleinen Überschwinger auf den Sollwert ein. Der Istwert (Regelgröße) erreicht den Sollwert (Führungsgröße).

Info:

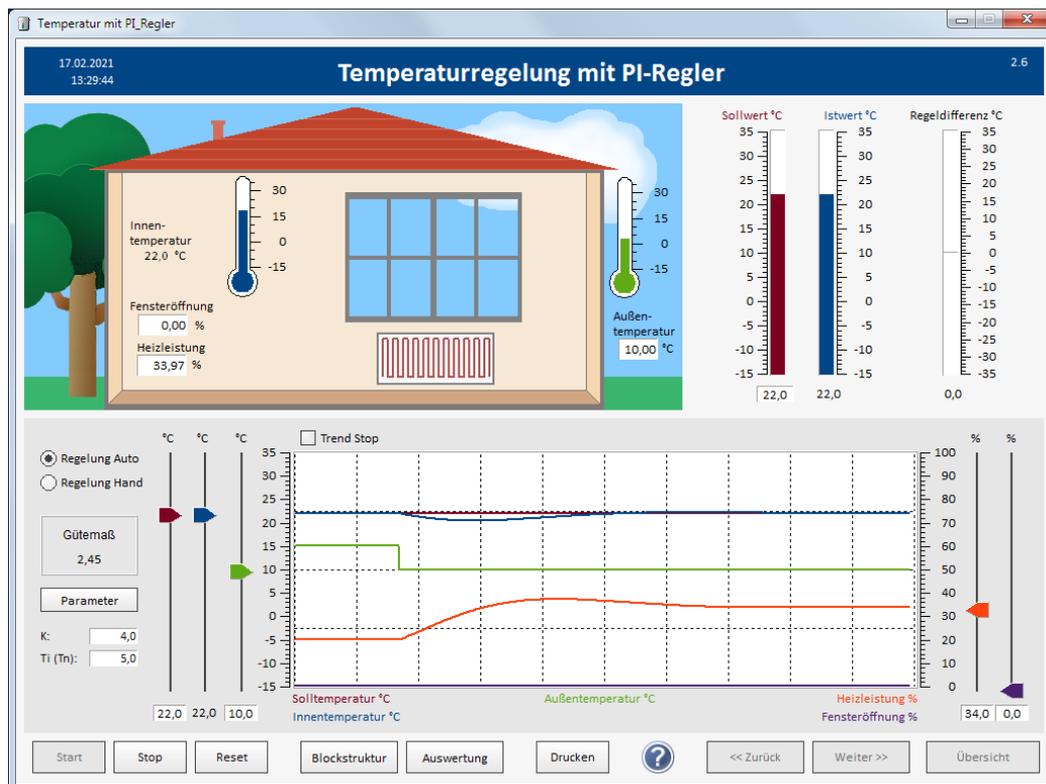
Wird der Sollwert verstellt und wird versucht den Istwert (Regelgröße) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen, spricht man vom Führungsverhalten.

Aufgabe 13:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Lassen Sie den Regelkreis wieder mit den Parametern $K = 4$ und $T_i = 5$ auf den Sollwert 22°C einschwingen.

Wenn der Regelkreis eingeschwungen ist, verändern Sie die Außentemperatur auf 10°C und beobachten Sie das Verhalten.



Die niedrigere Außentemperatur bewirkt ein Absinken der Zimmertemperatur. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und erhöht die Heizleistung. Nach einer Einschwingphase erreicht der Istwert wieder den Sollwert.

Info:

Bei der Reaktion auf eine Störung des Systems spricht man vom Störverhalten beim Regelkreis.

Aufgabe 14:

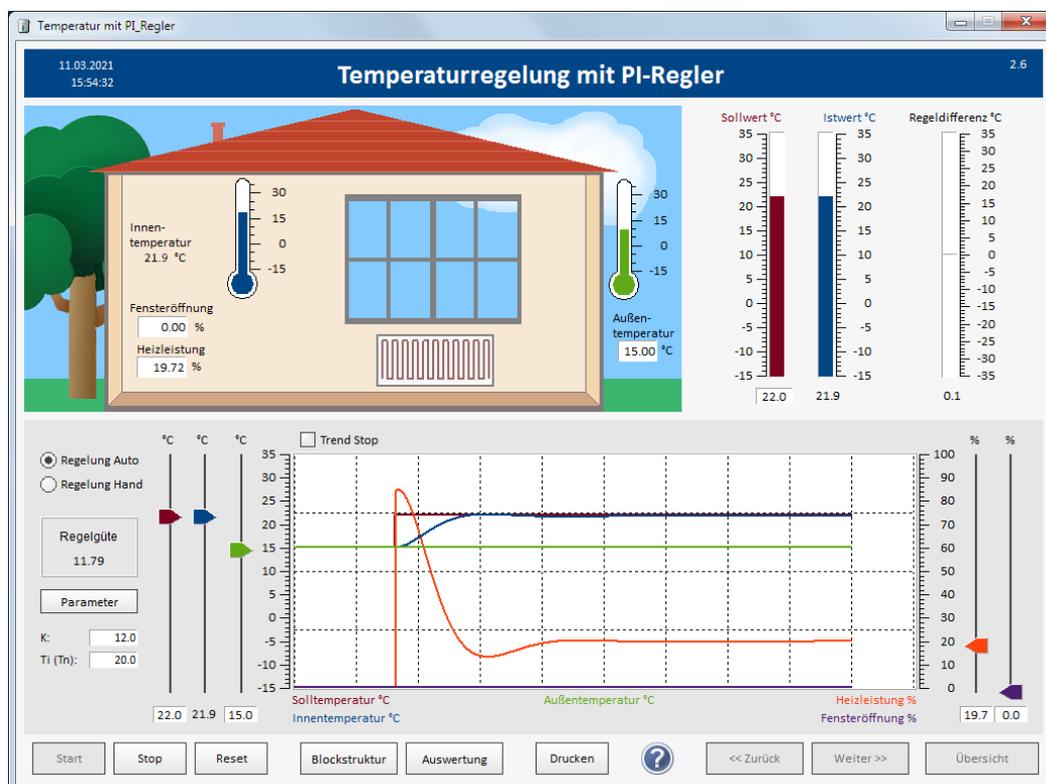
Die in dem Kasten mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwingenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl wird, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwingen und der Istwert hat den Sollwert erreicht.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Mit den Reglerparametern $K = 4$ und $T_i = 5$ wurde eine Regelgüte von 22,12 erreicht.

Damit die Regelgüte bei den Versuchen vergleichbar ist, müssen alle Versuche mit den gleichen Anfangszuständen gestartet werden. Hierfür drücken Sie am besten „Reset“. Damit erhalten Sollwert, Außentemperatur und Innentemperatur wieder den Wert 15°C und das Fenster ist geschlossen.

Verändern Sie jetzt die Reglerparameter und verstellen Sie dann den Sollwert auf 22°C. Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwingen ist.



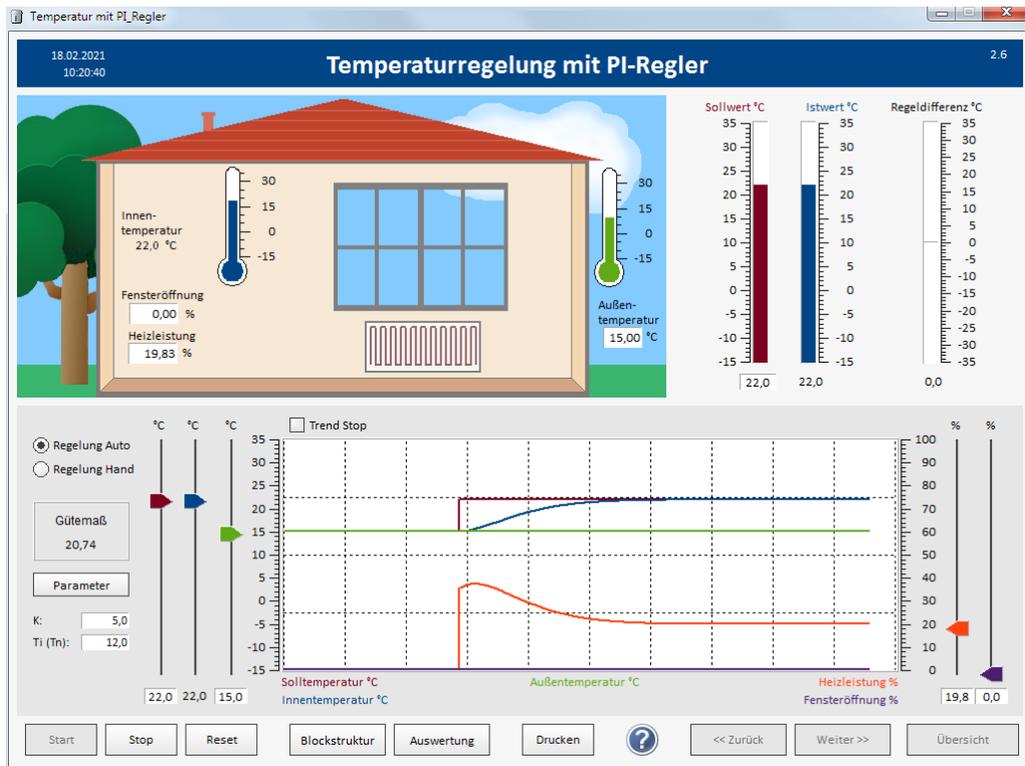
Mit den eingestellten Parametern $K = 12$ und $T_i = 20$ erhält man zum Beispiel eine Regelgüte von 11,8.

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- Reset drücken,
- Reglerparameter einstellen,
- Sollwert auf 22°C stellen,
- Warten bis der Regelkreis eingeschwingen ist.

Starten Sie die Temperaturregelung mit dem PI-Regler neu oder drücken Sie „Reset“.
Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter zu erreichen, dass der Istwert ohne Überschwingen den Sollwert erreicht. In diesem Fall spricht man von einem aperiodischen Fall (ohne Überschwingen).

Gehen Sie wieder vom Anfangszustand aus (Reset), verstellen Sie die Parameter und verändern Sie dann den Sollwert auf 22°C.



Mit den Parametern $K = 5$ und $T_i = 12$ erhält man z.B. ein aperiodisches Verhalten.

Für bestimmte Regelungen kann es wichtig sein, dass der Istwert den Sollwert ohne Überschwingen erreicht.

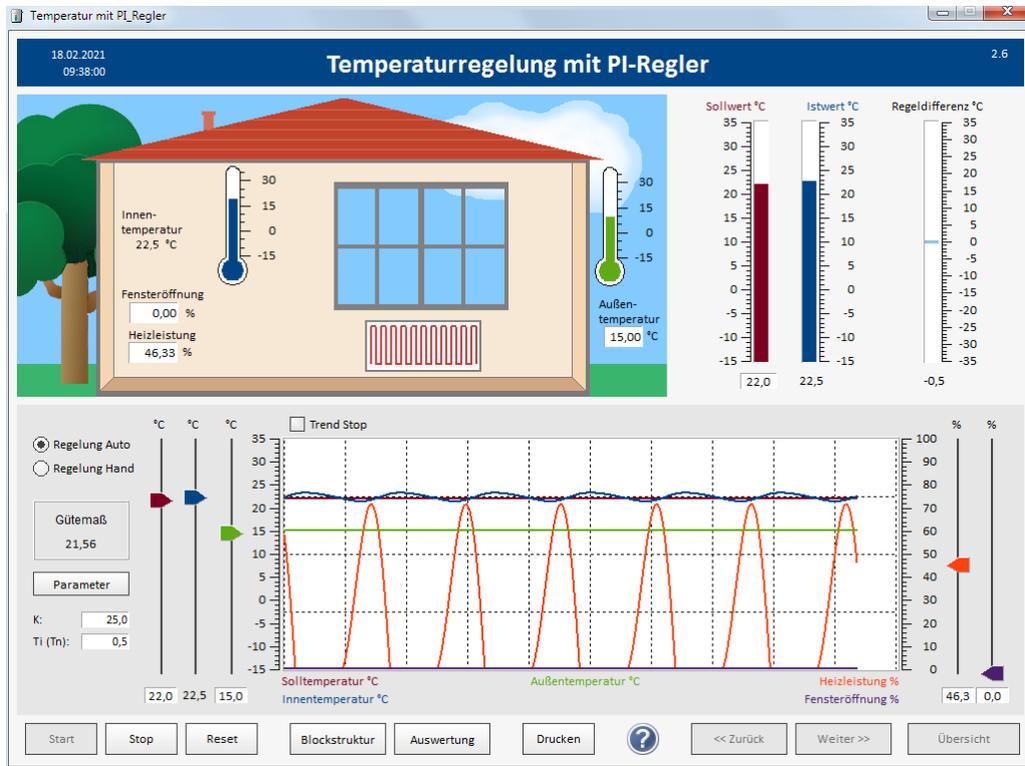
Z.B. kann es für einen Bioreaktor notwendig sein, dass eine bestimmte Temperatur nicht überschritten wird, weil sonst die Zellen im Reaktor absterben können.

Aufgabe 15:

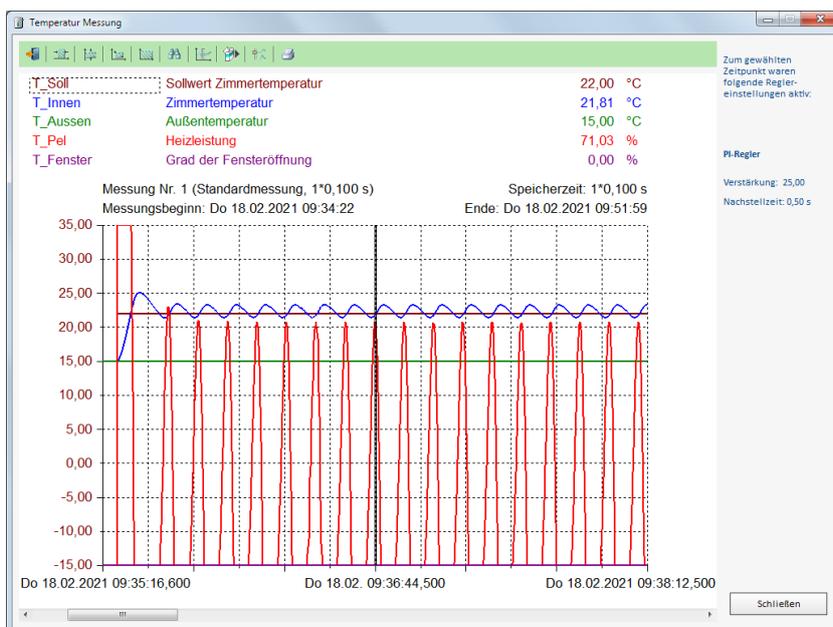
Starten Sie die Temperaturregelung mit PI-Regler neu oder drücken Sie „Reset“.

Stellen Sie als Parameter ein: $K = 25$, $T_i = 0,5$, ändern Sie den Sollwert auf 22°C .

Beobachten Sie den Regelkreis.



Der Regelkreis wird instabil. Der Istwert schwingt dauerhaft um den Sollwert.



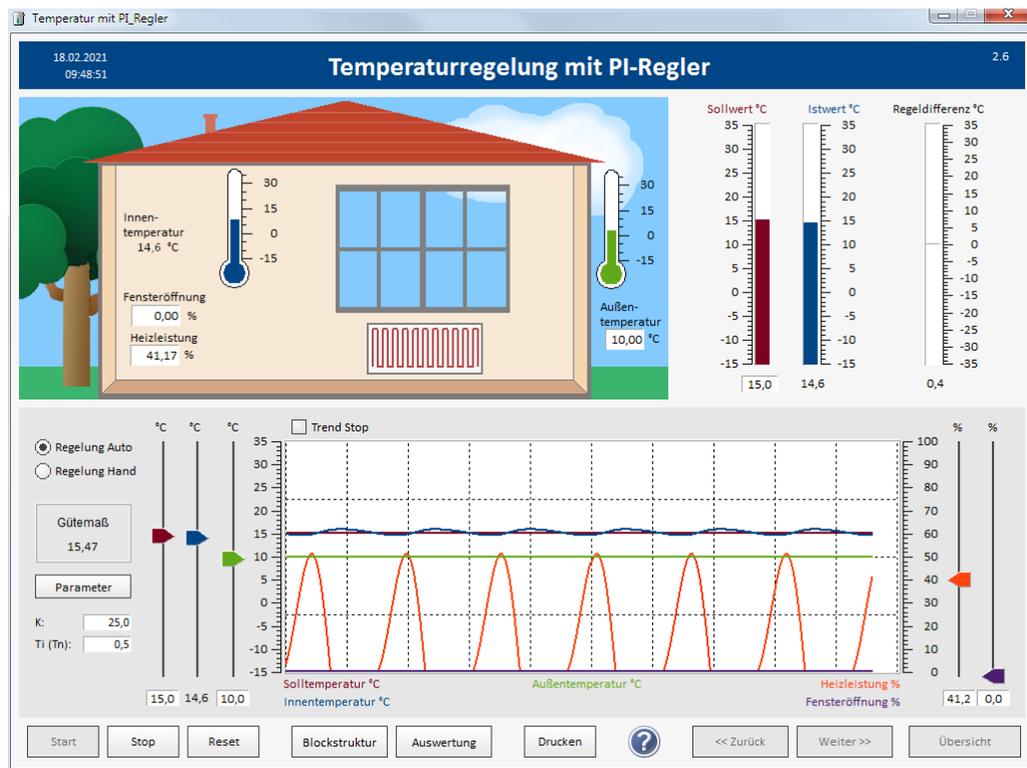
Durch Drücken von „Auswertung“ haben Sie die Möglichkeit, die gespeicherten Signalverläufe auszuwerten und das Einschwingverhalten zu untersuchen.

Aufgabe 16:

In der obigen Aufgabe wurde das Führungsverhalten mit den Parametern Verstärkung $K_p = 25$ und der Nachstellzeit $T_i = 0,5s$ untersucht.

Untersuchen Sie nun das Störverhalten mit diesen Parametern.

Hierfür müssen Sie wieder „Reset“ drücken, die Reglerparameter einstellen und dann z.B. die Außentemperatur von 15°C auf 10°C stellen.



Auch für das Störverhalten wird der Regelkreis mit diesen Parametern instabil.

Als Fazit lässt sich sagen:

- Mit dem PI-Regler und entsprechend gut eingestellten Reglerparametern lässt sich der Regelkreis gut und schnell ausregeln, der Istwert erreicht den Sollwert und bleibt auf dem Sollwert.
- Das gilt für das Führungsverhalten wie für das Störverhalten.
- Mit falsch eingestellten Parametern kann der Regelkreis auch instabil werden.

3.2.5 Regelung mit PID-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 2.7 „Regelung mit PID-Regler“.

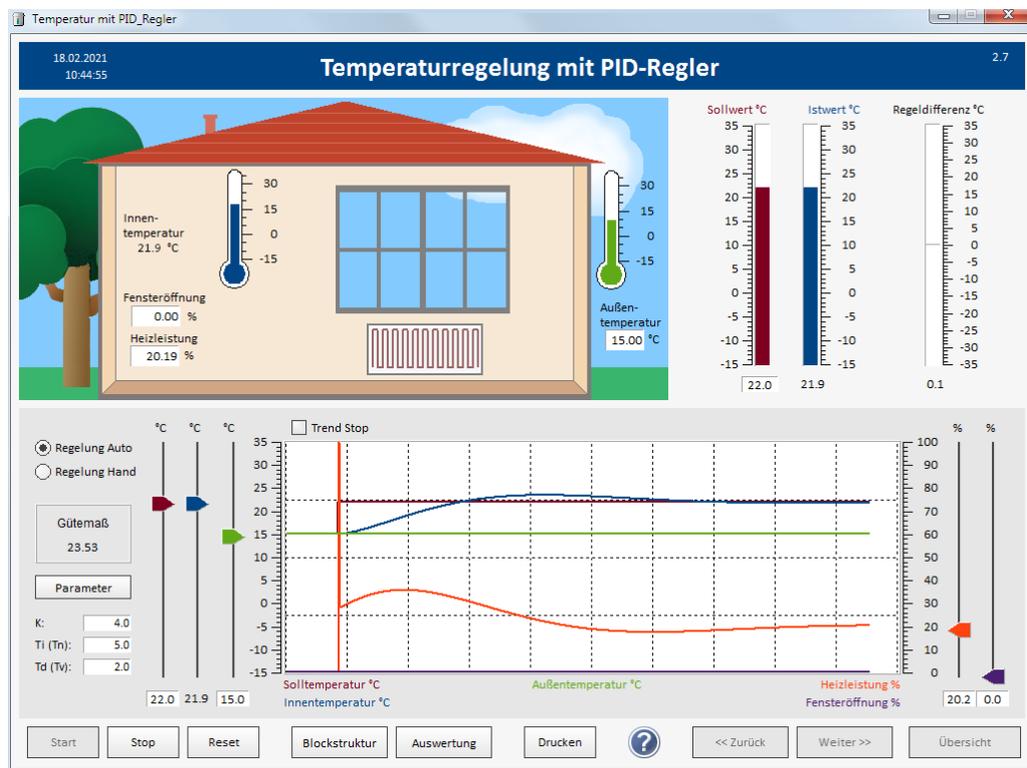
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 17:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 4$, Nachstellzeit $T_i = 5$, Vorhaltezeit $T_d = 2$

Drücken Sie „Reset“ und ändern den Sollwert auf 22°C.



Der Regelkreis geht mit einem kleinen Überschwinger in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals (Heizleistung). Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Die Regelgüte geht auf 24,3 und ist damit schlechter als beim PI-Regler mit den Parametern $K = 4$ und $T_i = 5$.

Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

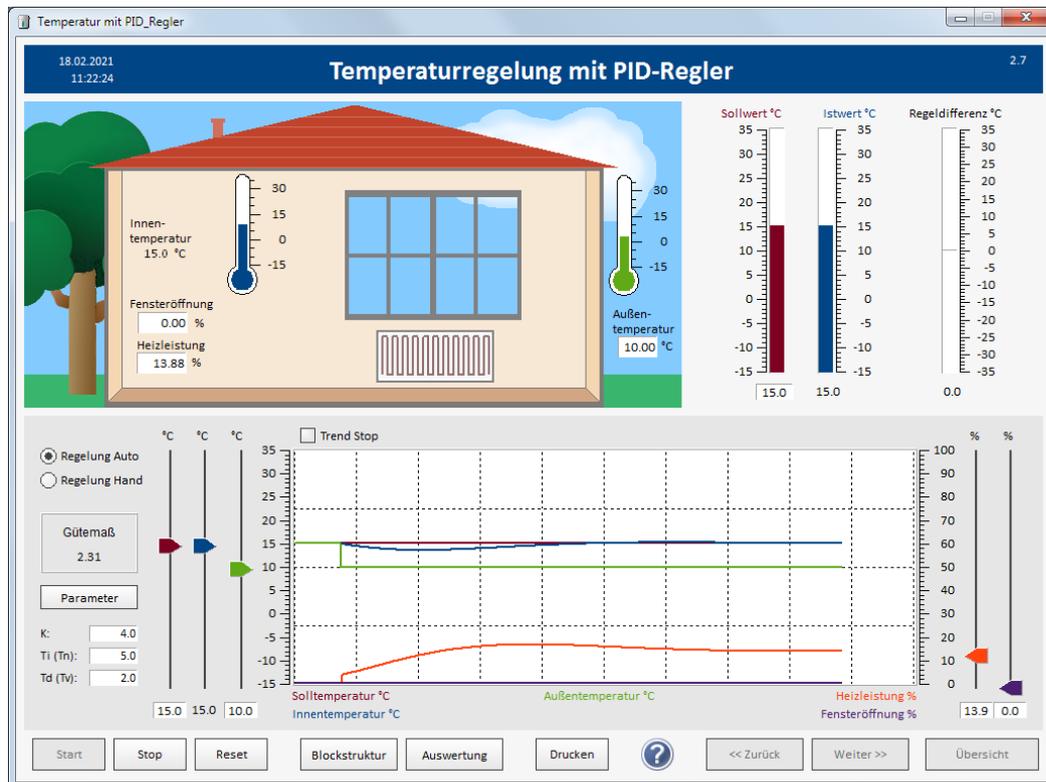
In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

Aufgabe 18:

Untersuchen Sie das Störverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 4$, Nachstellzeit $T_i = 5$, Vorhaltezeit $T_d = 2$

Drücken Sie „Reset“ und ändern Sie die Außentemperatur auf 10°C .

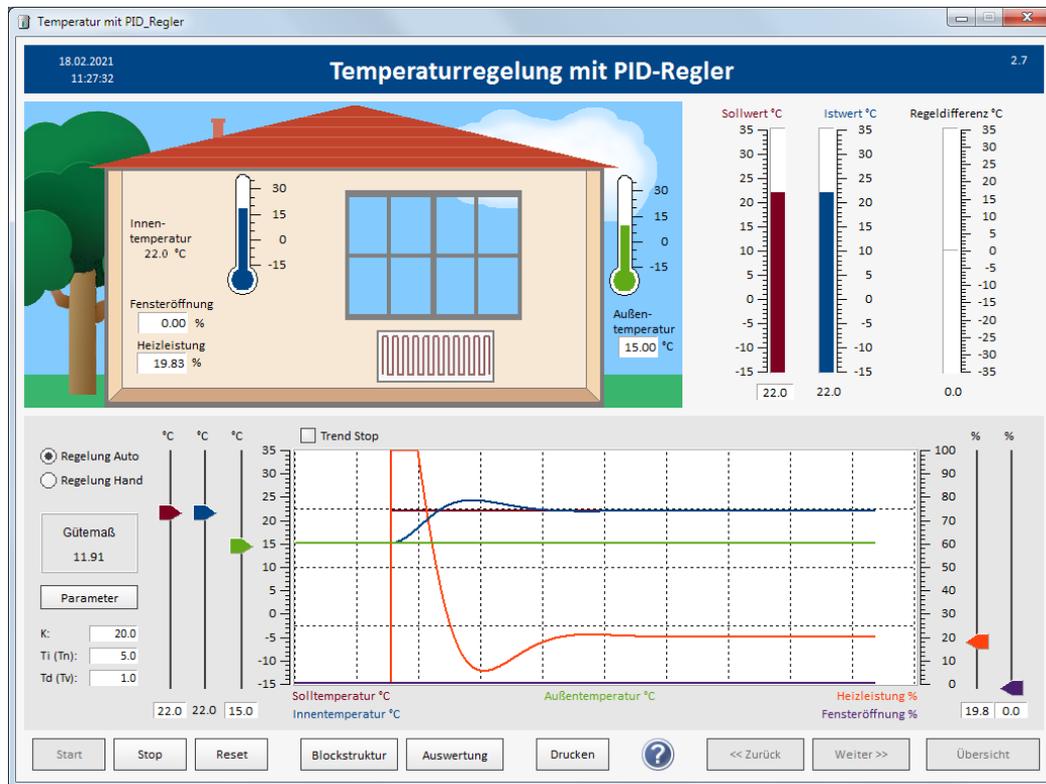


Auch beim Störverhalten wird mit den vorgegebenen Reglerparametern der Regelkreis ausgeglet. Der Istwert (Regelgröße) erreicht nach einer Zeitspanne wieder den Sollwert (Führungsgröße).

Aufgabe 19:

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter die Regelgüte zu verbessern.

Damit Sie die Versuche vergleichen können, müssen Sie immer von den gleichen Anfangszuständen ausgehen. Drücken Sie deshalb „Reset“, verändern Sie die Reglerparameter und verstellen dann den Sollwert auf 22°C.



Mit den Reglerparametern $K = 20$, $T_i = 5$ und $T_d = 1$ erhalten Sie z.B. eine Regelgüte von 12,25.

Die Versuche, die mit dem PI-Regler durchgeführt wurden, lassen sich auch mit dem PID-Regler durchführen (instabiles Verhalten, aperiodisches Verhalten, etc.).

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

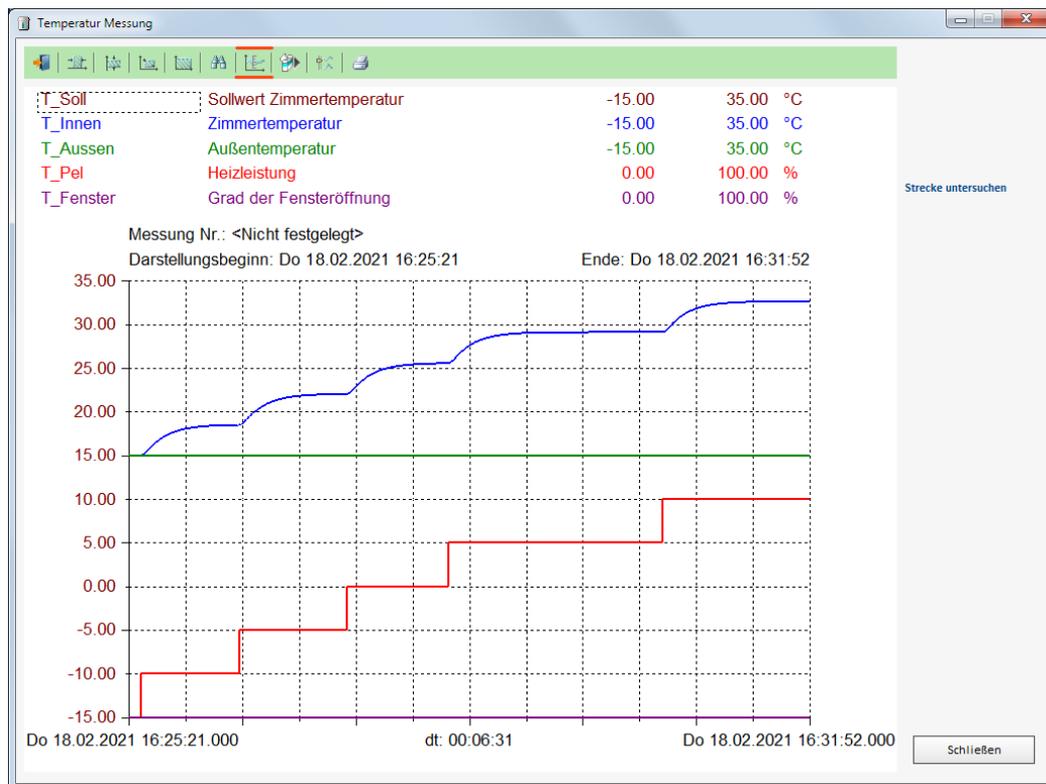
3.3 Strecke untersuchen

Wählen Sie bei der Zimmertemperaturregelung den Punkt 2.3 „Strecke untersuchen“.

Aufgabe 20:

Erhöhen Sie die Heizleistung jeweils um 10% und warten Sie bis die Innentemperatur sich nicht mehr ändert.

Beobachten Sie das Temperaturverhalten.



Wie aus den aufgezeichneten Daten („Auswertung“) zu ersehen ist, ist das Streckenverhalten bei den Sprüngen ähnlich. Die Isttemperatur steigt beim Sprung der Heizleistung um 10% immer ca. um 3,5°C. Dies muss bei einer Regelstrecke nicht immer der Fall sein.

Bei vielen Regelstrecken ist das Verhalten abhängig vom Arbeitspunkt. Das bedeutet, die Regelungen werden sich bei gleichem Regler und gleichen Reglerparametern in verschiedenen Arbeitspunkten unterschiedlich verhalten.

3.4 Reglereinstellverfahren

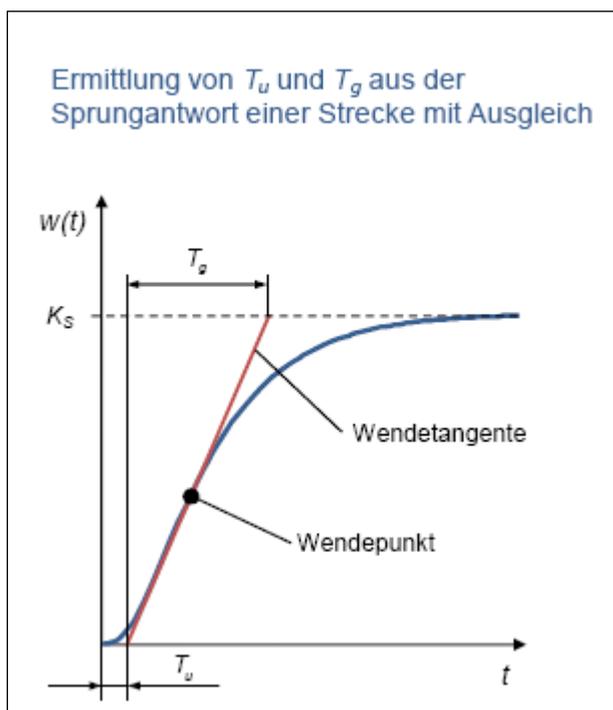
Die Zimmertemperaturstrecke ist eine Strecke mit Ausgleich.

Eine Strecke mit Ausgleich schwingt bei einer sprungartigen Änderung des Stellwertes nach einer endlichen Zeit auf einen konstanten Wert ein, während bei einer Strecke ohne Ausgleich die Regelgröße (Istwert) immer weiter steigt.

Das Verhalten der Temperatur in einem Zimmer ist eine Strecke mit Ausgleich, da beim sprungartigen Verstellen der Heizleistung, die Temperatur nach einer gewissen Zeit wieder einen festen Wert annimmt (Außentemperatur und Fensteröffnung bleiben konstant), wie unter Punkt 3.3 zu sehen war.

Als Reglereinstellverfahren soll das Verfahren nach Chien/Hrones/Reswick für Strecken mit Ausgleich genutzt werden.

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



Aus dieser Sprungantwort können die Parameter K_S , T_g und T_u bestimmt werden, wie in dem obigen Bild dargestellt. Die Regelstreckenverstärkung K_S (Endwert der Regelgröße) 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 Höhe des Stellwertes teilen, um K_S zu erhalten.

Es bedeuten:

$T_e = T_u =$ Verzugszeit

$T_b = T_g =$ Ausgleichszeit

K_s = Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich

Mithilfe dieser drei Parameter lassen sich dann die Reglerparameter aus der Einstelltabelle nach Chien/Hrones/Reswick bestimmen:

Tabelle 1: Gleichungen zur Berechnung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick

Regler- verhalten	Gütekriterium			
	Mit 20 % Überschwungung		Aperiodischer Regelvorgang	
	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.

Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg

Aufgabe 21:

Wählen Sie bei der Zimmertemperaturregelung den Punkt 2.3 „Strecke untersuchen“.

Drücken Sie „Start“. Geben Sie einen Sprung der Heizleistung von 0% auf 10% vor.

Alle Signalverläufe werden gespeichert und können über „Auswertung“ ausgemessen und ausgewertet werden.

Bestimmen Sie die Parameter K_s , T_e (T_U) und T_b (T_g) aus den gespeicherten Signalverläufen.

Durch Klick auf die Schaltfläche „Auswertung“ erhalten Sie die Messkurven. Mithilfe der Buttonleiste im Fenster lassen sich Zeit- und Werteauschnitte wählen.



Versuchen Sie den für die Auswertung interessanten Bereich mit dem Sprung der Heizleistung und dem Einschwingen der Innentemperatur einzustellen.

Sie können dann z.B. das Diagramm ausdrucken und die Kurven mithilfe eines Lineals ausmessen, um T_e und T_b zu bestimmen.

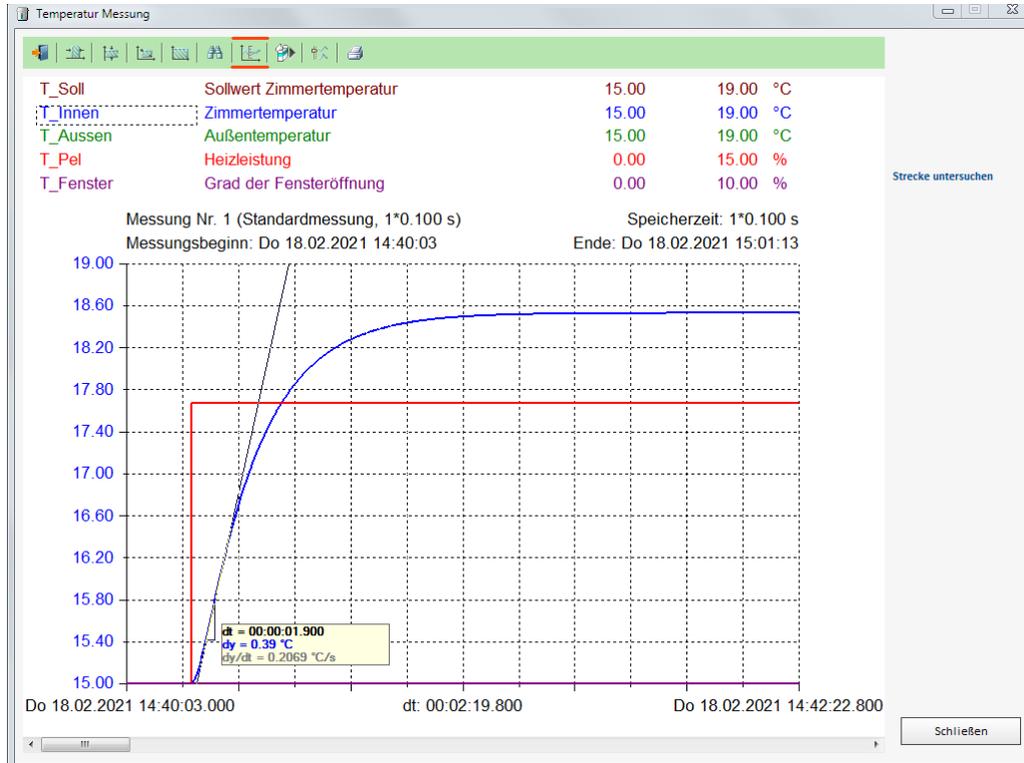


Abbildung 3-1: Messungsansicht zur Auswertung der Strecke

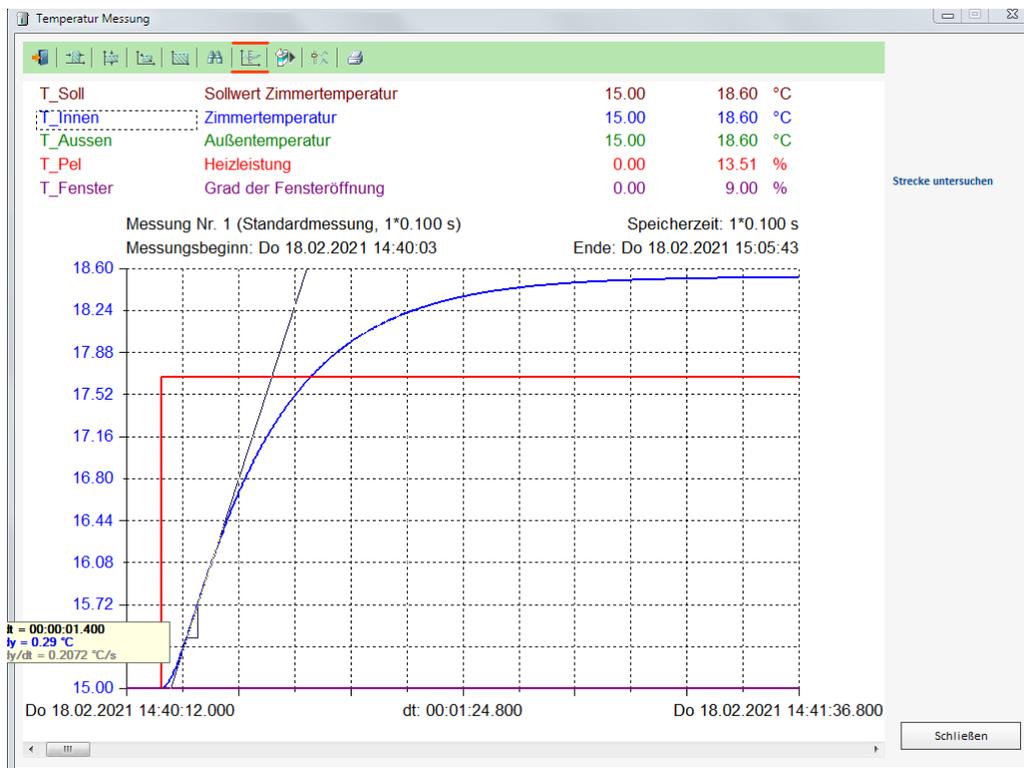


Abbildung 3-2: Auswertung der Strecke durch "klicken und ziehen" in der Messungsansicht

Es besteht auch die Möglichkeit die Werte in dem Diagramm auszumessen. Klicken Sie hierfür im oberen Bereich des Messungsfensters auf das blaue Signal „T_Innen“. Durch Klicken auf die blaue Kurve erhalten Sie den zugehörigen Messwert und Zeitpunkt. Durch Festhalten und Ziehen werden die Zeit- und Wertedifferenz sowie die Steigung angegeben. Damit können Sie versuchen, die Steigung der blauen Kurve im Wendepunkt zu bestimmen.

Aus den oben dargestellten beiden Kurvenverläufen lässt sich für die Steigung der Tangente im Wendepunkt ungefähr der Wert $dx/dt = 0,2^\circ\text{C/s}$ ablesen.

Nach der sprunghaftigen Änderung der Heizleistung von 0% auf 10% geht die Innentemperatur nach der Einschwingphase von 15°C auf $18,5^\circ\text{C}$.

Damit kann die Ausgleichszeit T_g berechnet werden ($T = \text{Isttemperatur}$):

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

$$T_g = (18,5^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) / 0,207^\circ\text{C/s} = 16,91\text{s}$$

Ks ergibt sich aus:

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

$$= (18,5^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) / 10\% = 0,35^\circ\text{C}/\%$$

Die Verzugszeit T_u lässt sich ausmessen und ist ungefähr 1,3s.

Also: $T_e = T_u = 1,3\text{s}$ $T_b = T_g = 17,5\text{s}$ $K_s = 0,35$

Damit ergeben sich aus der Tabelle für den PI-Regler folgende Reglerparameter:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 22,30$$

$$T_n = T_b \quad 16,91$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 13,01$$

$$T_n = 1,2 \cdot T_b \quad 20,29$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 26,02$$

$$T_n = 2,3 \cdot T_e \quad 2,99$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 22,30$$

$$T_n = 4 \cdot T_e \quad 5,20$$

Da sich die Parameter deutlich je nach Anwendungsfall unterscheiden, muss der Anwender entscheiden, welche Art von Regelung für seinen Regelkreis wichtig ist (Stör- oder Führungsverhalten, mit oder ohne Überschwingen).

Eventuell muss der Anwender einen Kompromiss zwischen den Reglerparametern eingehen.

Mit den gewählten Parametern ergeben sich folgende Einschwingverhalten für den PI-Regler mit einem Sollwertsprung von 15°C auf 20°C:

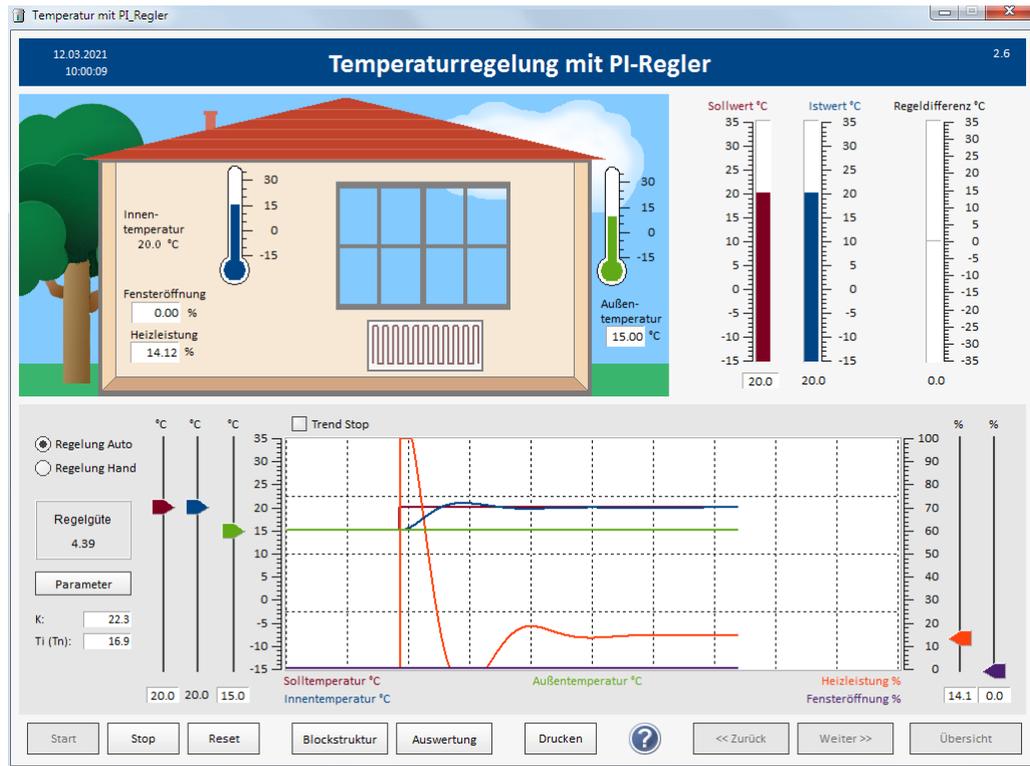


Abbildung 3-3: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

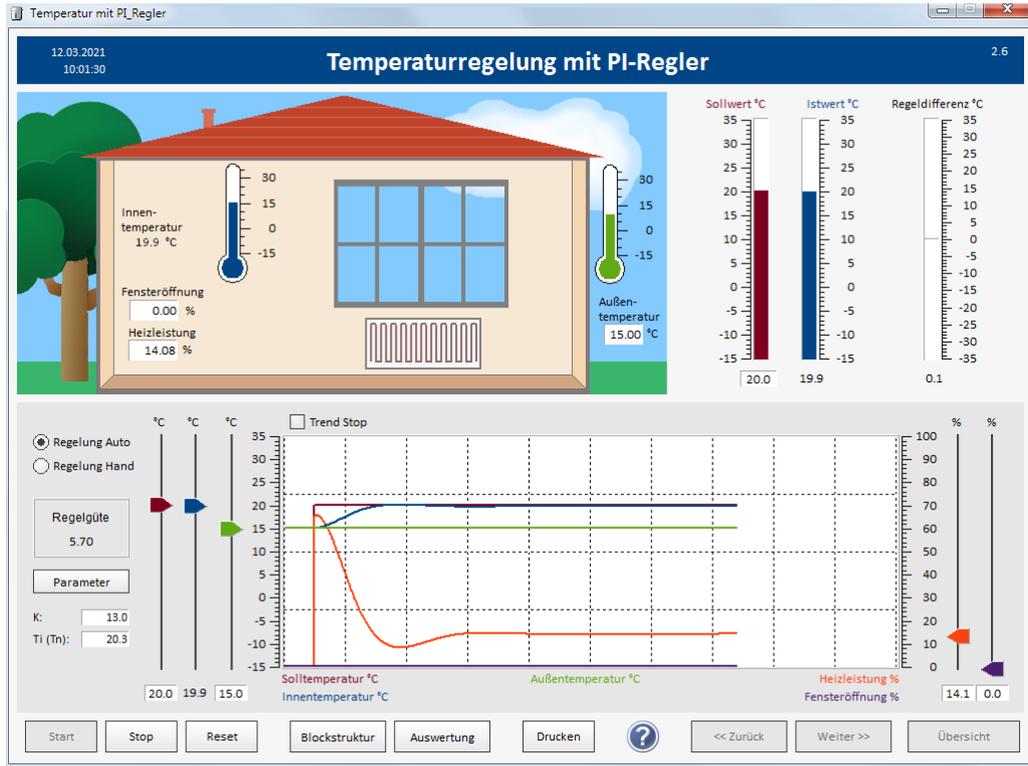


Abbildung 3-4: Führungsverhalten aperiodisch

Für das Störverhalten wurde von einem eingeschwungenen Regelkreis mit Sollwert und Istwert = 20°C ausgegangen. Für die Störung wurde die Außentemperatur von 15°C auf 10°C gesetzt:

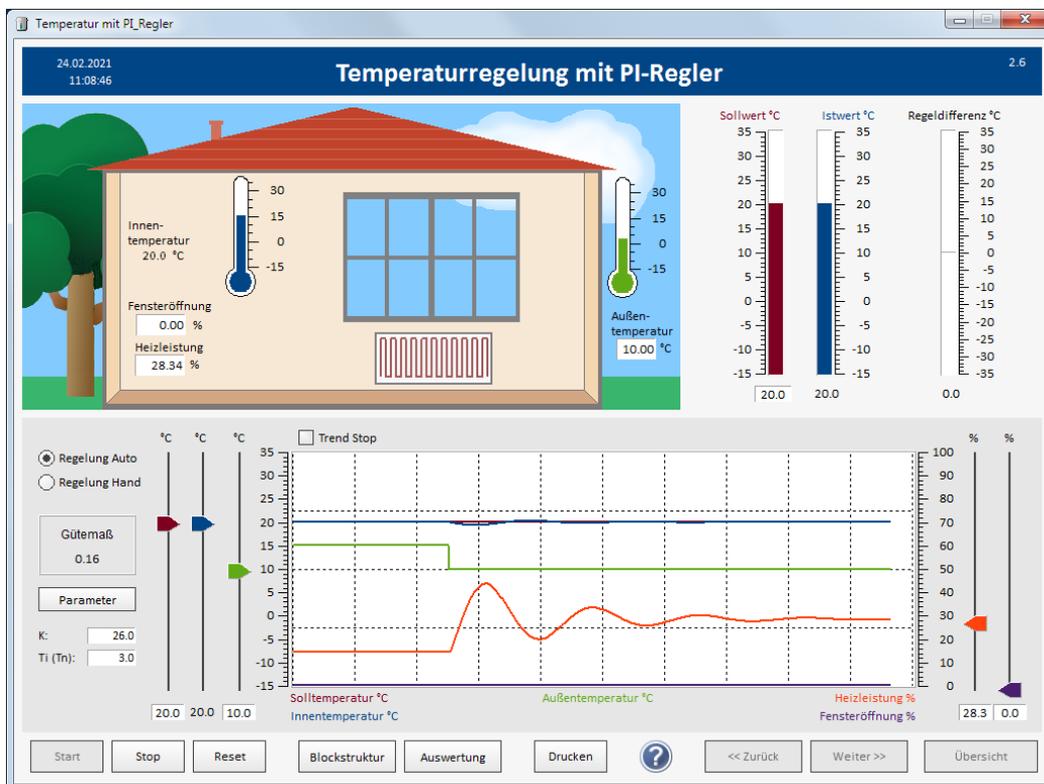


Abbildung 3-5: Störverhalten mit 20% Überschwingen

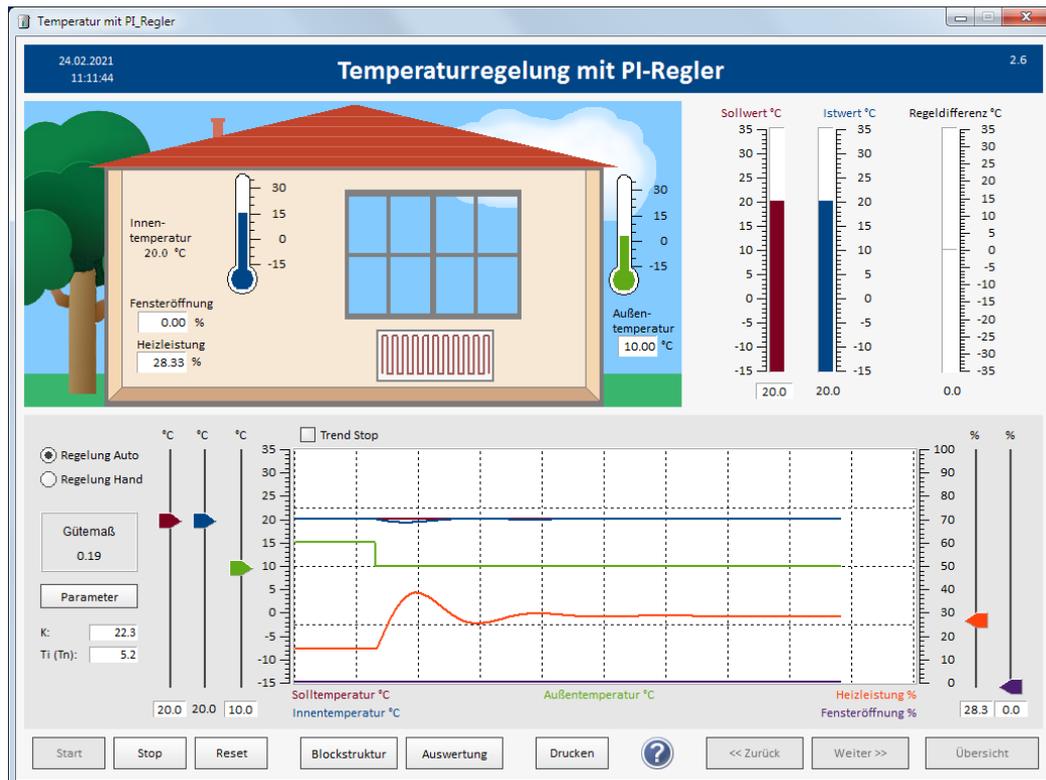


Abbildung 3-6: Störverhalten aperiodisch

Für den PID-Regler ergeben sich folgende Parameter:

PID-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 35,31$$

$$T_n = 1,35 \cdot T_b \quad 22,83$$

$$T_d = 0,47 \cdot T_e \quad 0,61$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 22,30$$

$$T_n = T_b \quad 16,91$$

$$T_d = 0,5 \cdot T_e \quad 0,65$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 1,2 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 44,60$$

$$T_n = 2 \cdot T_e \quad 2,60$$

$$T_d = 0,42 \cdot T_e \quad 0,55$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 35,31$$

$$T_n = 2,4 \cdot T_e \quad 3,12$$

$$T_d = 0,42 \cdot T_e \quad 0,55$$

Auch hier unterscheiden sich die Parameter deutlich je nach Anwendungsfall (Stör- oder Führungsverhalten).

Deshalb muss der Anwender entscheiden, welche Art von Regelung für seinen Regelkreis wichtig ist (Stör- oder Führungsverhalten, mit oder ohne Überschwingen).

Eventuell muss der Anwender einen Kompromiss eingehen und eigene Reglerparametern bestimmen, die für die notwendigen Anwendungen der Regelung geeignet sind.

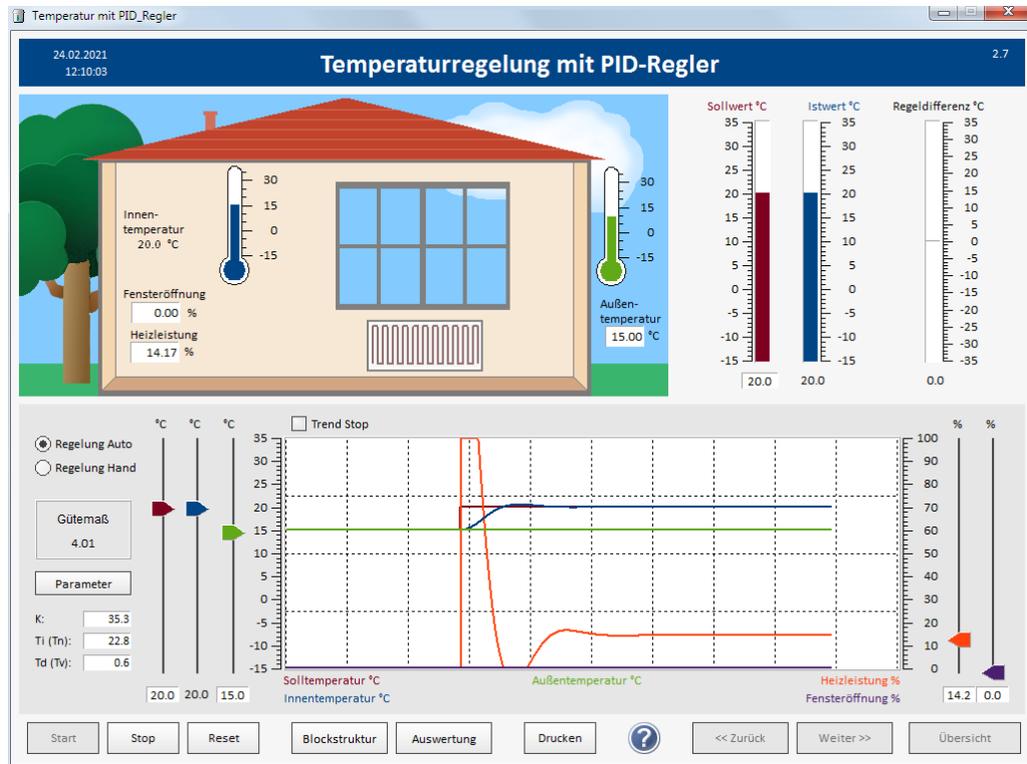


Abbildung 3-7: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

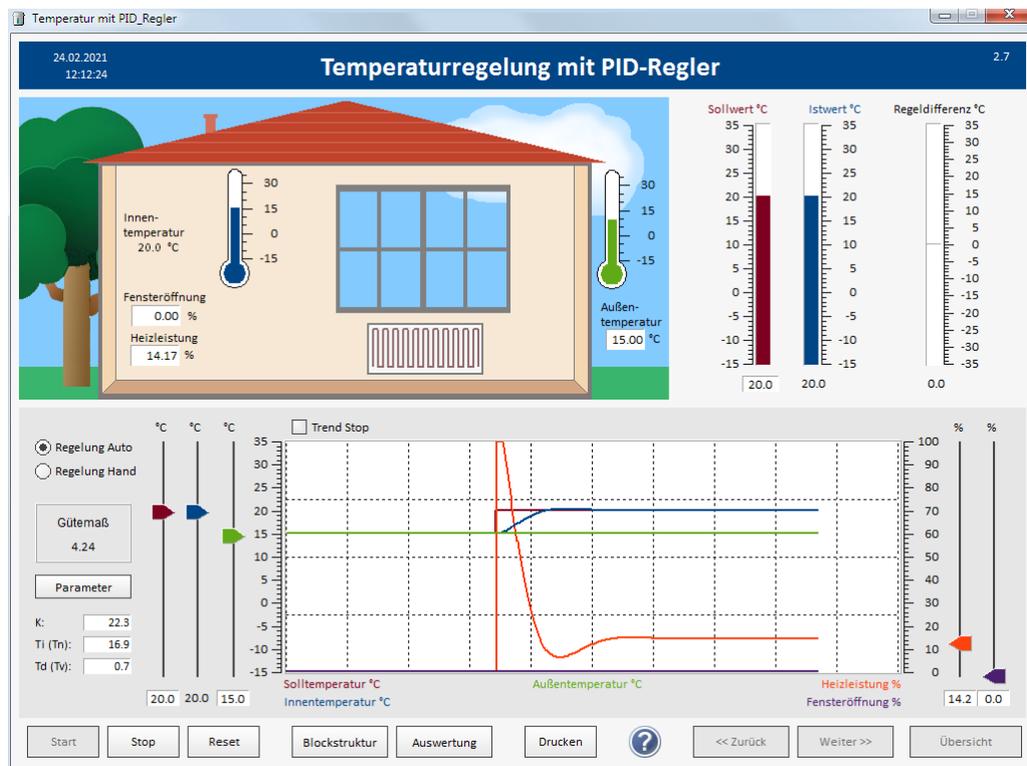


Abbildung 3-8: Führungsverhalten aperiodisch

Bei diesen Einstellungen überschreitet das Stellsignal (rotes Signal) die Bereichsgrenzen von 0% und 100%. Das Stellsignal wird auf 0% bzw. 100% begrenzt. Dies bewirkt natürlich eine Änderung des ursprünglich erwarteten Einschwingverhaltens.

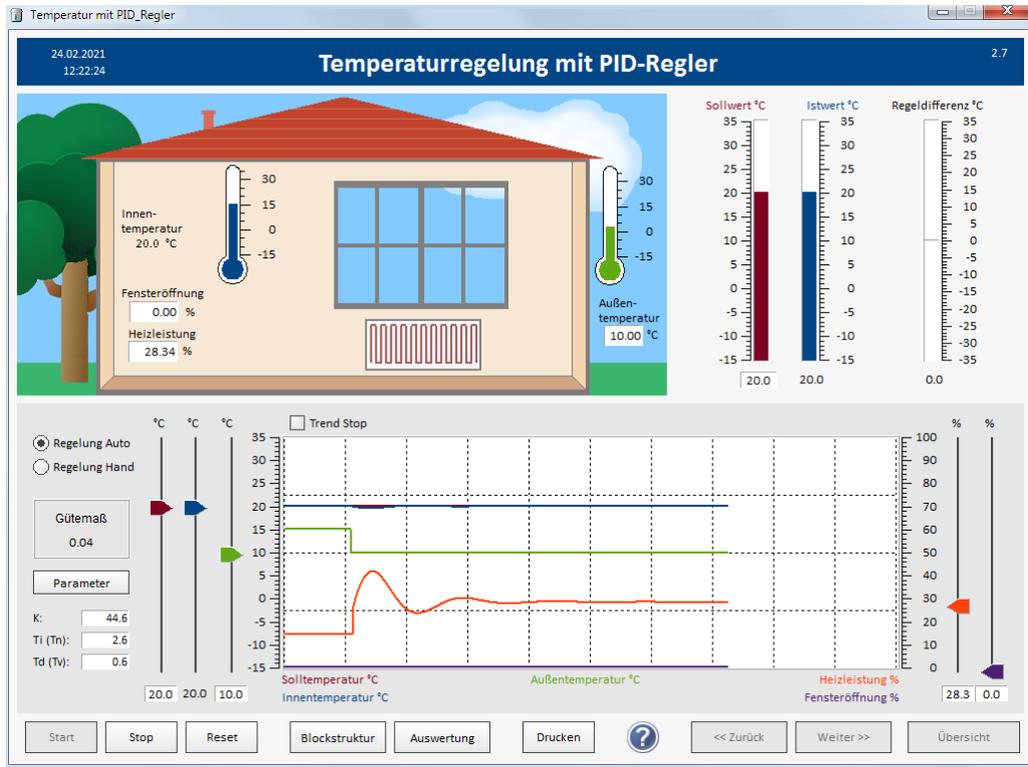


Abbildung 3-9: Störverhalten mit 20% Überschwingen

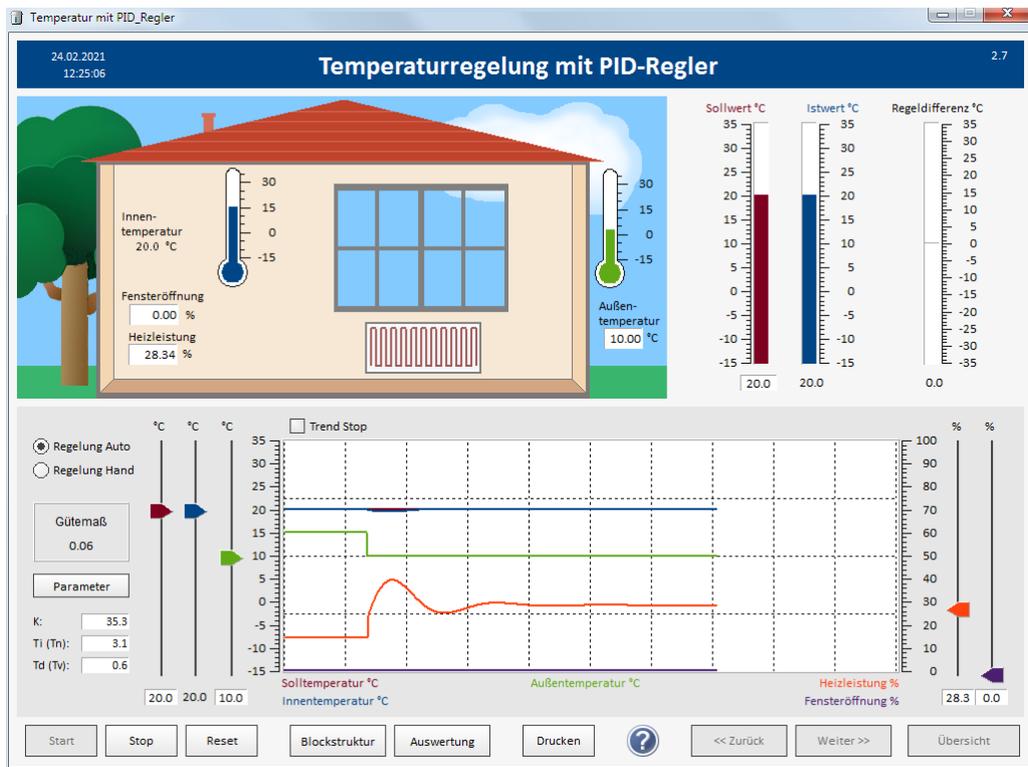


Abbildung 3-10: Störverhalten aperiodisch

3.5 Beurteilung Reglereinstellverfahren

Reglereinstellverfahren sind empirisch bestimmte Verfahren, die oft geeignet sind, um Daumenwerte für gute Reglerparameter zu berechnen.

Die Einstellungen für die Reglerparameter unterscheiden zwischen Stör- und Führungsverhalten. Es werden unterschiedliche Reglerparameter berechnet.

Will man mit seinen Reglerparametern beide Fälle (Stör- und Führungsverhalten) abdecken, muss man einen Kompromiss zwischen den berechneten Parametern des Störverhaltens und des Führungsverhaltens eingehen.

Die obigen Beispiele zeigen, dass man mit den berechneten Reglerparametern ein vernünftiges Regelkreisverhalten erhält. Allerdings entspricht das Verhalten nicht genau dem Einschwingverhalten, wie es in der Tabelle gewählt wurde.

Dass das System nicht genau aperiodisch bzw. mit 20% Überschwingen eingeschungen ist, liegt auch daran, dass das Stellsignal teilweise in die Begrenzung gegangen ist und die Zeitkonstanten nicht exakt bestimmt werden konnten.

Aber bei den gezeigten Beispielen und Aufgaben waren die von Chien/Hrones/Reswick vorgeschlagenen Reglerparameter gut geeignet für eine vernünftige Regelung.

4 Füllstandregelung, Regelungstechnisches Praktikum I

Bei der Füllstandstrecke kann über den Zulauf Wasser in einen Behälter gegeben werden. Über den Abfluss fließen immer genau 30l/s ab. Damit entspricht die Strecke einem I-Verhalten (Integrator).

Bei realen Füllstandstrecken ist der Abfluss bei fester Ventilstellung noch abhängig von dem Druck der Wassersäule im Behälter also vom Füllstand. Hier wird ein konstanter Abfluss durch eine Abflussregelung angenommen.

Bei der Strecke der Füllstandregelung des Regelungstechnischen Praktikums I handelt es sich um eine Strecke ohne Ausgleich.

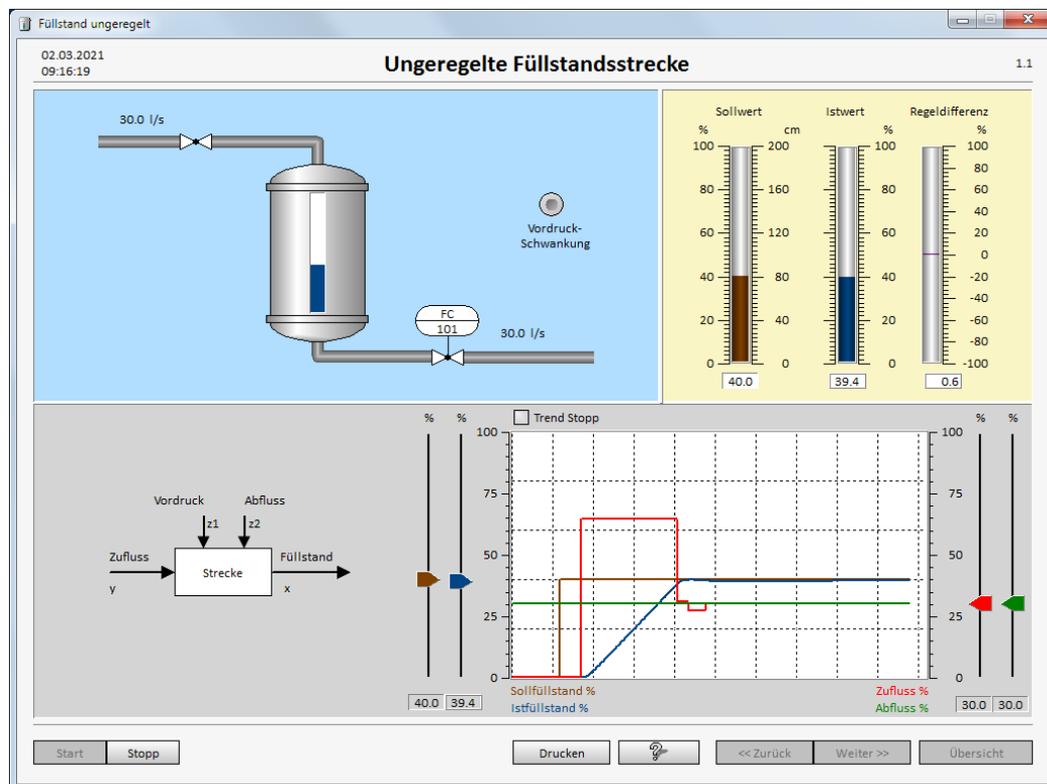
4.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum I den Punkt 1.1 „Ungeregelte Anlage“.

Drücken Sie auf „Start“. Sie können jetzt die Werte für den Sollwert (Sollfüllstand %), das Stellsignal (Zufluss %) sowie das Störsignal (Abfluss %) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

Aufgabe 1:

Stellen Sie den Sollwert (Führungsgröße) auf 40% und versuchen Sie durch Verstellen des Zuflusses (Stellsignal) den Istwert (Regelgröße Istfüllstand) auf den Sollwert (Führungsgröße Sollfüllstand) zu bringen.



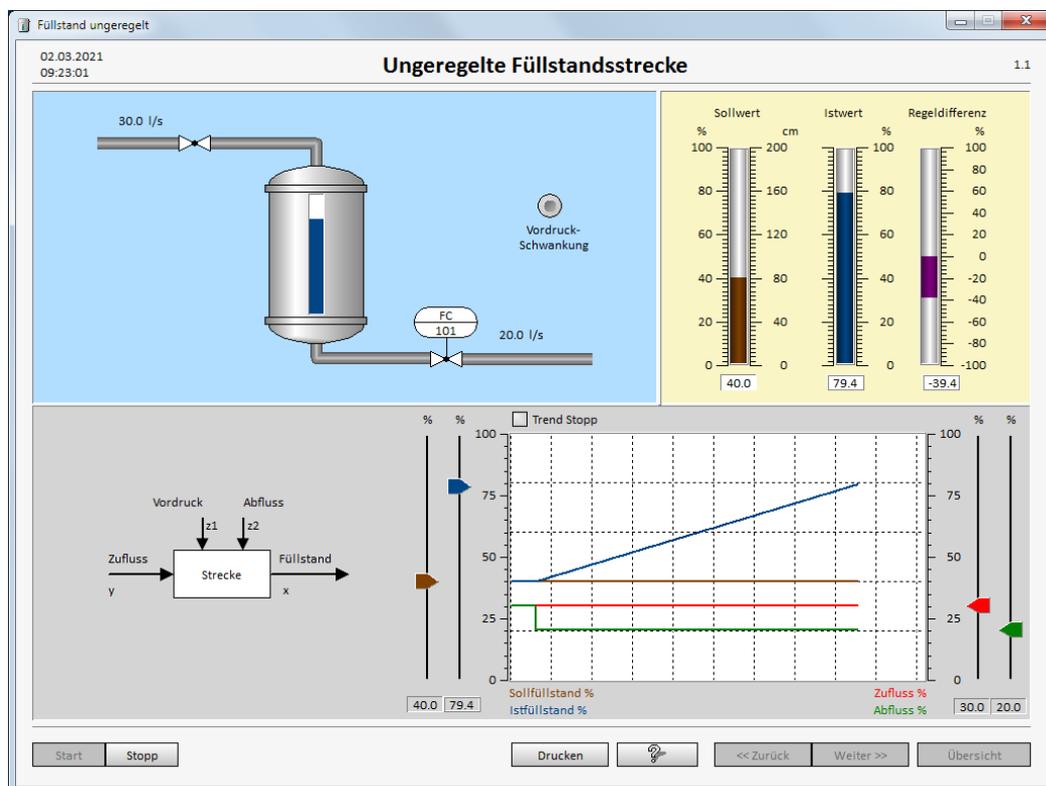
Nur wenn der Zufluss gleich dem Abfluss (30l/s) ist, bleibt der Füllstand konstant. Es muss deshalb versucht werden, den Zufluss auf 30l/s zu stellen, wenn der Istwert den Sollwert erreicht hat.

Bei dieser Regelungsart spricht man vom Führungsverhalten. Der Sollwert wird verstellt, und es wird versucht den Istwert (Regelgröße) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen.

Aufgabe 2:

Verändern Sie den Abfluss auf 20%.

Was passiert?

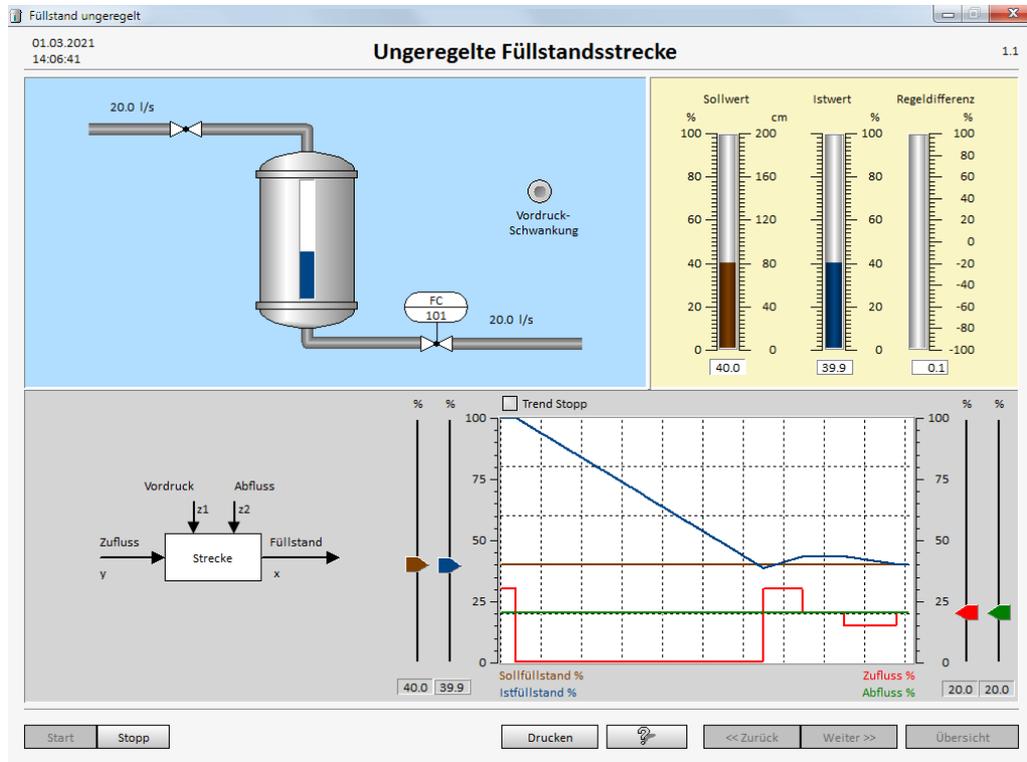


Der Füllstand fängt an kontinuierlich zu steigen, da 10l/s mehr rein- als rausfließen.

(Zufluss = 30l/s, Abfluss = 20l/s)

Aufgabe 3:

Versuchen Sie durch Verstellen des Zuflusses den Füllstand wieder auf den Sollwert von 40% zu bringen.



In diesem Fall wird versucht auf eine Störung zu reagieren (Veränderung des Abflusses). Auch hier muss der Zufluss wieder genau so groß sein wie der Abfluss, damit der Füllstand sich nicht mehr ändert.

Hier spricht man von Störwertregelung (manuell), da versucht wird auf eine Störung (Änderung des Abflusses) zu reagieren.

4.2 Regelkreisuntersuchung

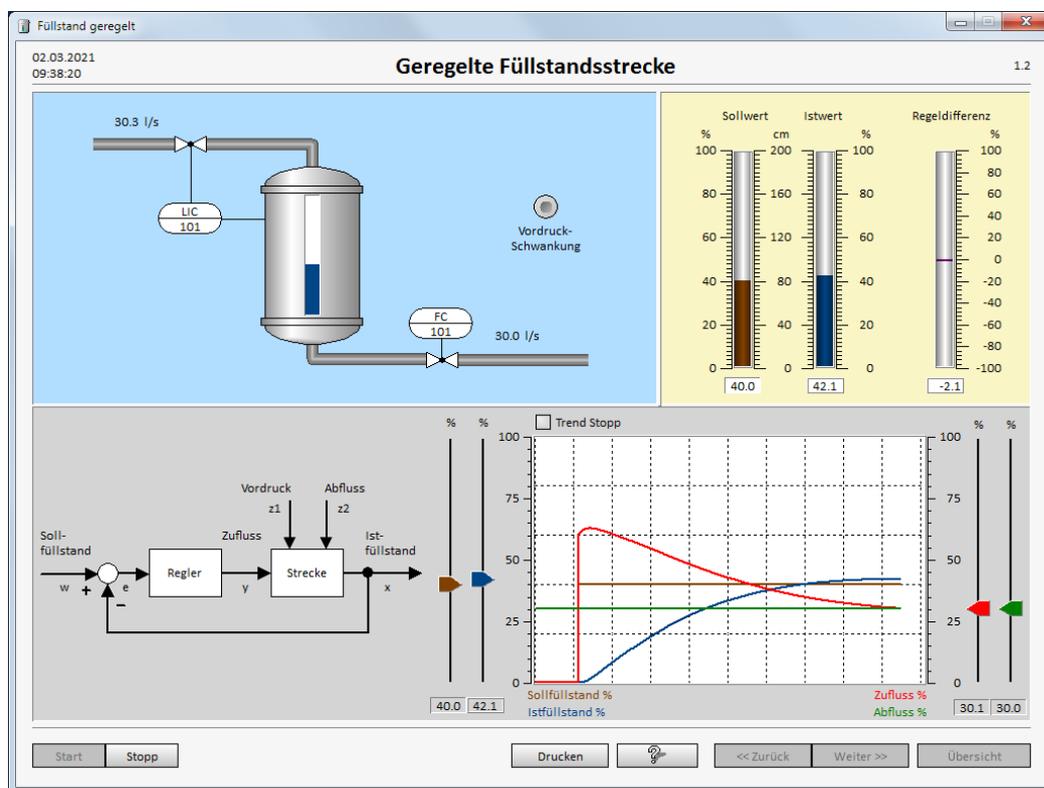
4.2.1 Geregelte Anlage

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 1.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung durch den Benutzer ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 4:

Drücken Sie „Start“ und stellen den Sollwert auf 40%.



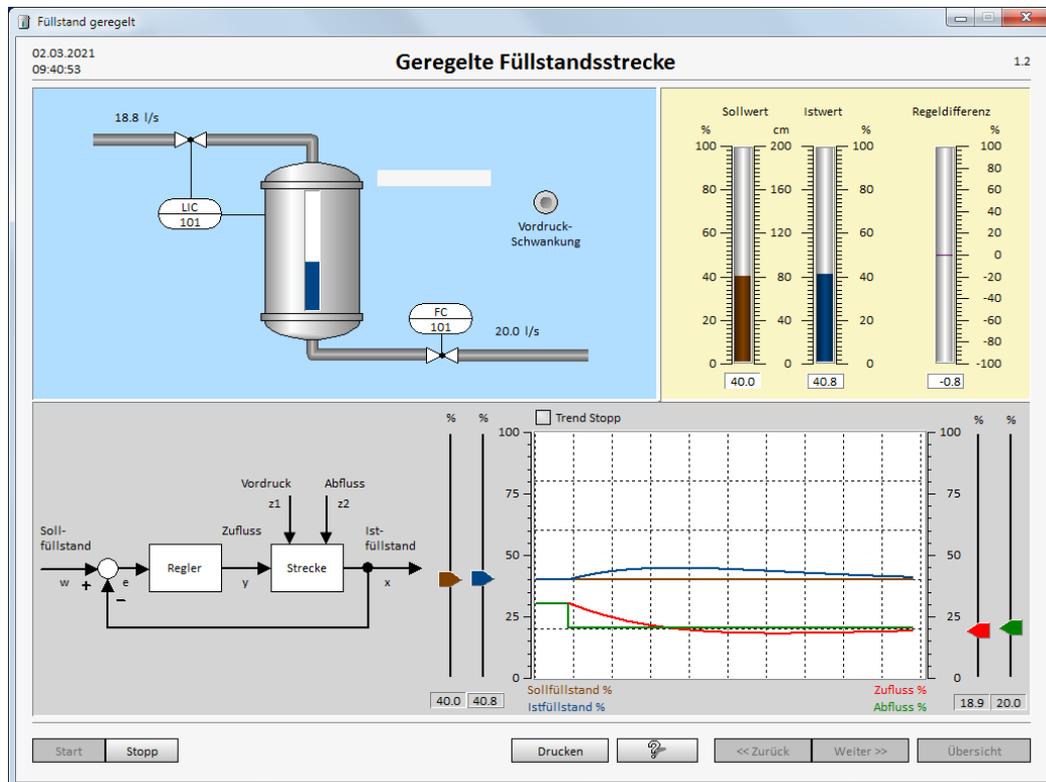
Mit einem kleinen Überschwingen geht der Istwert nach einer gewissen Zeit auf den Sollwert.

Auch wenn Sie eine Störung durch Verändern des Abflusses vorgeben, versucht der Regler, den Istwert wieder auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 5:

Verändern Sie den Abfluss auf 20%.

Was passiert?



Der Füllstand fängt an zu steigen.

Der Regler versucht den Istwert wieder auf den Sollwert zu bringen, in dem er den Zufluss reduziert. Wenn das System eingeschungen ist (der Füllstand ändert sich nicht mehr und der Istwert hat den Sollwert erreicht), muss der Zufluss wieder genauso groß sein wie der Abfluss (20l/s).

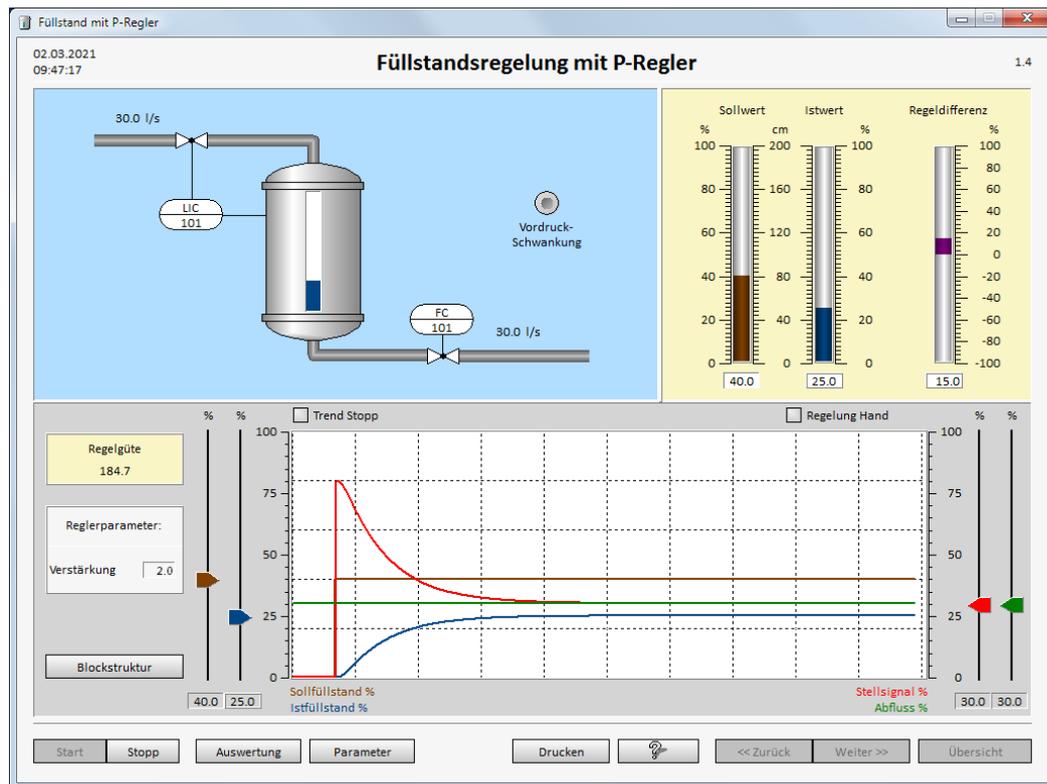
4.2.2 Regelung mit P-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Punkt 1.4 „Regelung mit P-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 6:

Verändern Sie den Sollwert auf 40% und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.



Nach der Einschwingphase ist deutlich zu sehen, dass der Istwert (Regelgröße) den Sollwert (Führungsgröße) nicht erreicht. Wir erhalten eine bleibende Regeldifferenz.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$

Info:

Damit der P-Regler ein Stellsignal (eine Heizleistung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Begründung:

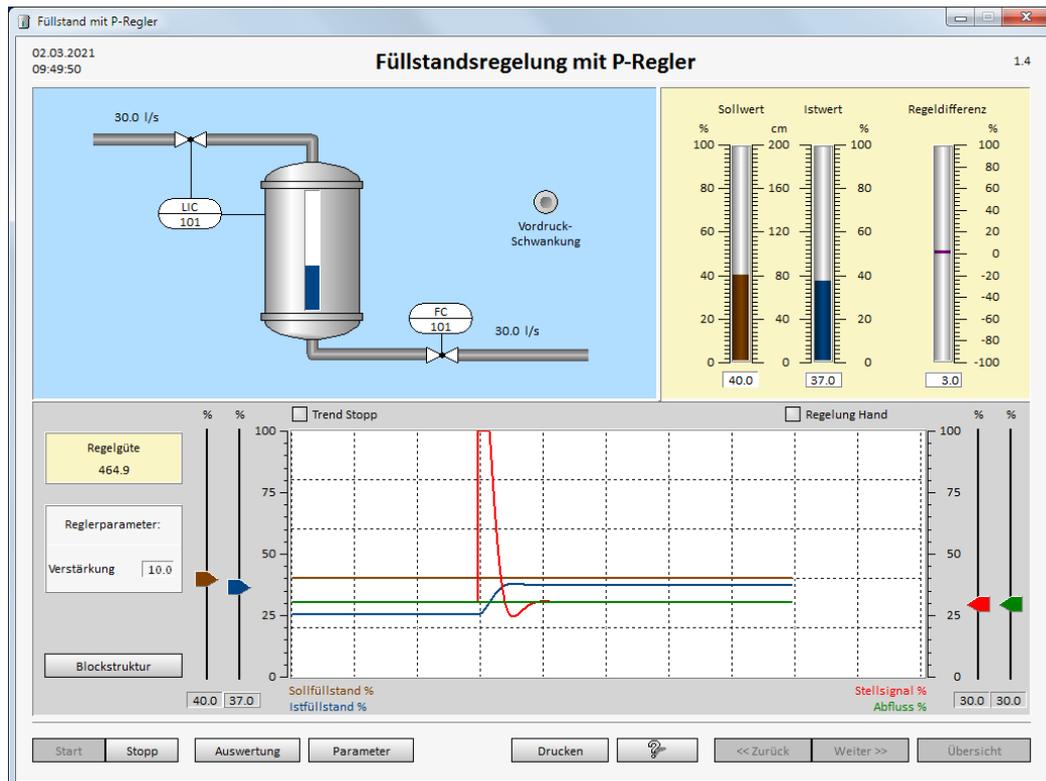
Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $w - x$ (Sollwert - Istwert) wird mit dem vorgegebenen Verstärkungsfaktor (in unserem Fall 2) verstärkt. Damit der P-Regler ein

Stellsignal (einen Zufluss) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Gibt der Regler 0 aus, ist der Zulauf gleich 0 und der Füllstand fällt, da der Abfluss 30l/s beträgt.

Aufgabe 7:

Verändern Sie die Verstärkung des P-Regler von 2 auf 10 und warten Sie bis der Regelkreis wieder eingeschwungen ist.



Die Regeldifferenz zwischen Sollwert w und Istwert x wird mit der Erhöhung der Verstärkung K von 2 auf 10 wesentlich kleiner. Allerdings schafft es der P-Regler auch hier nicht, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Wir erhalten aus dem oben beschriebenen Grund ebenso eine bleibende, wenn auch wesentlich kleinere Regeldifferenz ($e = w - x$).

Da der Istwert auf 37% geht, erhält man eine Regeldifferenz von $40\% - 37\% = 3\%$.

Der Istwert von 37 bzw. die Regeldifferenz von 3 lässt sich auch berechnen. Damit das System eingeschwungen ist (der Füllstand bleibt konstant), muss der Zufluss gleich dem Abfluss sein, also Zufluss = Abfluss = 30%. Somit ergibt sich:

Stellsignal $y = 30 = K * (w - x) = 10 * (40 - x)$, also Istwert $x = 40 - y/10 = 40 - 3 = 37$.

Bei der Verstärkung 2 aus Aufgabe 6 wird als Istwert x berechnet:

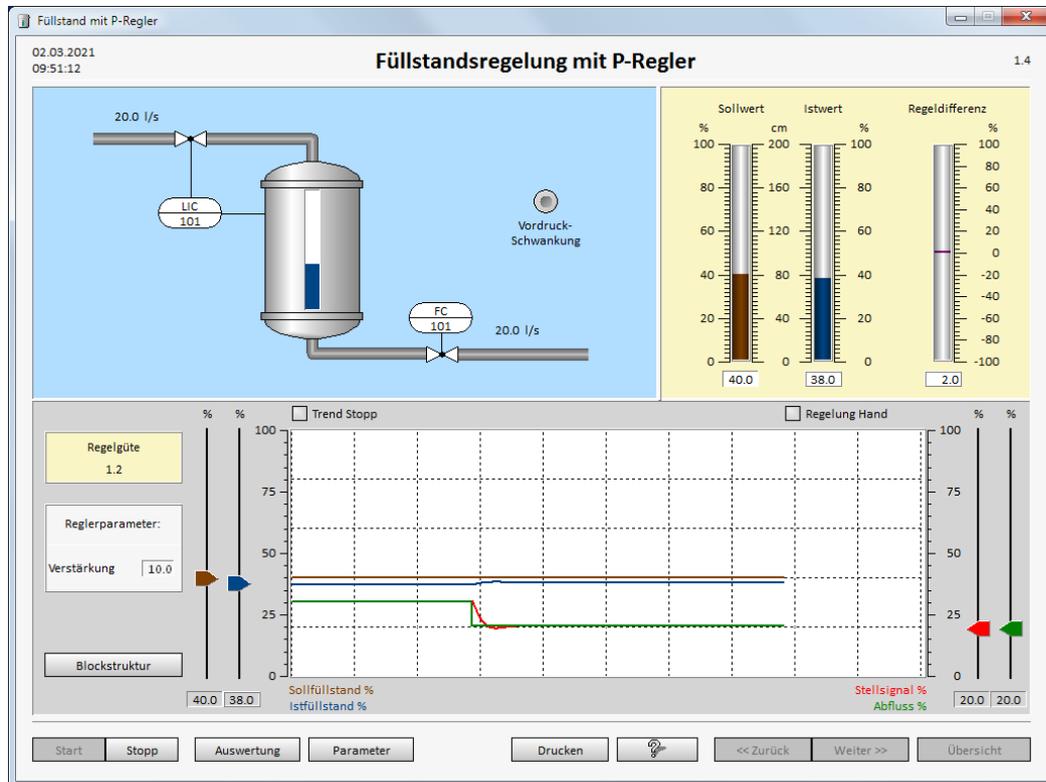
Istwert $x = 40 - y/2 = 40 - 15 = 25$.

Auch auf eine Störung (Veränderung des Abflusses) reagiert der P-Regler. Auch hierfür erhält man eine bleibende Regeldifferenz.

Aufgabe 8:

Verändern Sie den Abfluss auf 20l/s.

Was passiert?



Der P-Regler reagiert auf die Störung, die bleibende Regeldifferenz bleibt.

Die Regeldifferenz bzw. der eingeschwungene Istwert lässt sich wie oben angegeben auch hier berechnen:

$$\text{Istwert } x = w - y/K = 40 - 20/10 = 38$$

Wie am Einschwingverhalten zu sehen ist, reagiert der P-Regler sofort und schnell auf Sollwert- und Störwertänderungen.

4.2.3 Regelung mit I-Regler

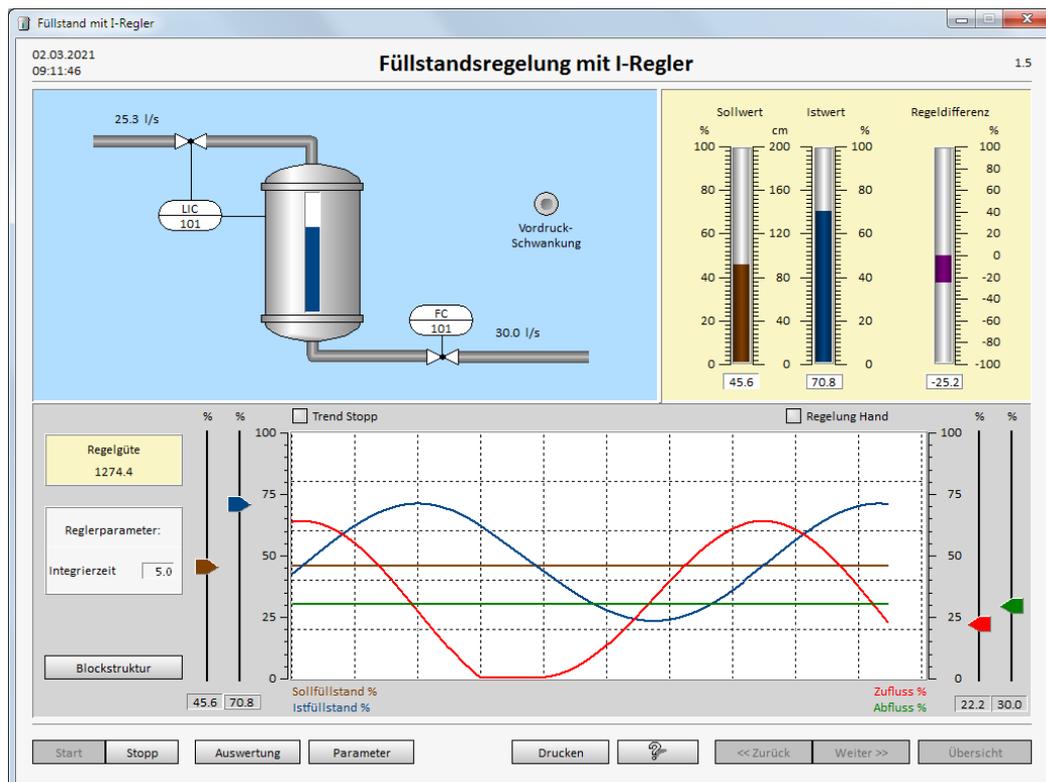
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 1.5 „Regelung mit I-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 9:

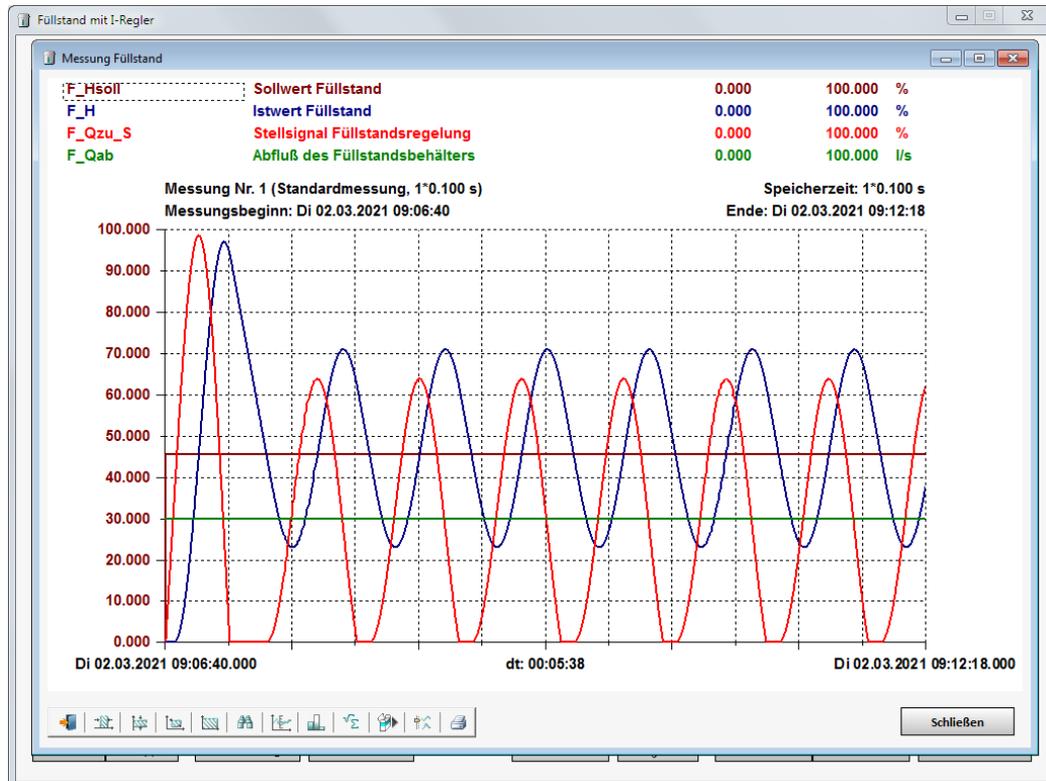
Verändern Sie den Sollwert auf 40%.

Was passiert?



Der Regelkreis fängt an, eine Dauerschwingung auszuführen. Der Istwert schwingt um den Sollwert.

Auch bei einer Veränderung der Integrierzeit bleibt der Regelkreis instabil, ebenso bei einer Störwertänderung.



Der I-Regler ist nicht in der Lage, den Regelkreis auszuregeln.

Info:

Wenn ein I-Anteil (Integrator) im Regler vorhanden ist, schafft es der Regler entweder den Istwert nach einer Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen oder der Regelkreis wird instabil.

4.2.4 Regelung mit PI-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 1.6 „Regelung mit PI-Regler“.

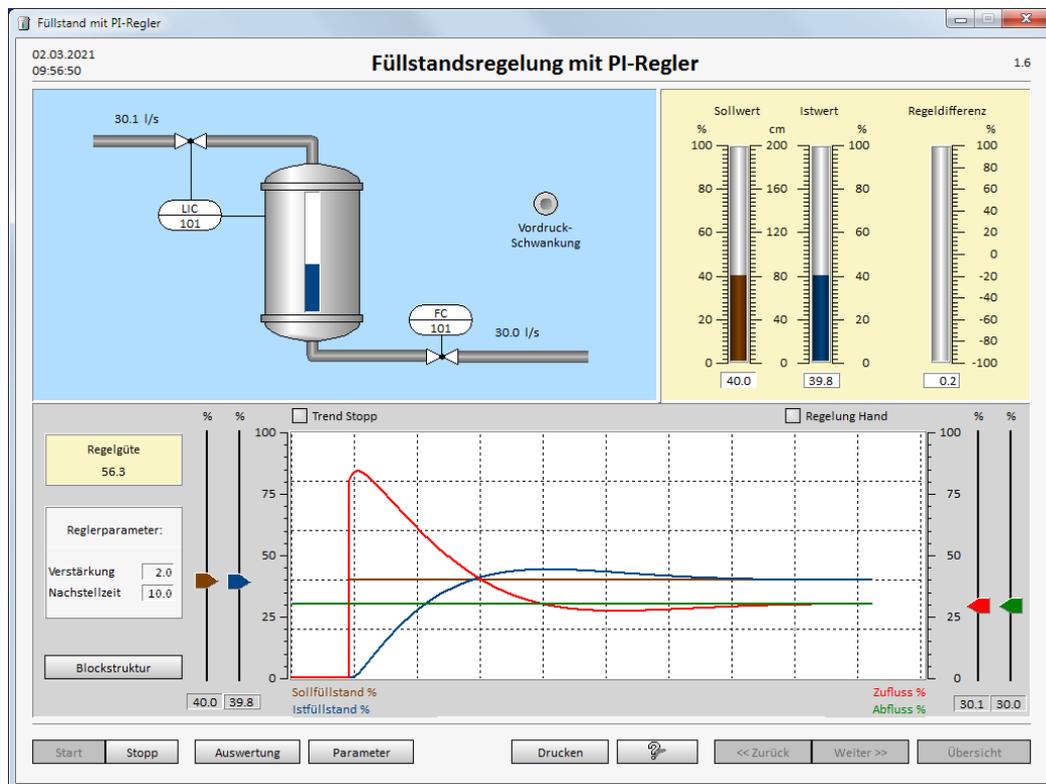
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 10:

Behalten Sie die eingestellten Parameter bei:

Verstärkung $K = 2$, Nachstellzeit $T_i = 10$.

Verändern Sie den Sollwert auf 40%. Beobachten Sie das Einschwingverhalten.



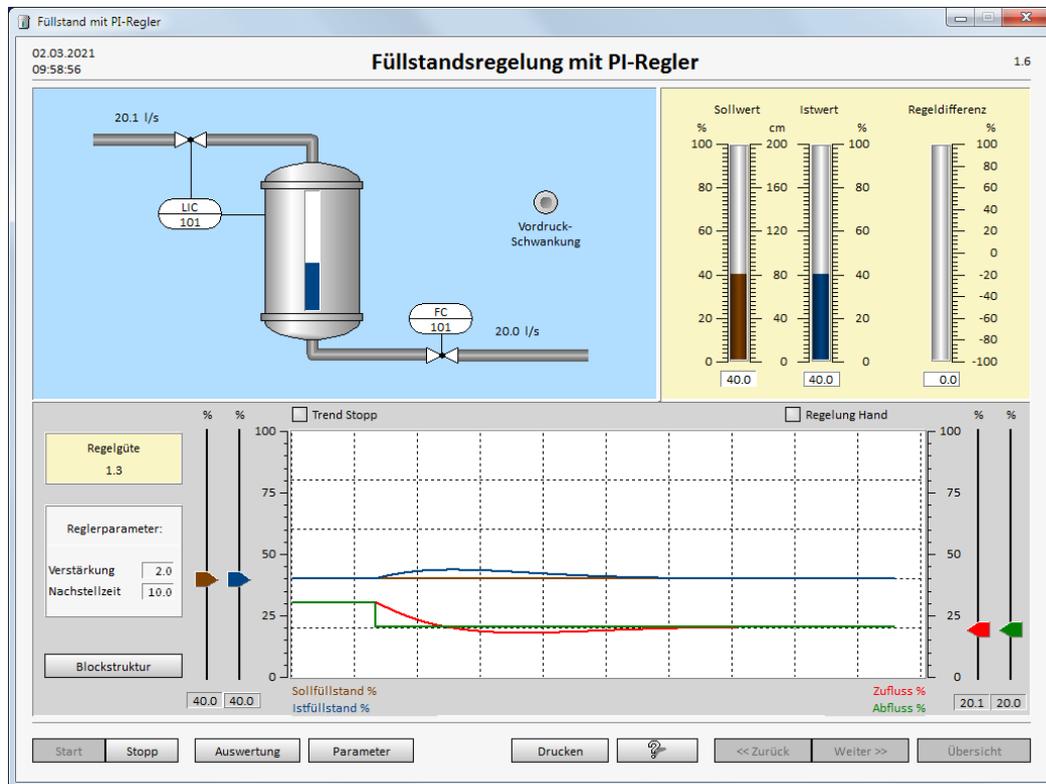
Der Regelkreis mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern schwingt mit einem kleinen Überschwinger auf den Sollwert ein. Der Istwert (Regelgröße) erreicht den Sollwert (Führungsgröße).

Das Einschwingen des Regelkreises auf eine Änderung des Sollwertes wird als Führungsverhalten bezeichnet.

Aufgabe 11:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Wenn der Regelkreis eingeschwungen ist, verändern Sie den Abfluss auf 20% und beobachten Sie das Verhalten.



Der kleinere Abfluss bewirkt einen Anstieg des Füllstands. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und verringert den Zufluss. Nach einer Einschwingphase erreicht der Istwert wieder den Sollwert.

Da der Regelkreis auf eine Störwertänderung reagiert spricht man in diesem Fall vom Störverhalten.

Aufgabe 12:

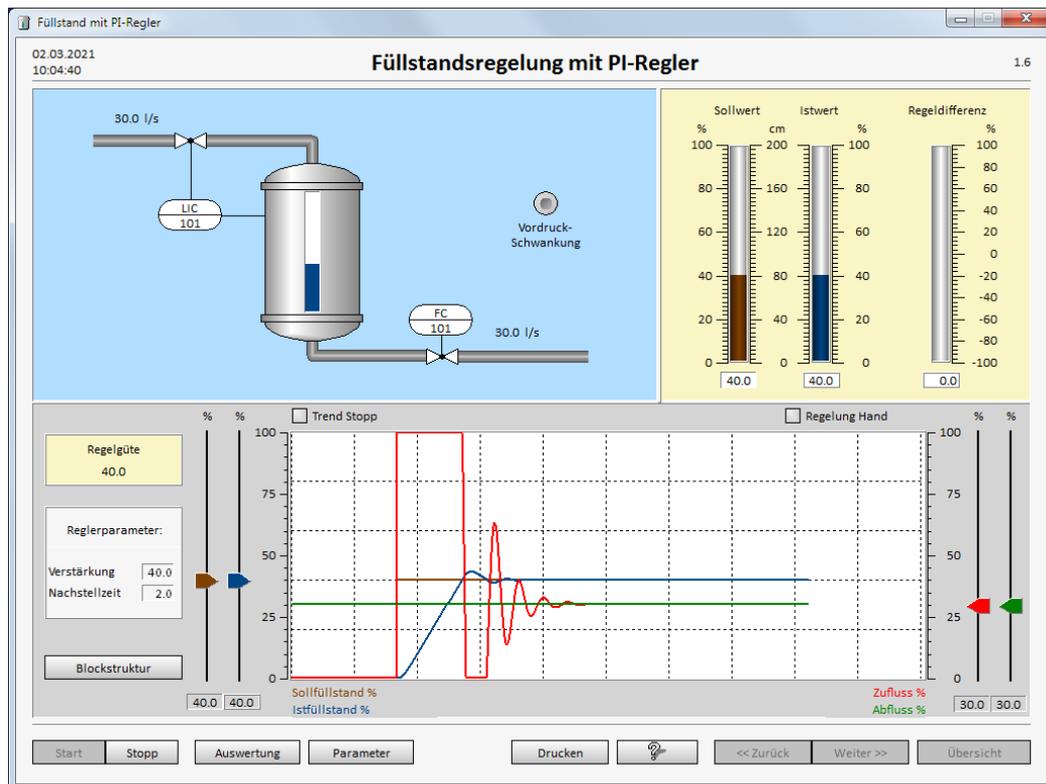
Die in dem Kasten mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwungenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl ist, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwungen, d.h. der Istwert hat den Sollwert erreicht.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Mit den Reglerparametern $K = 2$ und $T_i = 10$ wurde eine Regelgüte von 56,9 erreicht.

Damit die Regelgüte bei allen Versuchen vergleichbar ist, müssen alle Versuche mit den gleichen Anfangszuständen gestartet werden. Hierfür drücken Sie am besten „Stopp“ und dann wieder „Start“. Damit erhalten Sollfüllstand, Abfluss und Istfüllstand wieder ihre Anfangswerte.

Verändern Sie die Reglerparameter und stellen Sie dann den Sollwert auf 40%. Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

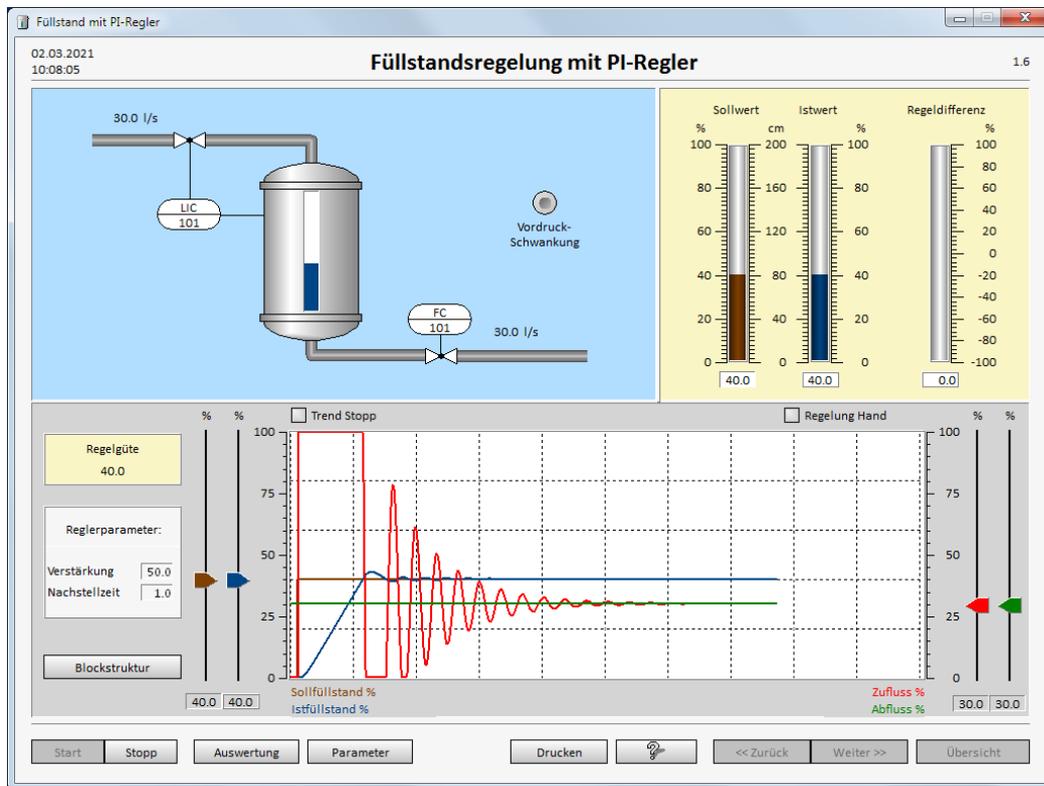


Mit den eingestellten Parametern $K = 40$ und $T_i = 2$ erhält man zum Beispiel eine Regelgüte von 40,4.

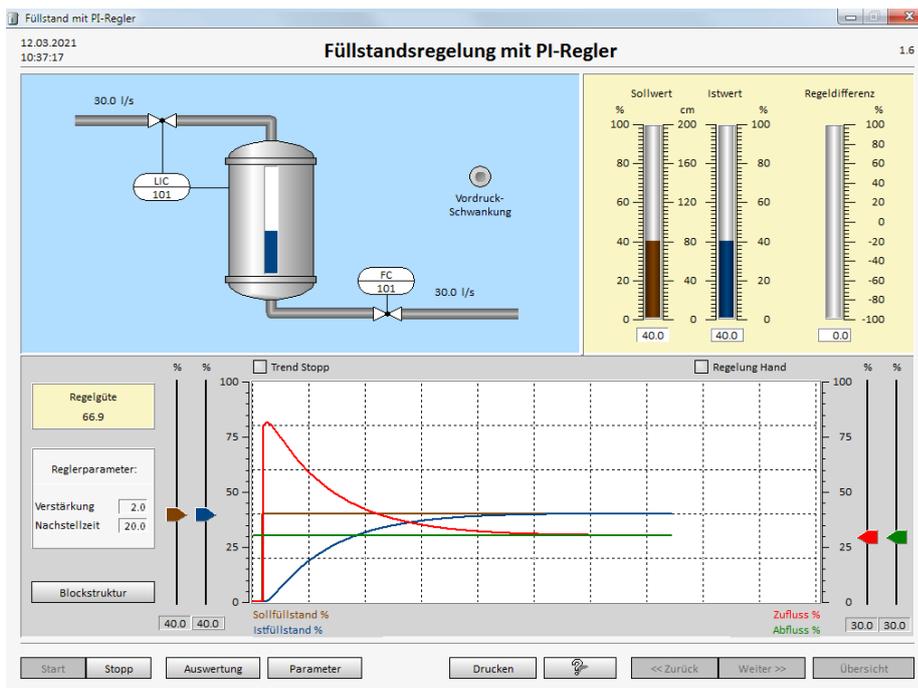
Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- Stopp und wieder Start drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 40% stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Durch Verstellen der Parameter ist es nicht möglich, den Regelkreis zum Aufschwingen zu bringen. Allerdings wird der Regelkreis sehr unruhig mit den Parametern $K = 50$ und $T_i = 1$



Um ein aperiodisches Einschwingverhalten (ohne Überschwingen) zu erreichen, müssen Sie die Verstärkung klein und die Nachstellzeit groß wählen.



Mit den Parametern $K=2$ und $T_i = 20$ erhalten Sie ein aperiodisches Einschwingen.

4.2.5 Regelung mit PID-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 1.7 „Regelung mit PID-Regler“.

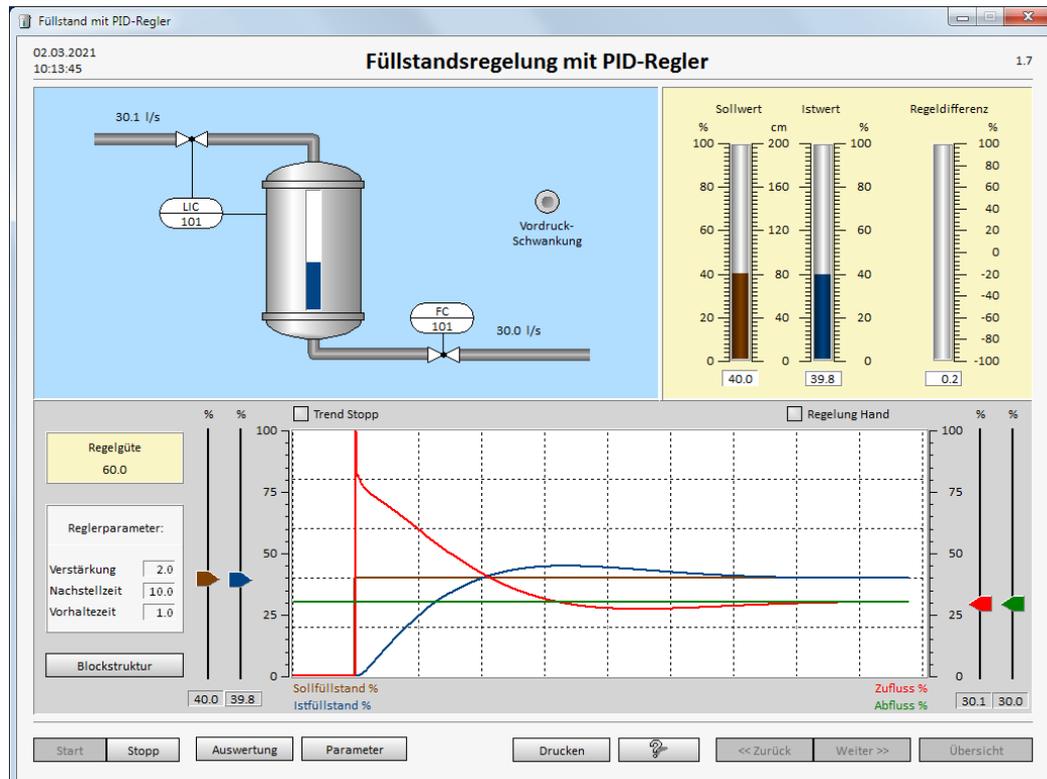
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 13:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 2$, Nachstellzeit $T_i = 10$, Vorhaltezeit $T_d = 1$

Ändern Sie den Sollwert auf 40%. Beobachten Sie das Verhalten.



Der Regelkreis geht mit einem kleinen Überschwingen in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals (Zufluss). Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Die Regelgüte geht auf 60,6 und ist damit schlechter als beim PI-Regler mit den Parametern $K = 2$ und $T_i = 10$.

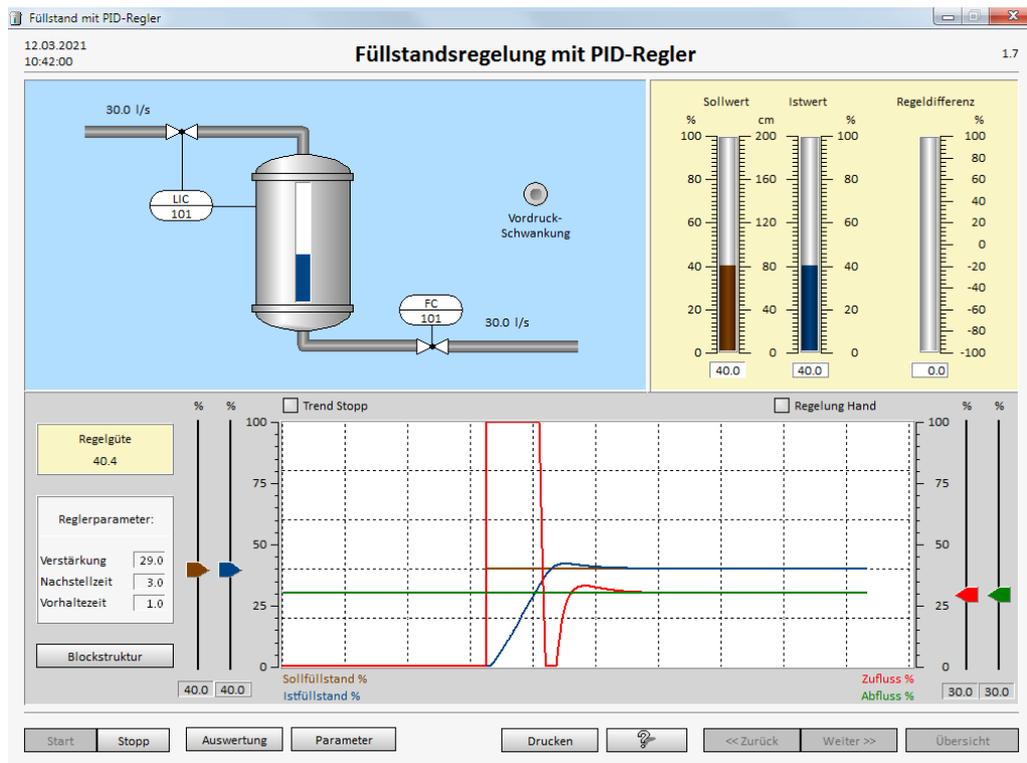
Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

Aufgabe 14:

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch, um die Regelgüte zu verbessern:

- „Stopp“ und wieder „Start“ drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 40% stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.



Mit den Parametern Verstärkung $K = 29$, Nachstellzeit $T_i = 3$ und Vorhaltezeit $= 1$ erhalten Sie eine Regelgüte von 40,4.

4.2.6 Regelung mit Zweipunkt-Regler

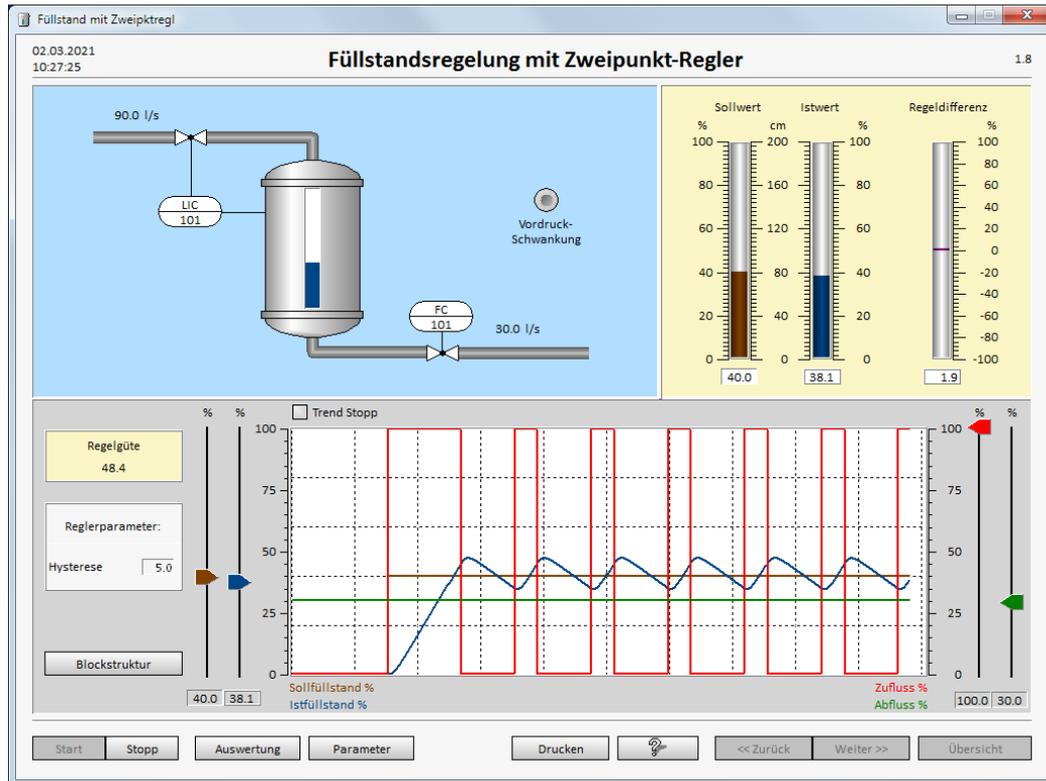
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 1.8 „Regelung mit Zweipunkt-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 15:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit dem voreingestellten Parameter:

Hysterese = 5



Der Füllstand (Istwert) schwingt um den Sollfüllstand. Die Größe der Schwingung ist abhängig vom Parameter (Hysterese).

Wie zu beobachten ist, steigt der Füllstand schneller (Ventil auf 100%) als er fällt (Ventil auf 0%). Dies liegt daran, dass bei Ventilstellung 100% die Zuflussmenge den Wert $100\text{l/s} - 30\text{l/s} = 70\text{l/s}$ annimmt, während die Abflussmenge (Ventil auf 0%) nur 30l/s beträgt.

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

4.3 Strecke untersuchen

Wählen Sie bei der Füllstandregelung den Punkt 1.3 „Strecke untersuchen“.

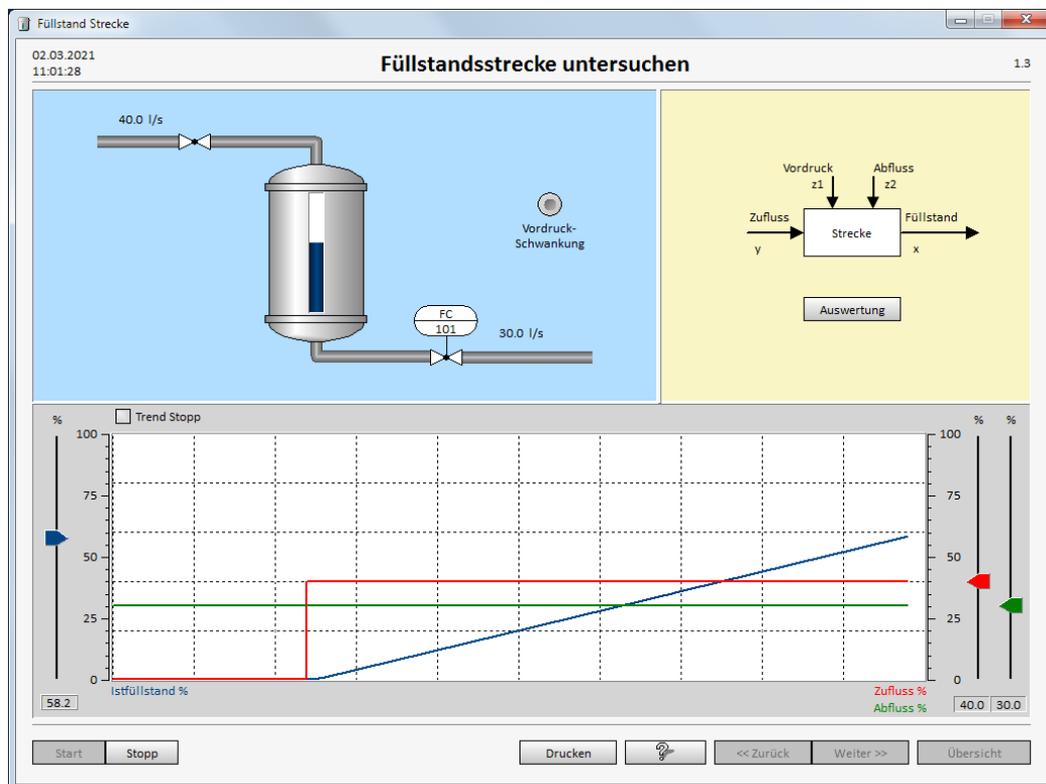
Bei der Füllstandstrecke handelt es sich um eine Strecke ohne Ausgleich. Bei einer sprunghaftigen Änderung des Stellsignals (Zufluss > Abfluss) fängt die Regelgröße (Istfüllstand) an immer weiter zu steigen. Die Ausgangsgröße des Systems (Regelgröße) nimmt keinen bleibenden Endzustand an.

Aufgabe 16:

Drücken Sie „Start“ und erhöhen den Zufluss auf 40%

Der Zufluss muss größer als 30% gewählt werden, damit der Füllstand steigt, weil der Abfluss auf 30% eingestellt ist.

Beobachten Sie das Füllstandverhalten.



Da der Zufluss größer als der Abfluss ist, fängt der Füllstand an, immer weiter zu steigen, bis der Behälter überläuft.

4.4 Reglereinstellverfahren

Um die Reglereinstellverfahren, z.B. nach Chien/Hrones/Reswick zu nutzen, müssen die Strecken untersucht werden.

Auf das Eingangssignal des Systems (Stellsignal der Strecke) wird ein Einheitssprung gegeben. Das Verhalten des Ausgangssignals des Systems (Regelgröße) kann dann ausgemessen werden.

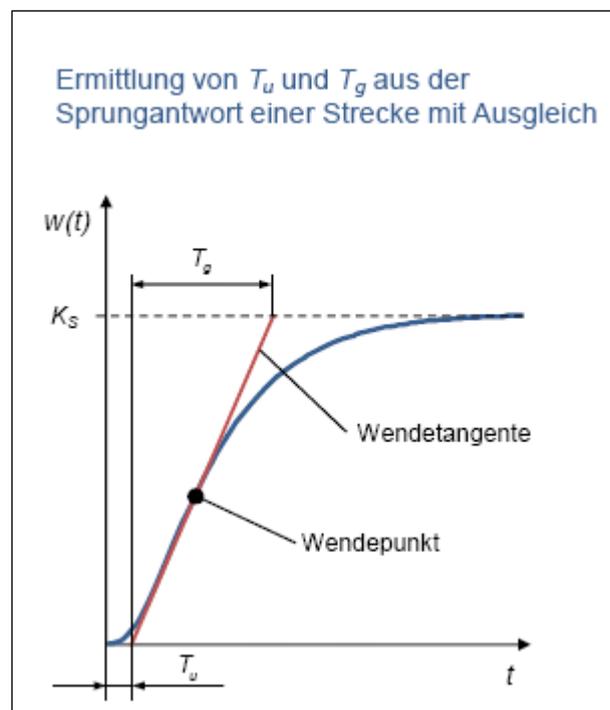
Für die Reglereinstellverfahren für Strecken mit Ausgleich werden die Parameter T_u , T_g und K_s bestimmt, wie in der unteren Abbildung angegeben.

Es bedeuten:

$T_e = T_u =$ Verzugszeit

$T_b = T_g =$ Ausgleichszeit

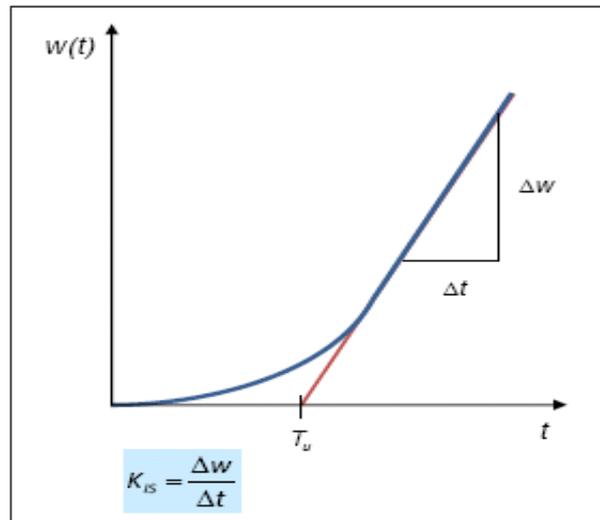
$K_s =$ Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich



In der neuen Norm werden die Verzugszeit mit T_e , die Ausgleichszeit mit T_b und der Wendepunkt mit P bezeichnet.

Da noch in der überwiegenden Literatur die Bezeichnungen T_u und T_g benutzt werden, behalten wir hier die alten Bezeichnungen bei, bzw. nutzen beide.

Für Strecken ohne Ausgleich wird in etwa folgendes Verhalten auf eine Einheitssprungänderung des Stellsignals auftreten:



Hier können Sie K_{is} als Steigung der Tangente und T_u als Schnittpunkt der Tangente mit der Zeitachse bestimmen.

Aus K_{is} berechnen Sie die Zeitkonstante T_i durch $T_i = 1/K_{is}$.

Es bedeuten:

T_u Verzugszeit

$T_g = T_i$ 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:

Tabelle 2: Gleichungen zur Berechnung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick

Regler- verhalten	Gütekriterium			
	Mit 20 % Überschwingung		Aperiodischer Regelvorgang	
	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.

[Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg]

Beachten Sie bitte, dass laut neuer Norm folgende Bezeichnungen genutzt werden: $T_U = T_e$, $T_g = T_b$

Die Füllstandstrecke ist eine Strecke ohne Ausgleich.

Da die Änderung bei einem Einheitssprung von 1% zu klein wäre, um die Parameter zu bestimmen, wird hier ein Sprung um 10% genommen.

Im Fall der Füllstandstrecke wird der Sprung auf 40% gesetzt, da der Abfluss auf 30% eingestellt ist.

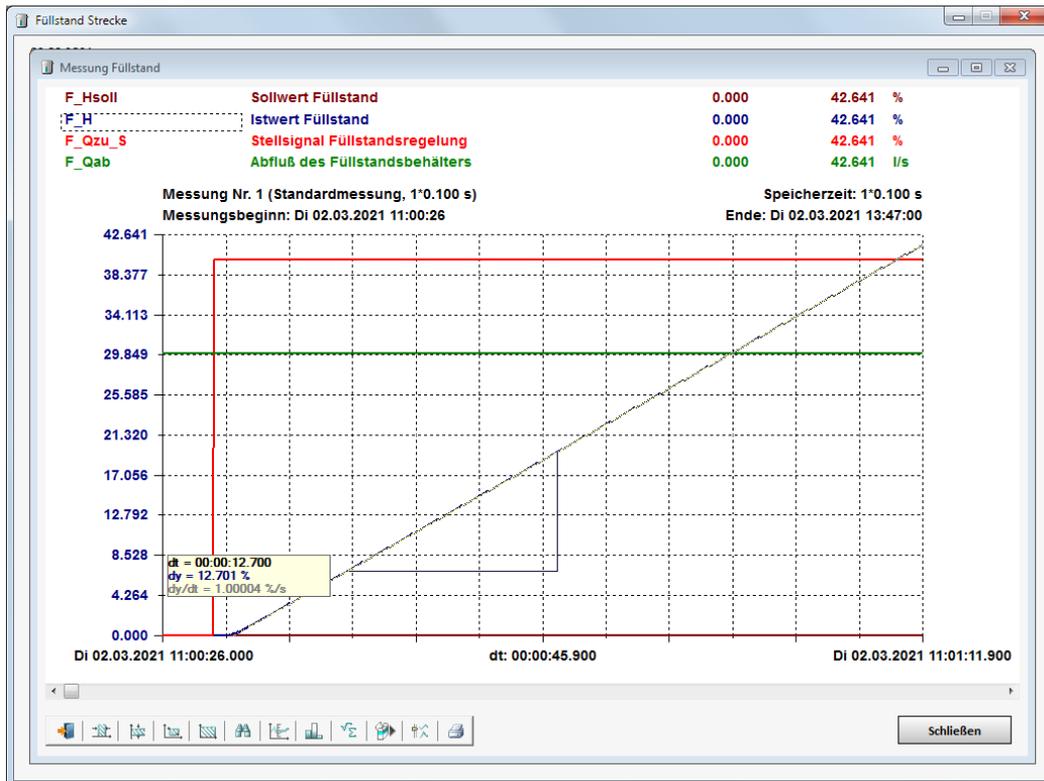
Bei der Bestimmung von K_S muss die Sprunghöhe von 10% berücksichtigt werden, indem die Änderung des Füllstands dann durch 10 geteilt wird.

Wählen Sie bei der Füllstandregelung den Punkt 1.3 „Strecke untersuchen“.

Aufgabe 17:

Drücken Sie „Start“ und erhöhen den Zufluss auf 40%. Der Zufluss muss größer als 30% gewählt werden, da der Abfluss auf 30% eingestellt ist.

Drücken Sie auf „Auswertung“ und versuchen Sie das aufgezeichnete Systemverhalten auszumessen.



Mithilfe der Buttonleiste im Fenster können Sie Zeit- und Wertebereiche auswählen.



Hierfür können Sie das blaue Signal (Regelgröße Füllstand) anklicken und durch Festhalten und Ziehen versuchen, die Steigung der Füllstandkurve zu bestimmen.

Die Steigung der Geraden beträgt ungefähr 1%/s. Da die Sprungdifferenz 10% (40% - 30%) betragen hat, muss K_{is} als Steigung der Tangente auf einen Einheitssprung durch 10 geteilt werden, also

$$K_{is} = 1/10 = 0,1/s$$

$$T_i \text{ berechnet sich zu: } T_i = 1/K_{is} = 10s$$

Die Verzugszeit T_u (T_e) kann ungefähr aus dem Diagramm bestimmt werden $T_u = 2s$

Damit ergeben sich durch Einsetzen der Werte in die Tabelle folgende Parameter:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 * 1 / (K_i * T_e) \quad 3,00$$

$$T_n = T_b = T_i \quad 10,00$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 / (K_i * T_e) \quad 1,75$$

$$T_n = 1,2 * T_i \quad 12,00$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 / (K_s * T_e) \quad 3,50$$

$$T_n = 2,3 * T_e \quad 4,60$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 / (K_s * T_e) \quad 3,00$$

$$T_n = 4 * T_e \quad 8,00$$

Da bei einem Sprung des Sollwertes von 0% auf 40% das Stellsignal in die obere Begrenzung geht und damit das Einschwingen verfälscht, wird nur noch ein Sprung von 0% auf 20% gesetzt.

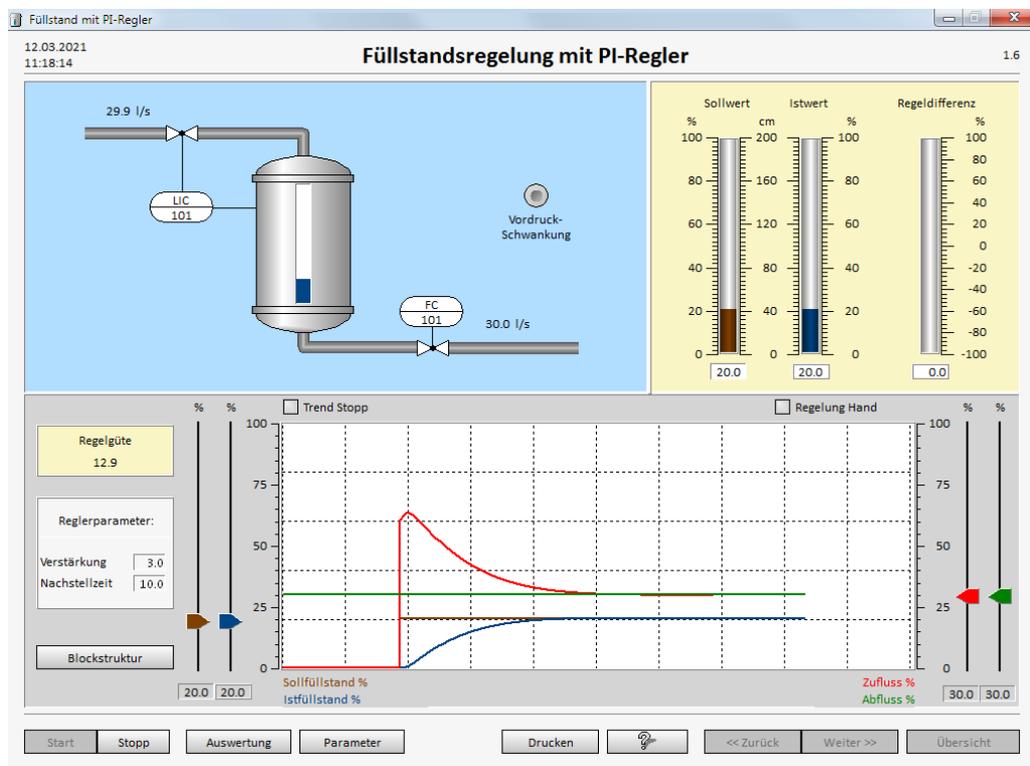


Abbildung 4-1: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

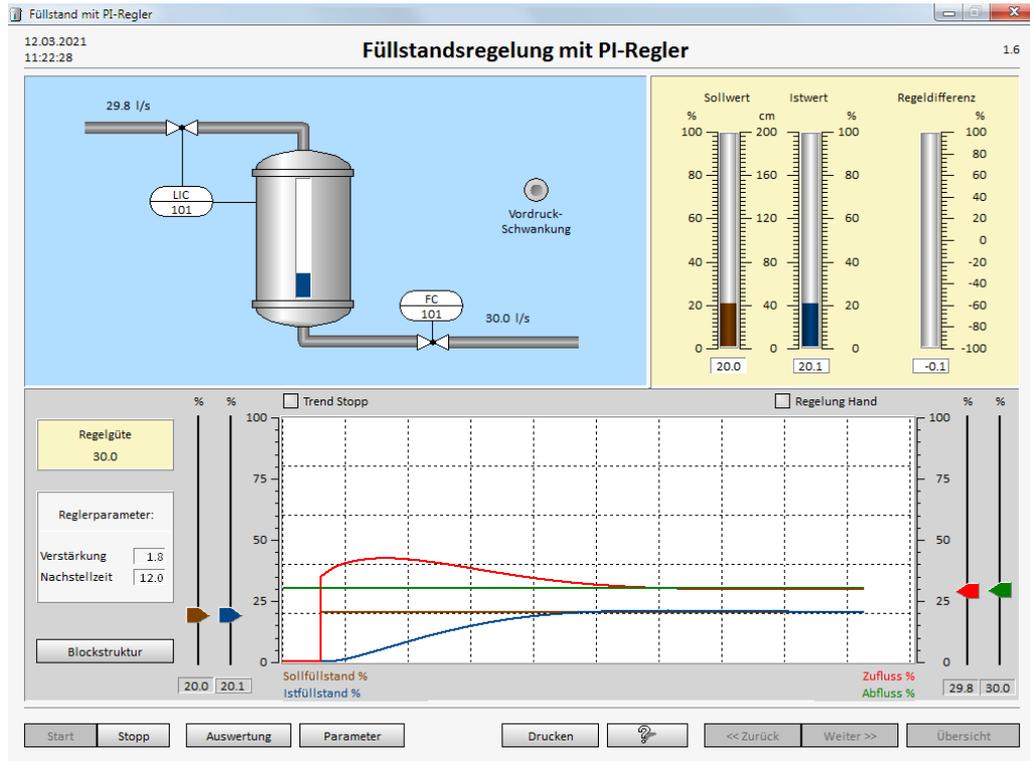


Abbildung 4-2: Führungsverhalten aperiodisch

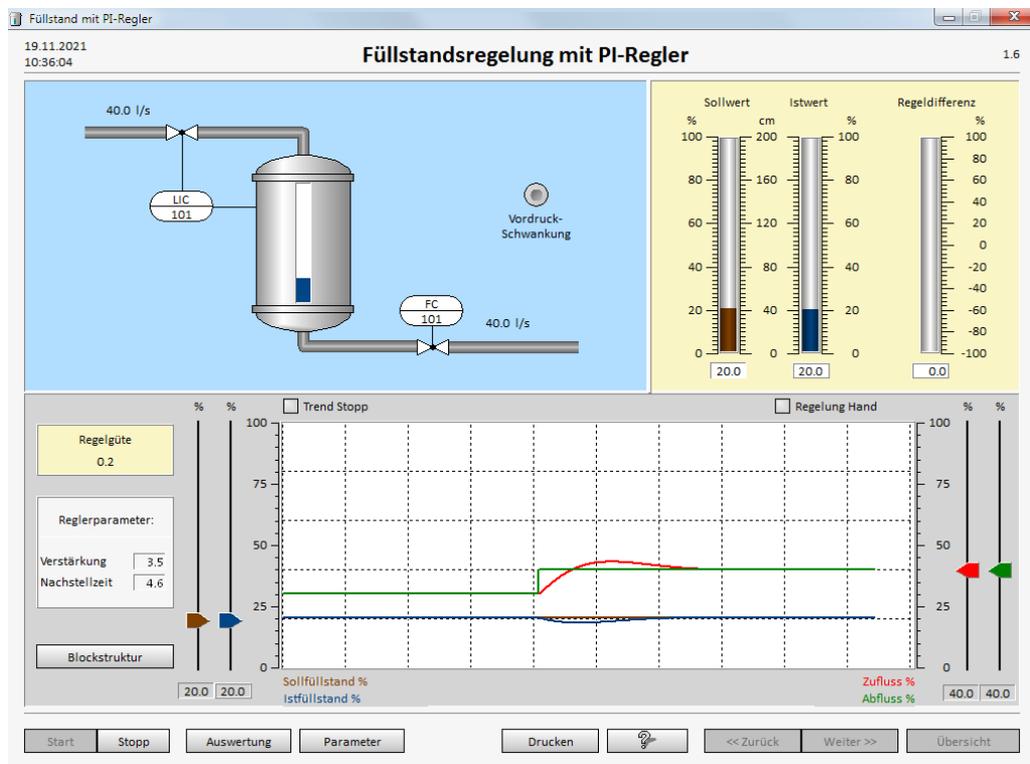


Abbildung 4-3: Störverhalten mit 20% Überschwingen

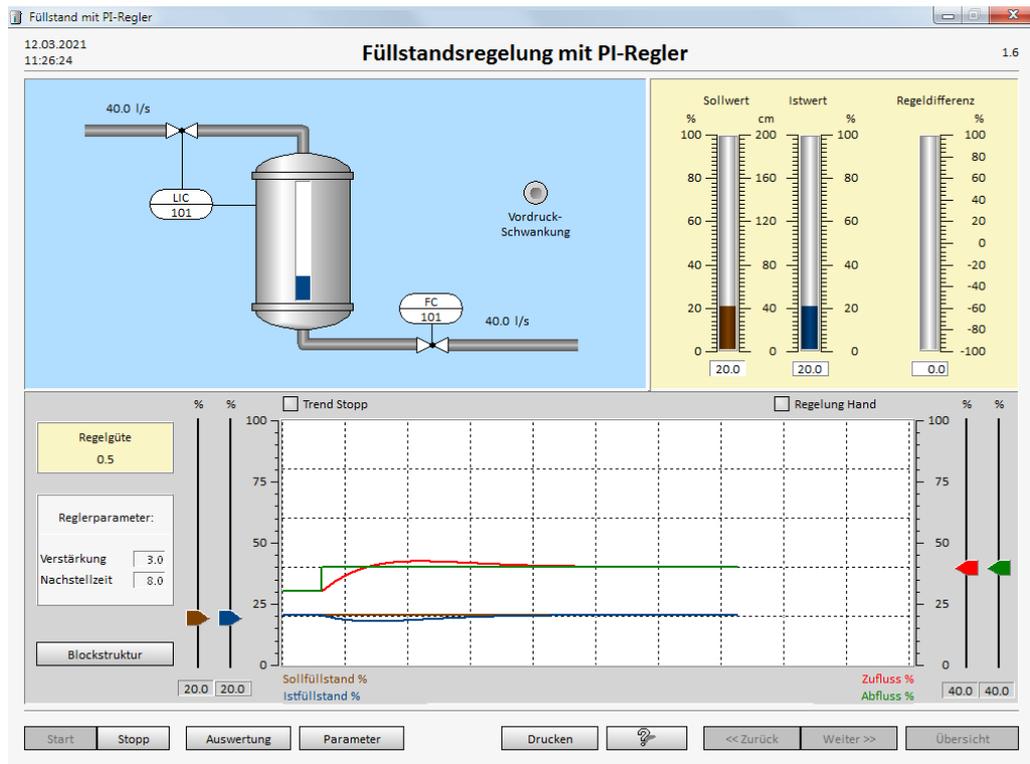


Abbildung 4-4: Störverhalten aperiodisch

Für den PID-Regler ergeben sich laut Tabelle folgende Parameter:

PID-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$\begin{aligned}
 K &= 0,95 / (K_{is} \cdot T_e) && 4,75 \\
 T_n &= 1,35 \cdot T_b && 13,50 \\
 T_d &= 0,47 \cdot T_e && 0,94
 \end{aligned}$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$\begin{aligned}
 K &= 0,6 / (K_{is} \cdot T_e) && 3,00 \\
 T_n &= T_b && 10,00 \\
 T_d &= 0,5 \cdot T_e && 1,00
 \end{aligned}$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$\begin{aligned}
 K &= 1,2 / (K_{is} \cdot T_e) && 6,00 \\
 T_n &= 2 \cdot T_e && 4,00 \\
 T_d &= 0,42 \cdot T_e && 0,84
 \end{aligned}$$

Störverhalten aperiodisch

$$\begin{aligned}
 K &= 0,95 / (K_s \cdot T_e) && 4,75 \\
 T_n &= 2,4 \cdot T_e && 4,80 \\
 T_d &= 0,42 \cdot T_e && 0,84
 \end{aligned}$$

Führungsprung von 0% auf 20%:

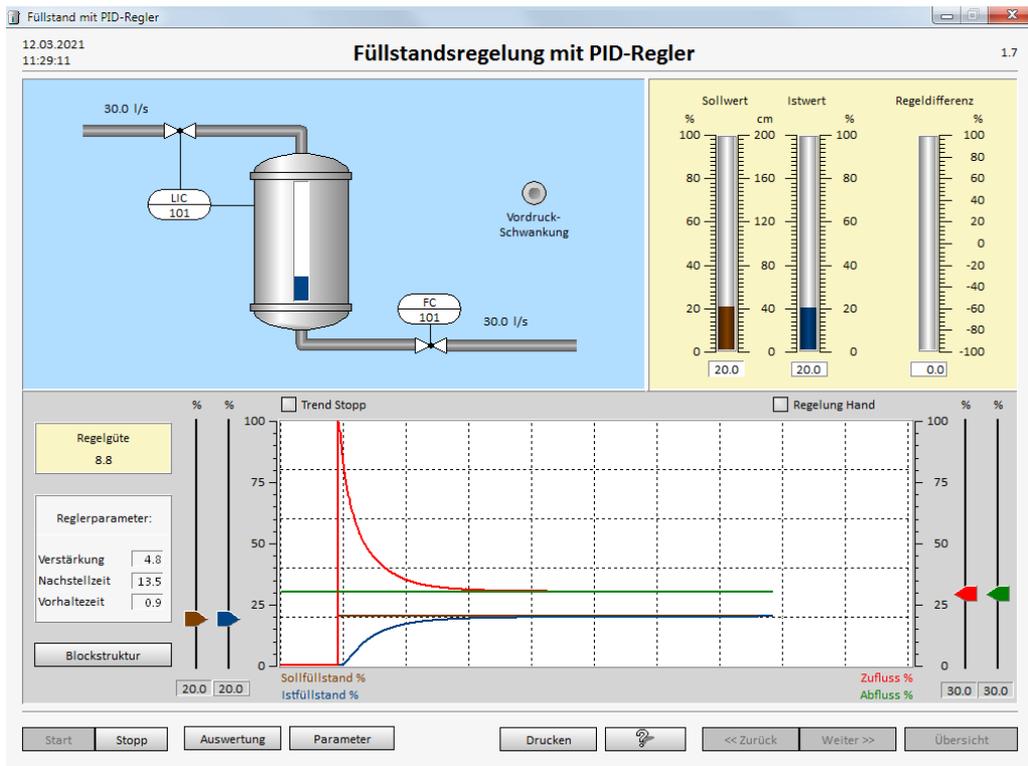


Abbildung 4-5: Führungsverhalten mit 20% Überspringen

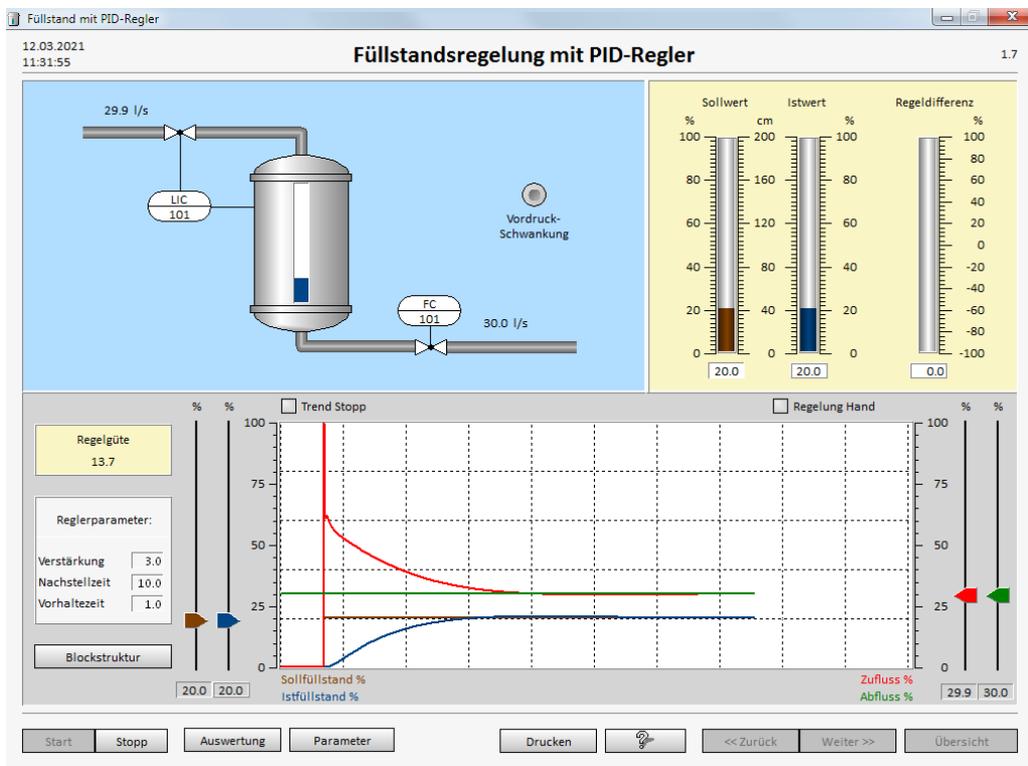


Abbildung 4-6: Führungsverhalten aperiodisch

Störsprung von 30% auf 40%:

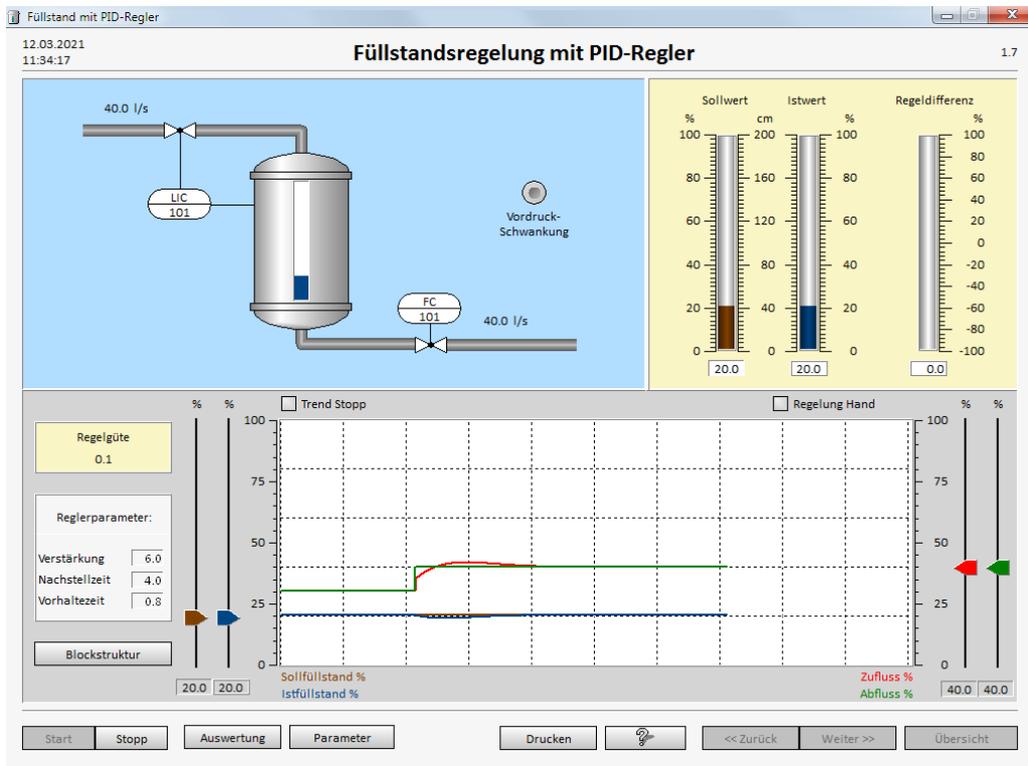


Abbildung 4-7: Störverhalten mit 20% Überschwingen

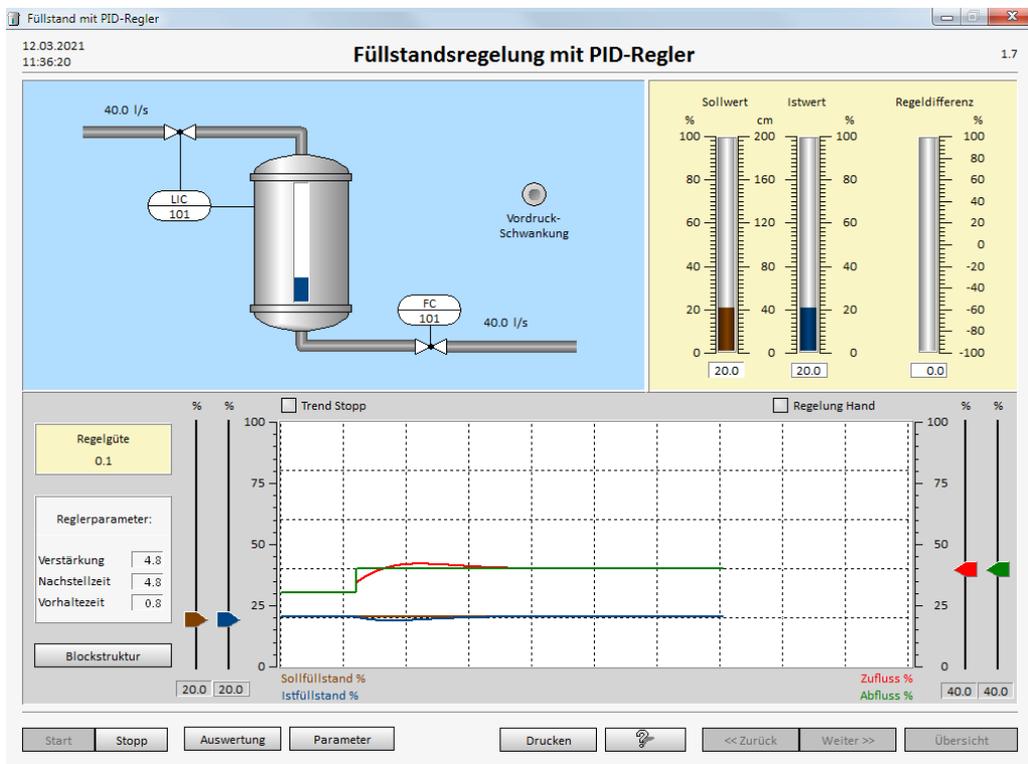


Abbildung 4-8: Störverhalten aperiodisch

4.5 Beurteilung Reglereinstellverfahren

Reglereinstellverfahren sind empirisch bestimmte Verfahren, die geeignet sind, um Daumenwerte für gute Reglerparameter zu berechnen.

Die Einstellungen für die Reglerparameter unterscheiden zwischen Stör- und Führungsverhalten. Es werden unterschiedliche Reglerparameter berechnet.

Will man mit seinen Reglerparametern beide Fälle (Stör- und Führungsverhalten) abdecken, muss man einen Kompromiss zwischen den berechneten Parametern des Störverhaltens und des Führungsverhaltens eingehen.

Die obigen Beispiele zeigen, dass man mit den berechneten Reglerparametern ein vernünftiges Regelkreisverhalten erhält. Allerdings entspricht das Verhalten nicht genau dem Einschwingverhalten, wie es in der Tabelle gewählt wurde.

Dass das System nicht genau aperiodisch bzw. mit 20% Überschwingen einschwingt, liegt auch daran, dass das Stellsignal teilweise in die Begrenzung gegangen ist und die Zeitkonstanten nicht exakt berechnet werden konnten.

Bei dem gezeigten Beispiel waren die von Chien/Hrones/Reswick vorgeschlagenen Reglerparameter gut geeignet für eine vernünftige Regelung.

5 Durchfluss-Regelung, Regelungstechnisches Praktikum II

Bei dem Prozess handelt es sich um ein Rohr mit einem Ventil, das mit einem eingestellten Leitungsdruck von Wasser durchflossen wird. Die regelungstechnische Aufgabe besteht darin, den Durchfluss des Rohres durch Veränderung der Ventilstellung so zu regeln, dass diese einem vorgegebenen Sollwert entspricht. Der Leitungsdruck ist die Störgröße, die Ventilstellung die Eingangsgröße (Stellsignal) und der Durchfluss die Ausgangsgröße (Regelgröße) des Systems. Der Durchfluss wird über eine Differenzdruckmessung bestimmt.

Die Strecke der Durchflussregelung ist eine Strecke mit Ausgleich, da nach einer sprungartigen Änderung der Ventilstellung sich nach einer Zeitspanne wieder ein konstanter Durchfluss einstellt.

5.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

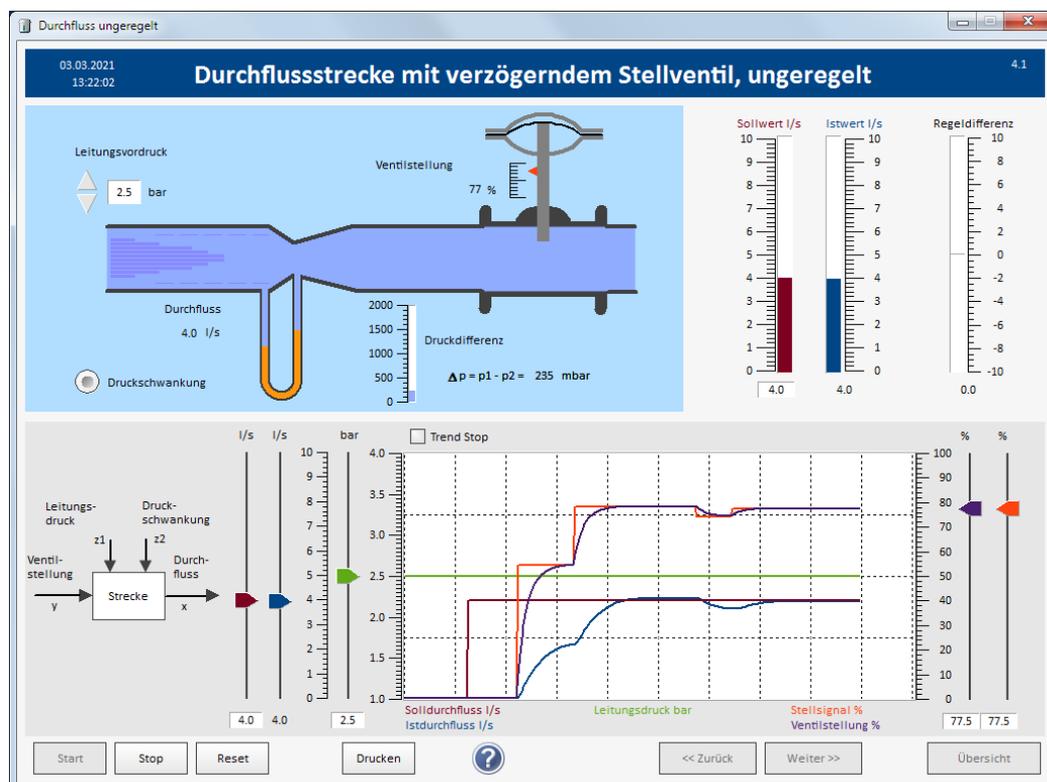
Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum II den Punkt 4.1 „Ungeregelte Anlage“.

Drücken Sie auf „Start“.

Sie können jetzt die Werte für den Sollwert (Solldurchfluss %), das Stellsignal sowie das Störsignal (Leitungsdruck bar) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

Aufgabe 1:

Stellen Sie den Sollwert (Führungsgröße) auf 4 l/s und versuchen Sie durch Verstellen des Stellsignals (Ventilstellung %) den Istwert (Regelgröße Istdurchfluss) auf den Sollwert (Führungsgröße Solldurchfluss) zu bringen.

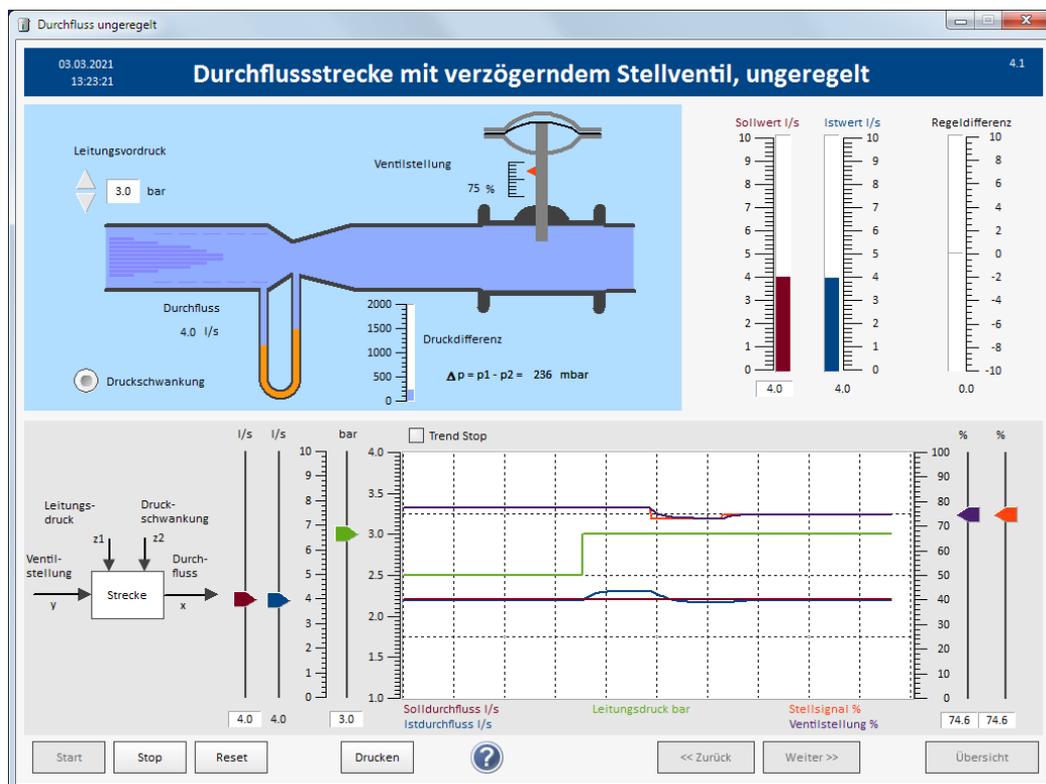


Diese Art der Regelung wird als Führungsverhalten bezeichnet. Der Sollwert (Führungsgröße) wird verstellt, und es wird versucht, den Istwert (Regelgröße) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen.

Bei dieser Strecke ist zu beobachten, dass die tatsächliche Ventilstellung dem Stellsignal hinterherläuft. Wenn das Stellsignal geändert wird (rotes Signal), dauert es bis die Ventilstellung den vom Stellsignal vorgegebenen Wert annimmt. Das Ventil braucht Zeit, bis es auf die gewünschte Ventilstellung gefahren ist.

Aufgabe 2:

Verändern Sie den Leitungsvordruck auf 3 bar und versuchen Sie die Störung durch Verstellen des Stellsignals auszuregeln.



Durch die Erhöhung des Leitungsvordrucks erhöht sich der Durchfluss.

Um dies auszugleichen, muss das Stellsignal und damit die Ventilöffnung verkleinert werden. Auch hier ist zu sehen, dass die tatsächliche Ventilstellung dem Stellsignal hinterherläuft.

Die Veränderung des Leitungsvordrucks ist eine Störung für das System. Deshalb spricht man hier von der Untersuchung des Störverhaltens.

5.2 Regelkreisuntersuchung

5.2.1 Geregelte Anlage

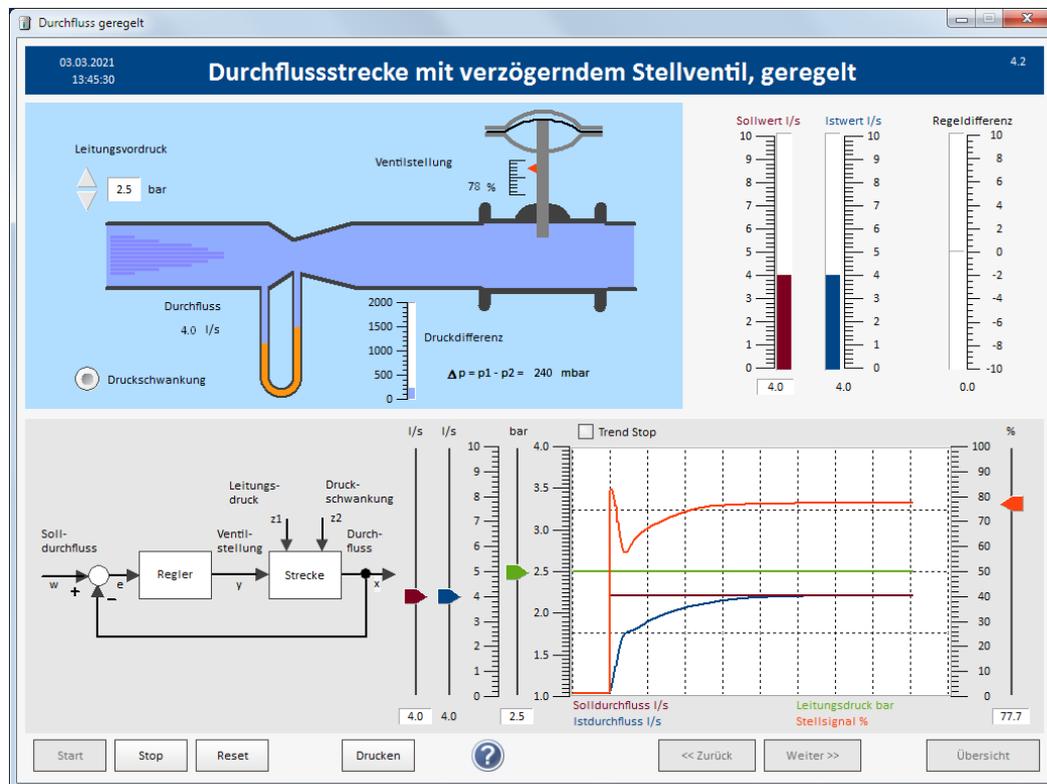
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 4.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung durch den Benutzer ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 3:

Drücken Sie „Start“ und stellen den Sollwert auf 4l/s.

Was passiert?

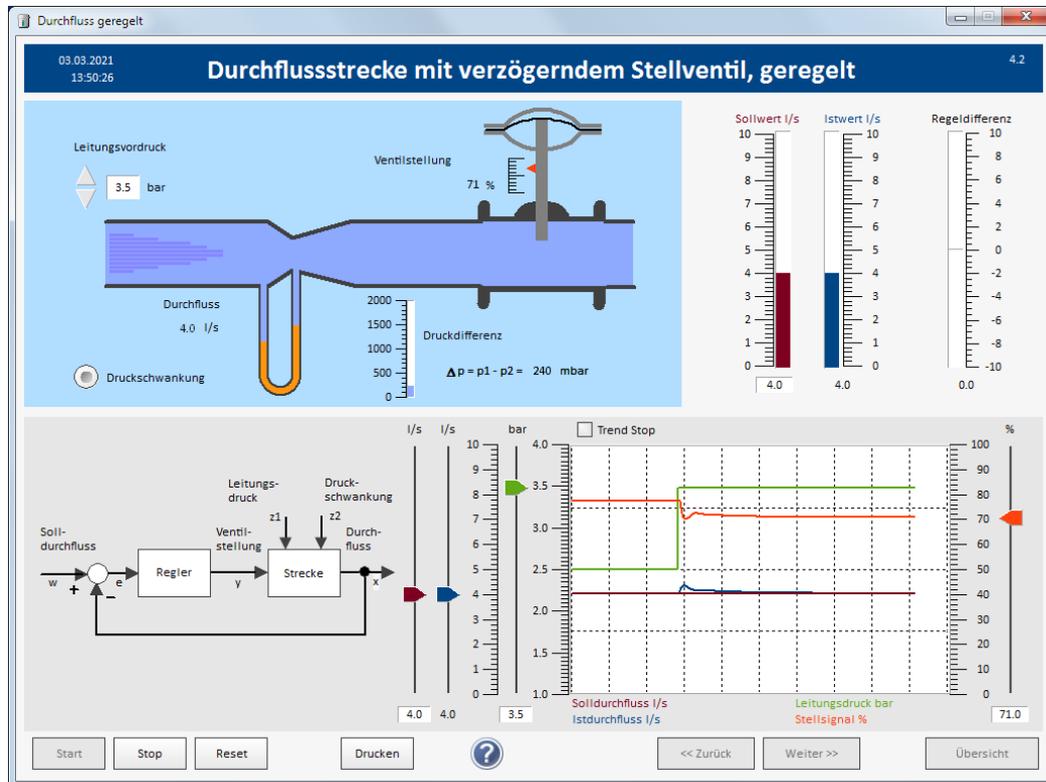


Der Istwert (Durchfluss) geht nach einer gewissen Zeit ohne Überschwingen auf den neuen Sollwert (Führungsgröße). Hier handelt es sich wieder um die Untersuchung des Führungsverhaltens, da der Sollwert (Führungsgröße) verstellt wurde.

Aufgabe 4:

Verändern Sie den Leitungsvordruck auf 3,5 bar.

Was passiert?



Der Durchfluss fängt an zu steigen.

Der Regler versucht den Istwert (Durchfluss) wieder auf den Sollwert zu bringen, indem er das Ventil weiter schließt (Stellsignal verkleinert).

Nach einer gewissen Zeit hat der Regler die Störung ausgeregelt. Hier handelt es sich um die Untersuchung des Störverhaltens, da auf eine Störung reagiert wird.

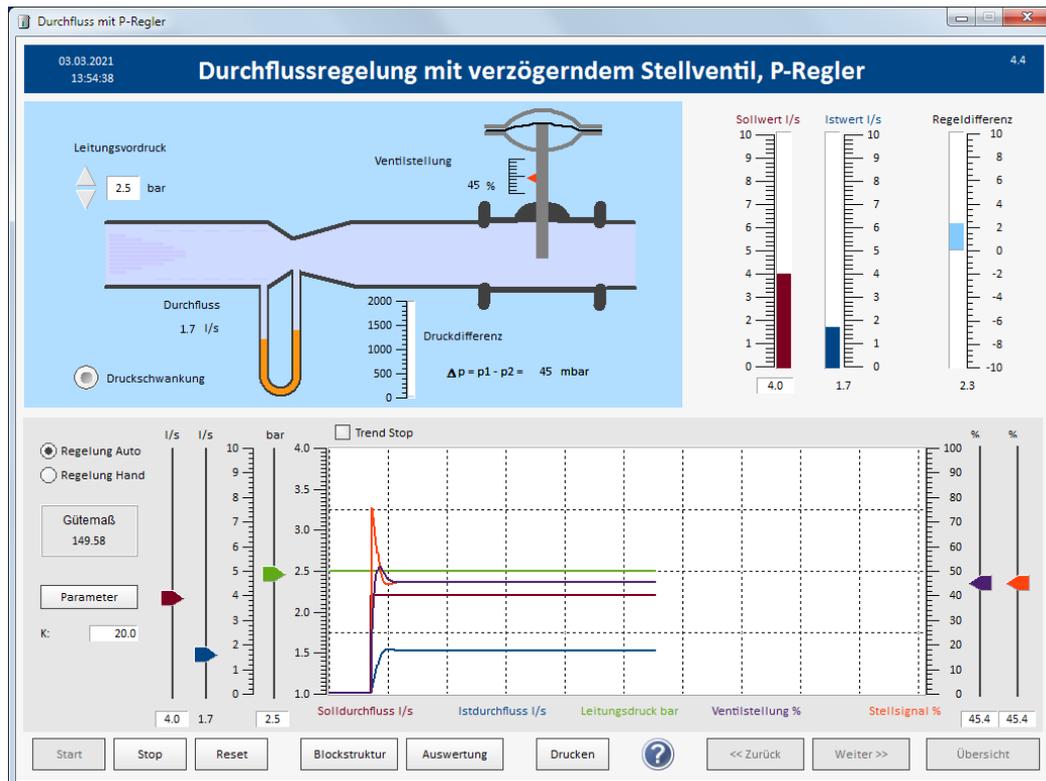
5.2.2 Regelung mit P-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 4.4 „Regelung mit P-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 5:

Verändern Sie den Sollwert auf 4l/s und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.



Nach der Einschwingphase ist deutlich zu sehen, dass der Istwert (Regelgröße Istdurchfluss) den Sollwert (Führungsgröße Sollwert) nicht erreicht. Wir erhalten eine bleibende Regeldifferenz.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$.

Info:

Damit der P-Regler ein Stellsignal (eine Heizleistung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Begründung:

Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $w - x$ (Sollwert - Istwert) wird mit dem vorgegebenen Verstärkungsfaktor (in unserem Fall 20) verstärkt. Damit der P-Regler

ein Stellsignal (eine Ventilstellung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Gibt der Regler 0 aus, schließt das Ventil und der Durchfluss geht auf 0.

Die Größe des Stellsignals y lässt sich berechnen. Im eingeschwungenen Zustand geht der Istwert x ungefähr auf 1,7l/s. Der Sollwert w wurde auf 4l/s gesetzt. Damit ergibt sich eine Regeldifferenz von $e = w - x = 4 - 1,7 = 2,3$.

Mit der eingestellten Verstärkung $K = 20$ des P-Reglers lässt sich das Stellsignal berechnen:

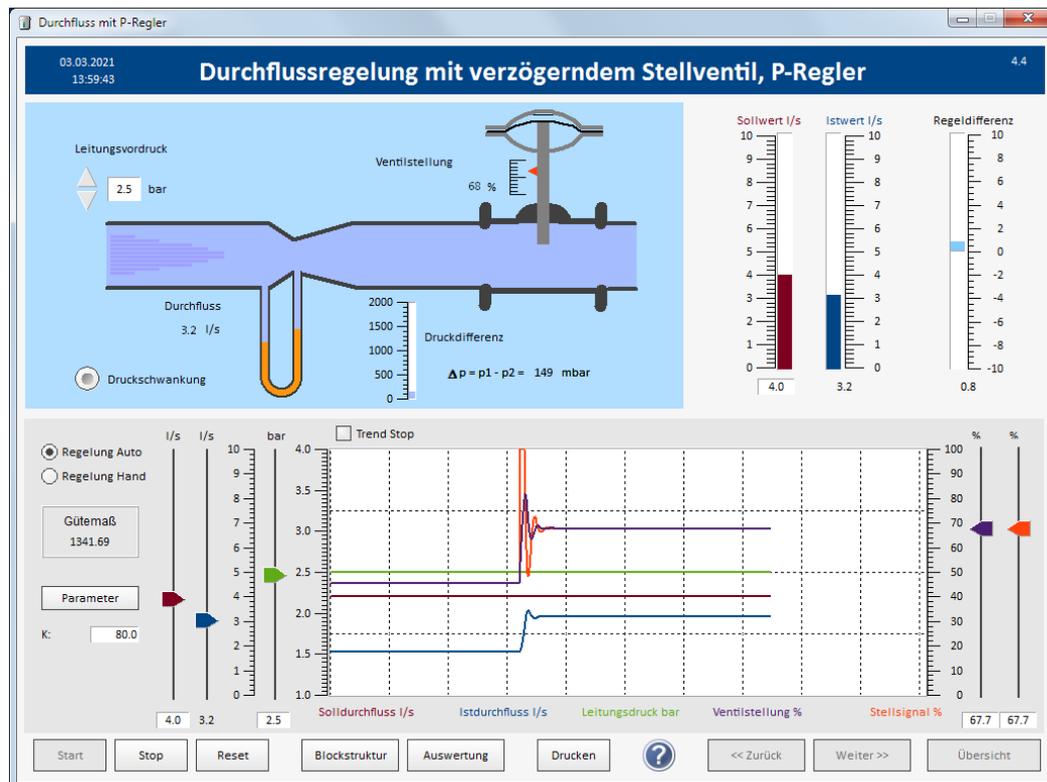
$$\text{Stellsignal } y = K * (w - x) = 20 * (4 - 1,7) = 46.$$

Dies entspricht ungefähr dem angezeigten Wert des Stellsignals von 45,4.

Aufgabe 6:

Verändern Sie die Verstärkung des P-Regler von 20 auf 80 und warten Sie bis der Regelkreis wieder eingeschwungen ist.

Was passiert?



Die Regeldifferenz zwischen Sollwert und Istwert wird mit der Erhöhung der Verstärkung K von 20 auf 80 wesentlich kleiner. Allerdings schafft es der P-Regler auch hier nicht, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Wir erhalten aus dem oben beschriebenen Grund ebenso eine bleibende, wenn auch wesentlich kleinere Regeldifferenz ($e = w - x$).

$$\text{Berechnet ergibt das Stellsignal } y = K * (w - x) = 80 * (4 - 3,2) = 64.$$

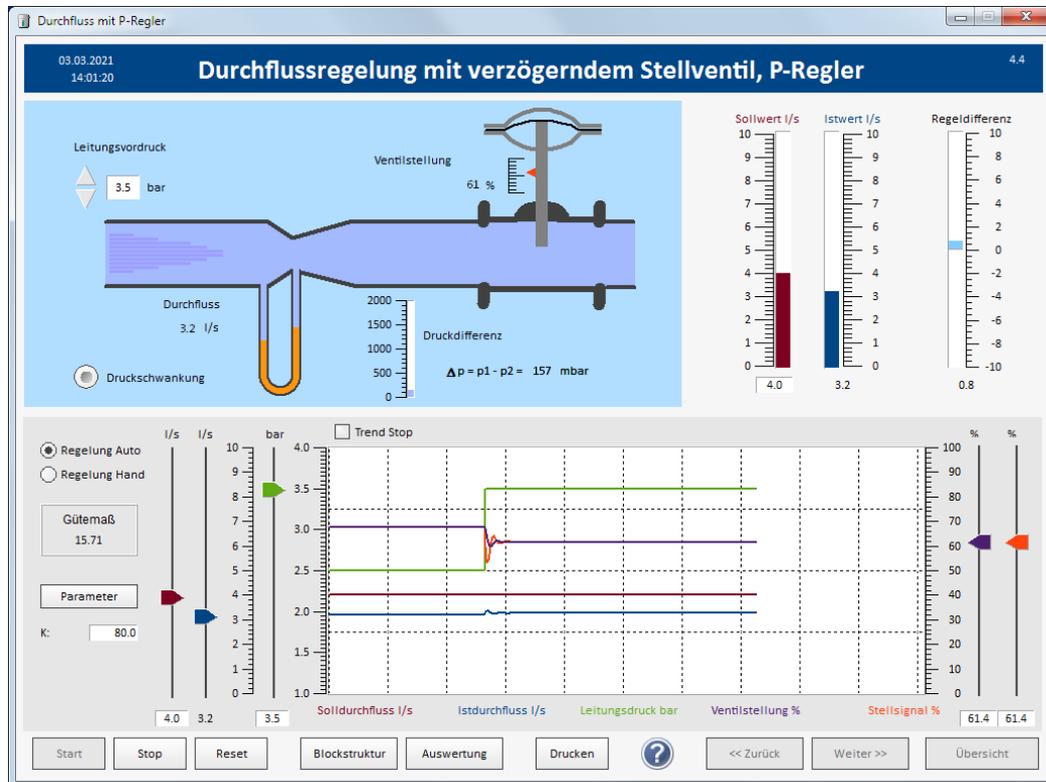
Der Wert entspricht ungefähr dem angezeigten Wert des Stellsignals.

Auch auf eine Störung (Veränderung des Leitungsvordrucks) reagiert der P-Regler. Man erhält ebenso eine bleibende Regeldifferenz.

Aufgabe 7:

Verändern Sie den Leitungsvordruck auf 3,5bar.

Was passiert?



Der P-Regler reagiert auf die Störung, die bleibende Regeldifferenz bleibt.

Wie am Einschwingverhalten zu sehen ist, reagiert der P-Regler sofort und schnell auf Sollwert- und Störwertänderungen (Führungs- und Störverhalten).

5.2.3 Regelung mit I-Regler

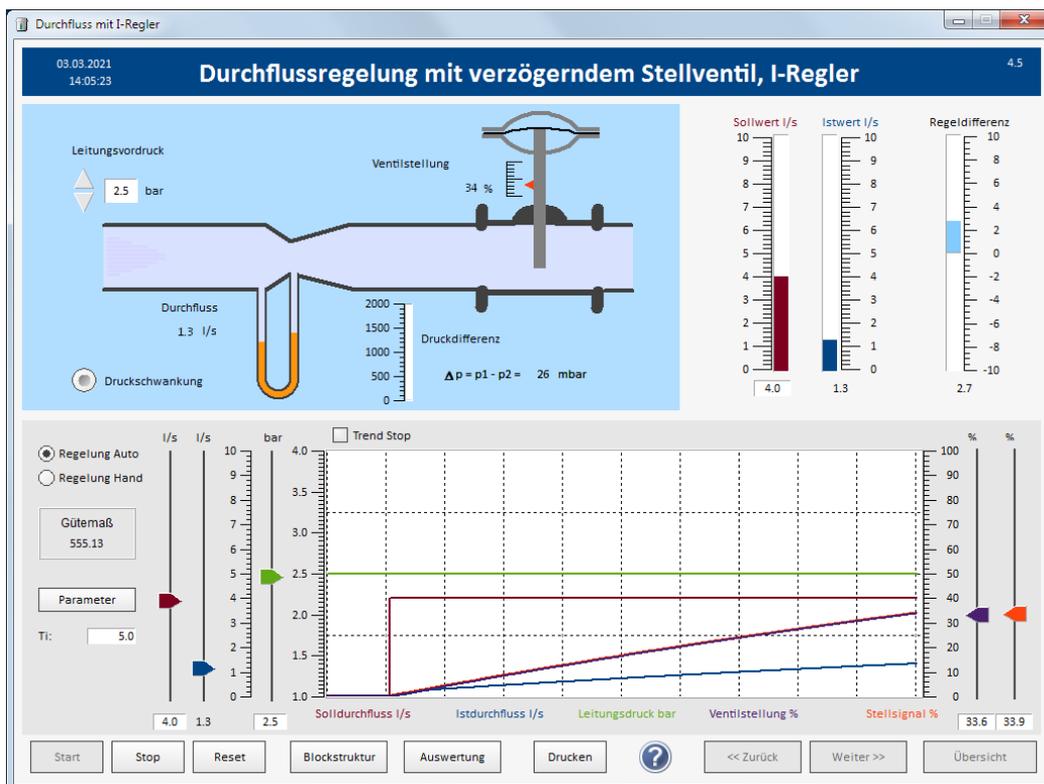
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 4.5 „Regelung mit I-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 8:

Verändern Sie den Sollwert auf 4 l/s.

Was passiert?



Das Ventil wird langsam durch den I-Regler geöffnet. Nach einer langen Zeitspanne erreicht der Istwert den Sollwert.

Durch die Reduzierung der Integrierzeit (z.B. auf 1) erreicht der Istwert den Sollwert schneller.

Aber auch dann ist das Einschwingen sehr langsam.



Der I-Regler ist nicht geeignet für diese Durchflussregelung, da das Einschwingen zu lange dauert.

5.2.4 Regelung mit PI-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 4.6 „Regelung mit PI-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

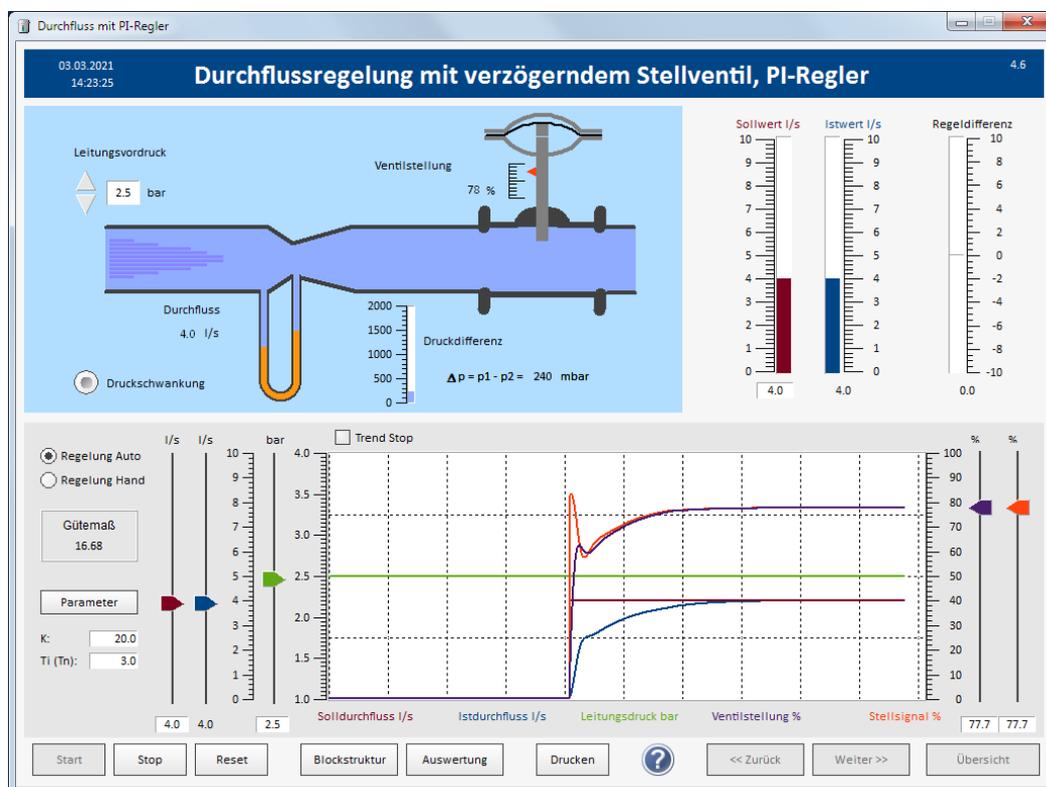
Aufgabe 9:

Behalten Sie die eingestellten Parameter bei:

Verstärkung $K = 20$, Nachstellzeit $T_i = 3$.

Verändern Sie den Sollwert auf 4 l/s.

Beobachten Sie das Einschwingverhalten.



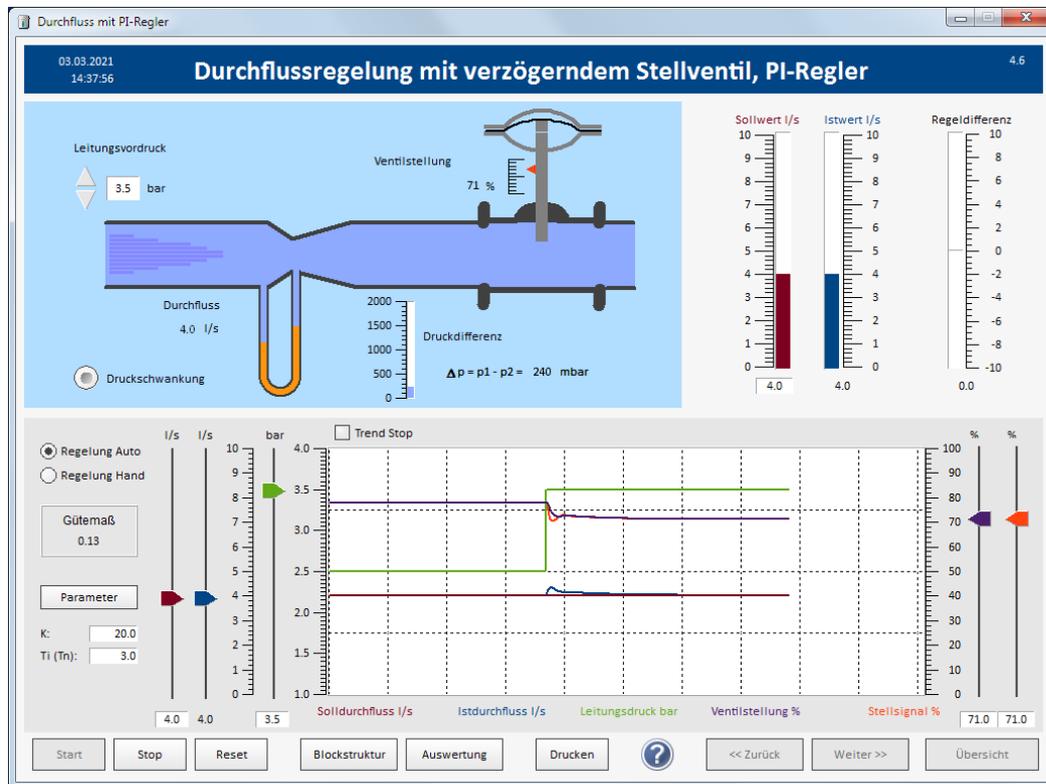
Der Istwert (Regelgröße Istdurchfluss) des Regelkreises mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern erreicht nach einer kurzen Zeit ohne Überschwingen den neuen Sollwert (Führungsgröße Solldurchfluss).

Da der Sollwert geändert wurde, handelt es sich hier um die Untersuchung des Führungsverhaltens.

Aufgabe 10:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Wenn der Regelkreis auf 4l/s eingeschwungen ist, verändern Sie den Leitungsvordruck auf 3,5bar und beobachten Sie das Verhalten.



Der größere Leitungsvordruck bewirkt eine Erhöhung des Durchflusses. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und verkleinert die Ventilöffnung. Nach einer kurzen Einschwingphase erreicht der Istwert wieder den Sollwert.

Da der Regelkreis auf eine Störung reagiert spricht man in diesem Fall vom Störverhalten.

Aufgabe 11:

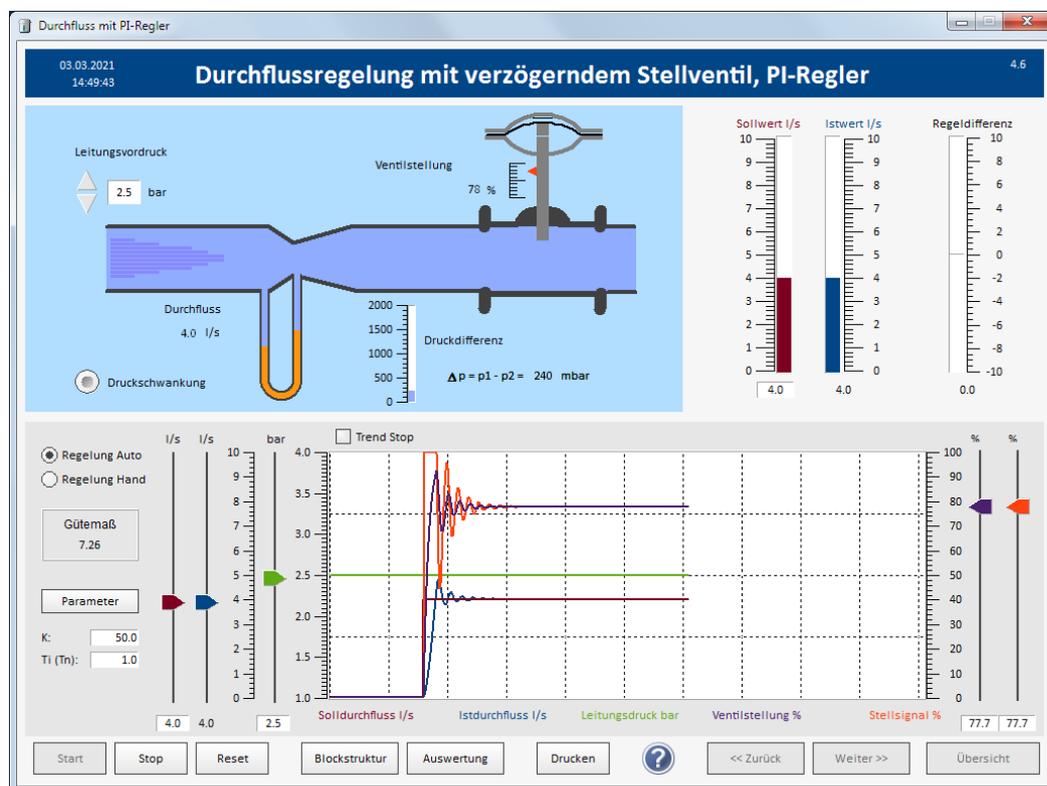
Die in dem Kasten mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwungenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl wird, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwungen, d.h. der Istwert hat den Sollwert erreicht.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Mit den Reglerparametern $K = 20$ und $T_i = 3$ wurde eine Regelgüte von 17,5 erreicht.

Damit die Regelgüte bei allen Versuchen vergleichbar ist, müssen alle Versuche mit den gleichen Anfangszuständen gestartet werden. Hierfür drücken Sie am besten „Reset“. Damit erhalten Soll durchfluss, Ist durchfluss, Stellsignal und Leitungsvordruck wieder ihre Anfangswerte.

Verändern Sie die Reglerparameter und stellen Sie dann den Sollwert auf 4 l/s. Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist.



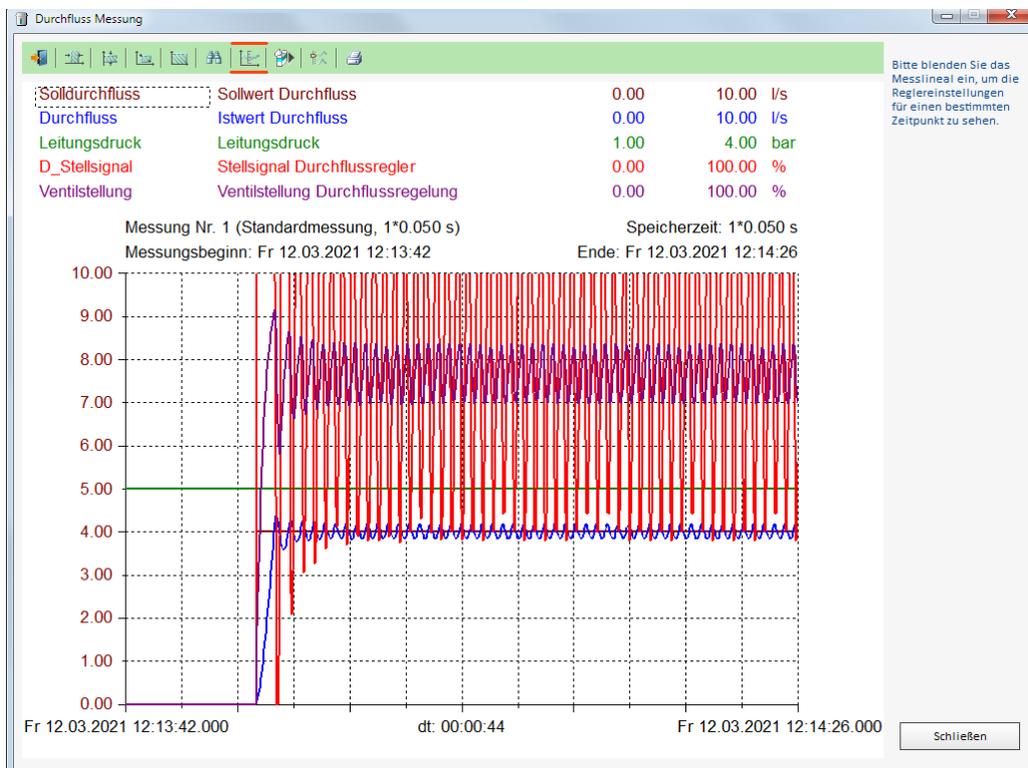
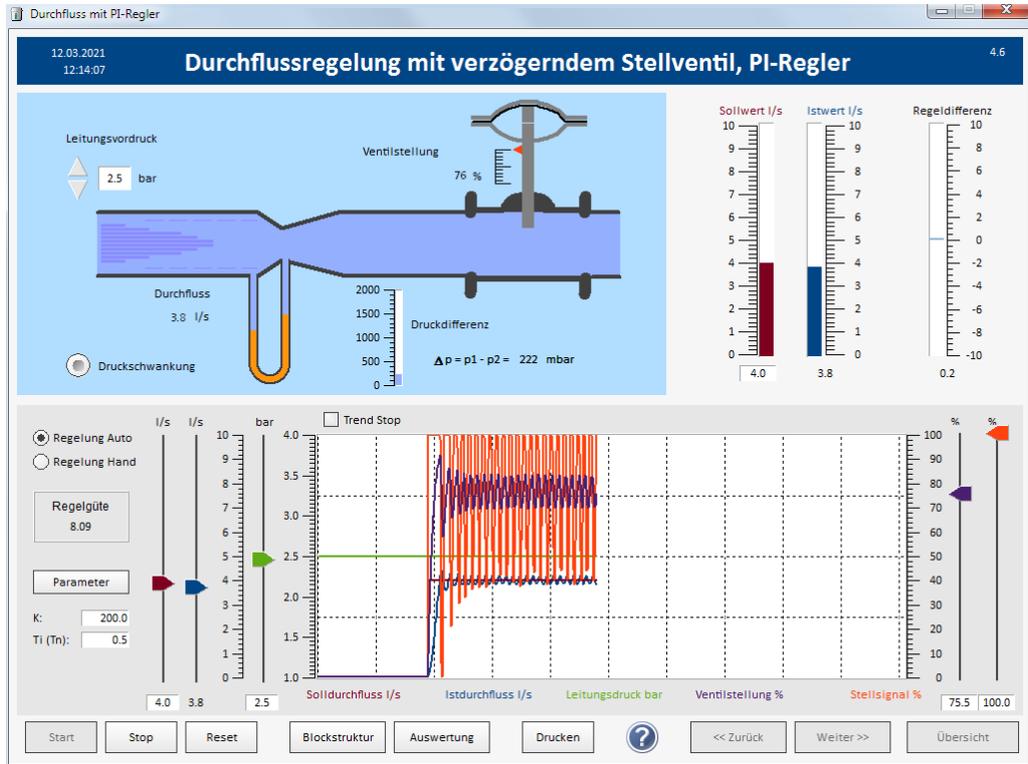
Mit den Parametern $K = 50$ und $T_i = 1$ erreicht man eine Regelgüte von 7,98.

Allerdings wird der Regelkreis sehr unruhig und Stellsignal und Istwert fangen an zu schwingen, bevor sie einschwingen.

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- Reset drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 4 l/s stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Durch Verstellen der Parameter z.B. auf $K = 200$ und $T_i = 0,5$ wird der Regelkreis instabil und führt eine Dauerschwingung durch.



Um ein aperiodisches Einschwingverhalten (ohne Überschwingen) zu erreichen, können Sie die voreingestellten Parameterwerte nehmen.

5.2.5 Regelung mit PID-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 4.7 „Regelung mit PID-Regler“.

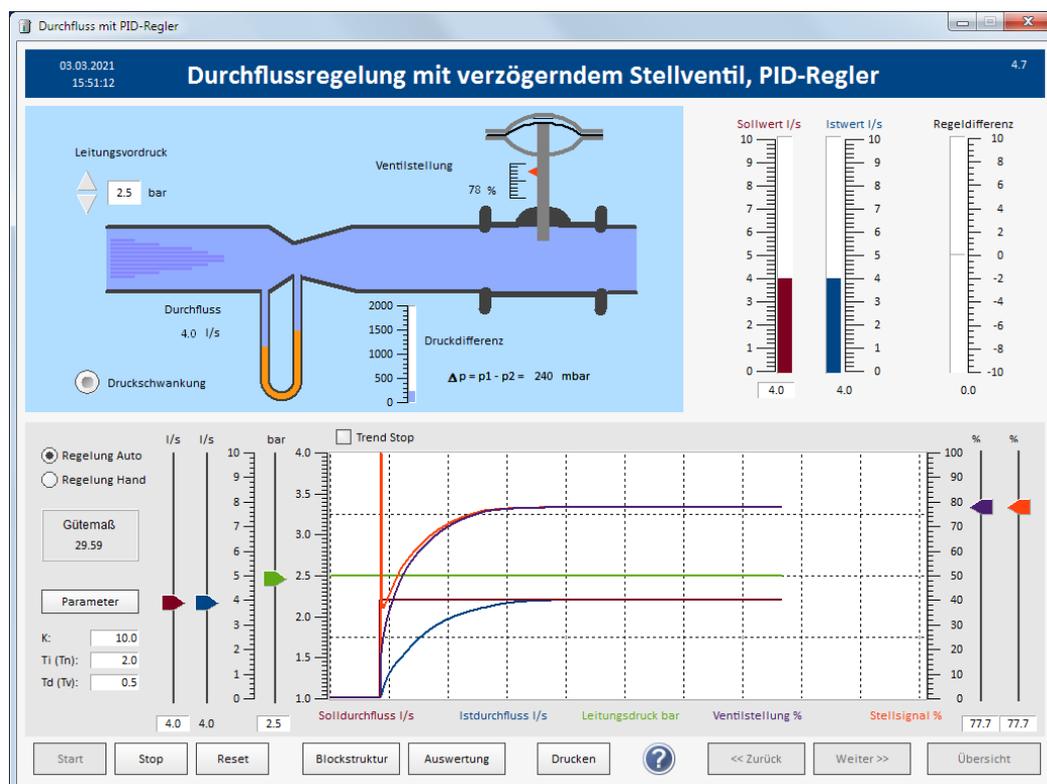
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 12:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 10$, Nachstellzeit $T_i = 2$, Vorhaltezeit $T_d = 0,5$

Ändern Sie den Sollwert auf 4 l/s. Was passiert?



Der Regelkreis geht aperiodisch (ohne Überschwingen) in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals. Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Die Regelgüte geht auf 30,69 und ist damit schlechter als beim PI-Regler mit den Parametern $K = 20$ und $T_i = 3$.

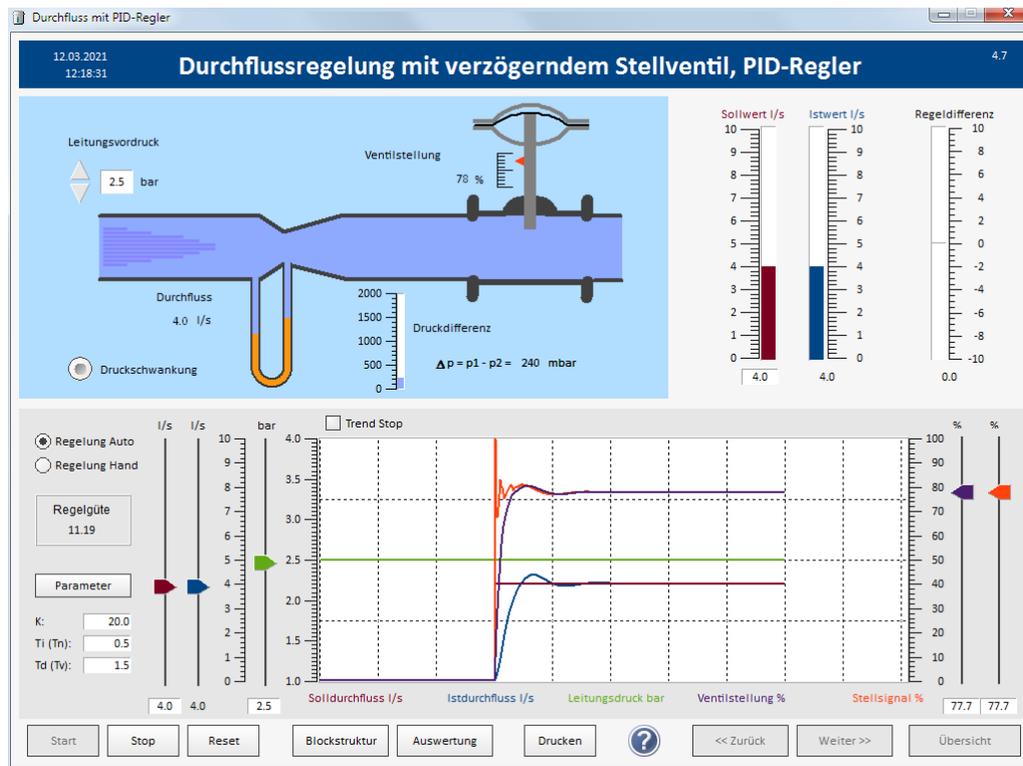
Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

Aufgabe 13:

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch, um die Regelgüte zu verbessern:

- Reset drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 4l/s stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.



Mit den Parametern Verstärkung $K = 20$, Nachstellzeit $T_i = 0,5$ und Vorhaltezeit = 1,5 erhalten Sie z.B. eine Regelgüte von 11,19.

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

5.3 Strecke untersuchen

Wählen Sie bei der Durchflussregelung den Punkt 4.3 „Strecke untersuchen“.

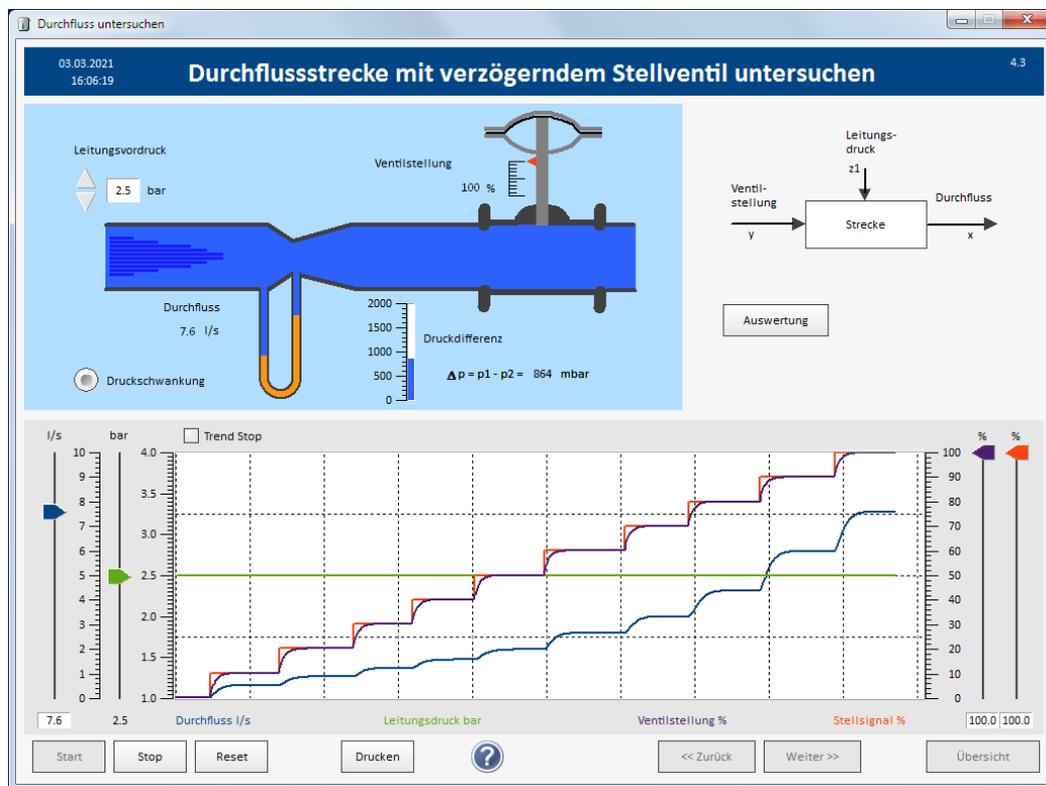
Bei der Durchflussstrecke handelt es sich um eine Strecke mit Ausgleich. Bei einer sprunghaftigen Änderung des Stellsignals schwingt der Istwert (Regelgröße Istdurchfluss) nach einer endlichen Zeit auf einen konstanten Wert ein.

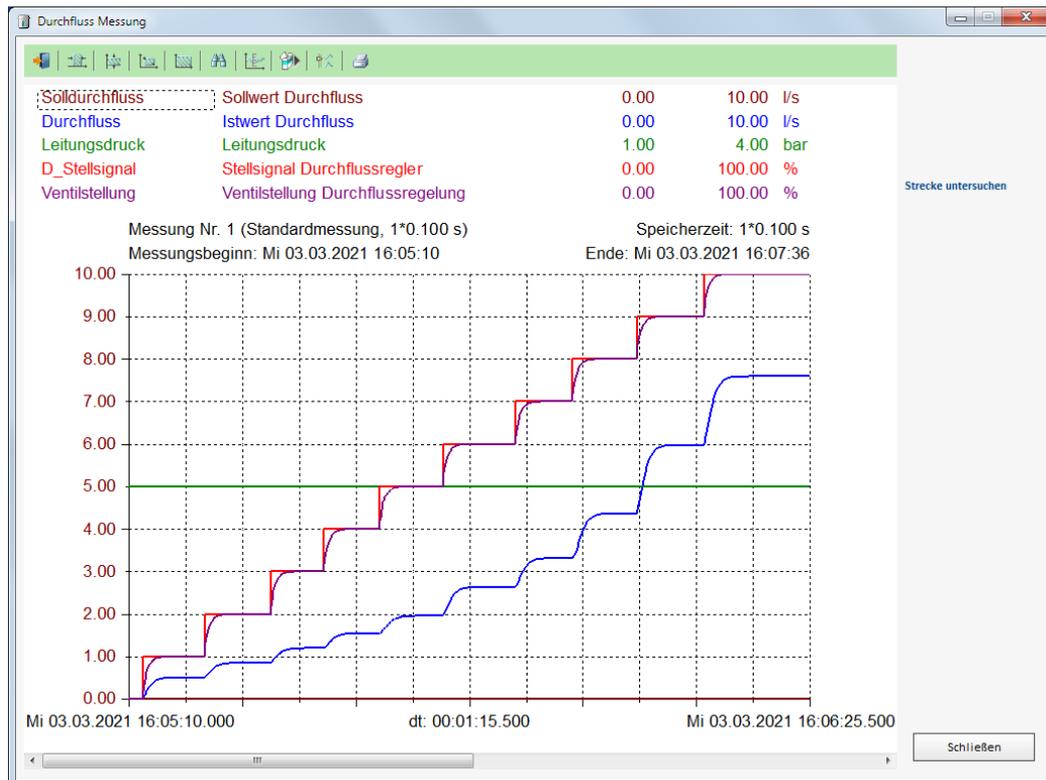
Aufgabe 14:

Drücken Sie „Start“.

Erhöhen Sie das Stellsignal nach der Einschwingphase jeweils um 10%.

Beobachten Sie das Durchflussverhalten.





Wie deutlich zu sehen ist, verhält sich der Durchfluss abhängig vom Arbeitspunkt unterschiedlich, d.h. eine Änderung des Stellsignals von 10% auf 20% bewirkt eine kleinere Änderung des Durchflusses als ein Sprung des Stellsignals von 80% auf 90%.

Damit wird sich auch der Regelkreis je nach Arbeitspunkt unterschiedlich verhalten. Deshalb muss bei einer Regelung berücksichtigt werden, in welchem Arbeitspunkt die Regelung betrieben werden soll.

Im Folgenden wird der Arbeitspunkt um 2l/s (zwischen 1,5l/s und 2,5l/s) betrachtet, für diesen Bereich liegt das Stellsignal zwischen 40% und 60%.

5.4 Reglereinstellverfahren

Um die Reglereinstellverfahren, z.B. nach Chien/Hrones/Reswick zu nutzen, müssen die Strecken untersucht werden.

Auf das Eingangssignal des Systems (Stellsignal der Strecke) wird ein Einheitssprung gegeben. Das Verhalten des Ausgangssignals des Systems (Regelgröße) kann dann ausgemessen werden.

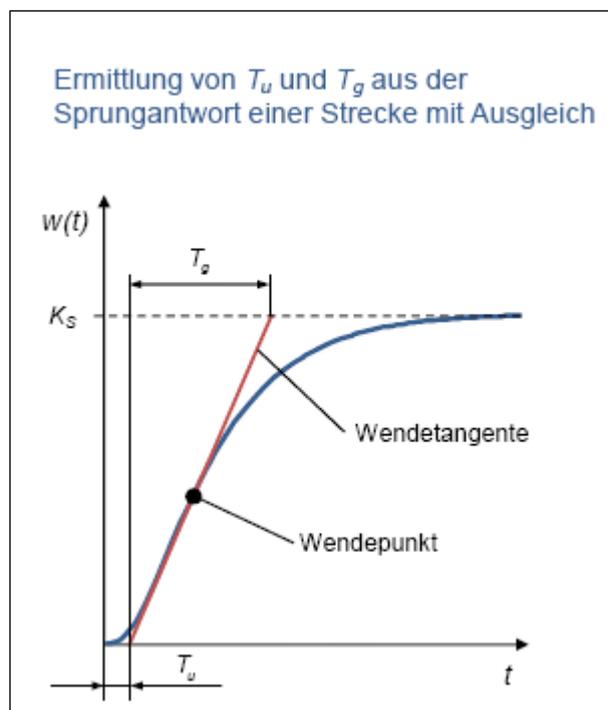
Für die Reglereinstellverfahren für Strecken mit Ausgleich werden die Parameter T_u , T_g und K_s bestimmt, wie in der unteren Abbildung angegeben.

Es bedeuten:

$T_e = T_u =$ Verzugszeit

$T_b = T_g =$ Ausgleichszeit

$K_s =$ Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich



In der neuen Norm werden die Verzugszeit mit T_e , die Ausgleichszeit mit T_b und der Wendepunkt mit P bezeichnet.

Da noch in der überwiegenden Literatur die Bezeichnungen T_u und T_g benutzt werden, verwenden wir beide Bezeichnungen.

Es bedeuten:

- Tu Verzugszeit
- Tg Ausgleichszeit der Regelstrecke
- Ks Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich
- Kis Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich

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

Tabelle 3: Gleichungen zur Berechnung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick

Regler- verhalten	Gütekriterium			
	Mit 20 % Überschwingung		Aperiodischer Regelvorgang	
	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.

[Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg]

Beachten Sie bitte, dass laut neuer Norm folgende Bezeichnungen genutzt werden: Tu = Te, Tg = Tb

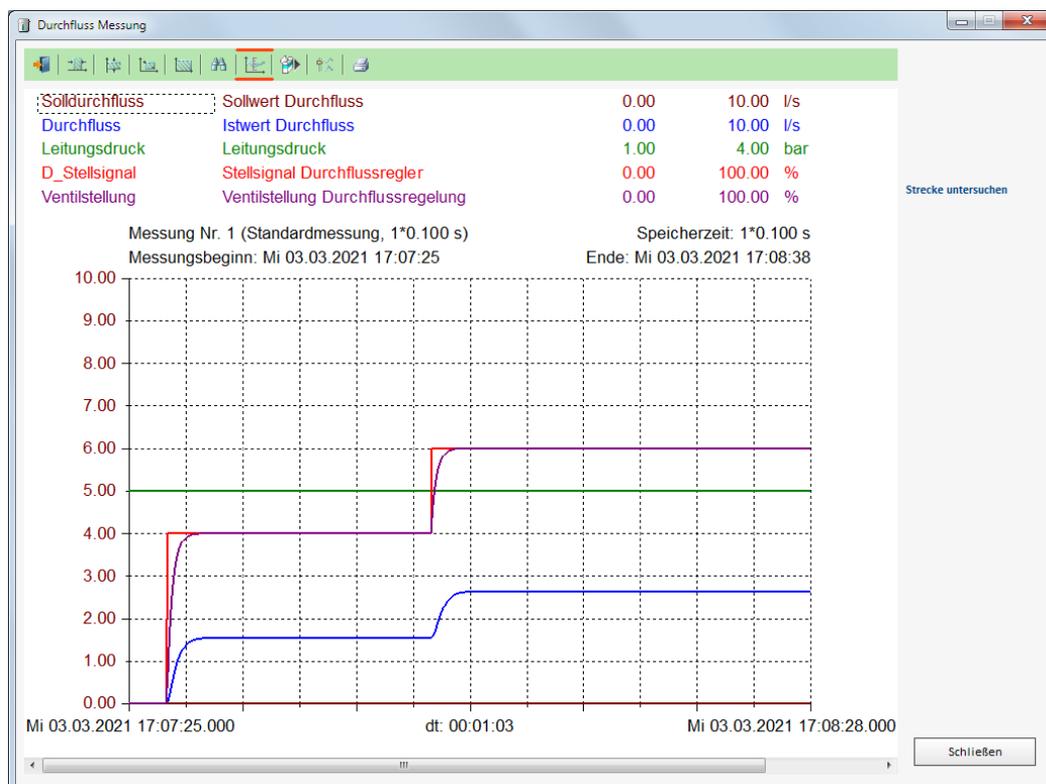
Wählen Sie bei der Durchflussregelung den Punkt 4.3 „Strecke untersuchen“.

Aufgabe 15:

Drücken Sie „Start“ und erhöhen Sie das Stellsignal auf 40%. Warten Sie bis die Regelgröße (Durchfluss) eingeschwungen ist.

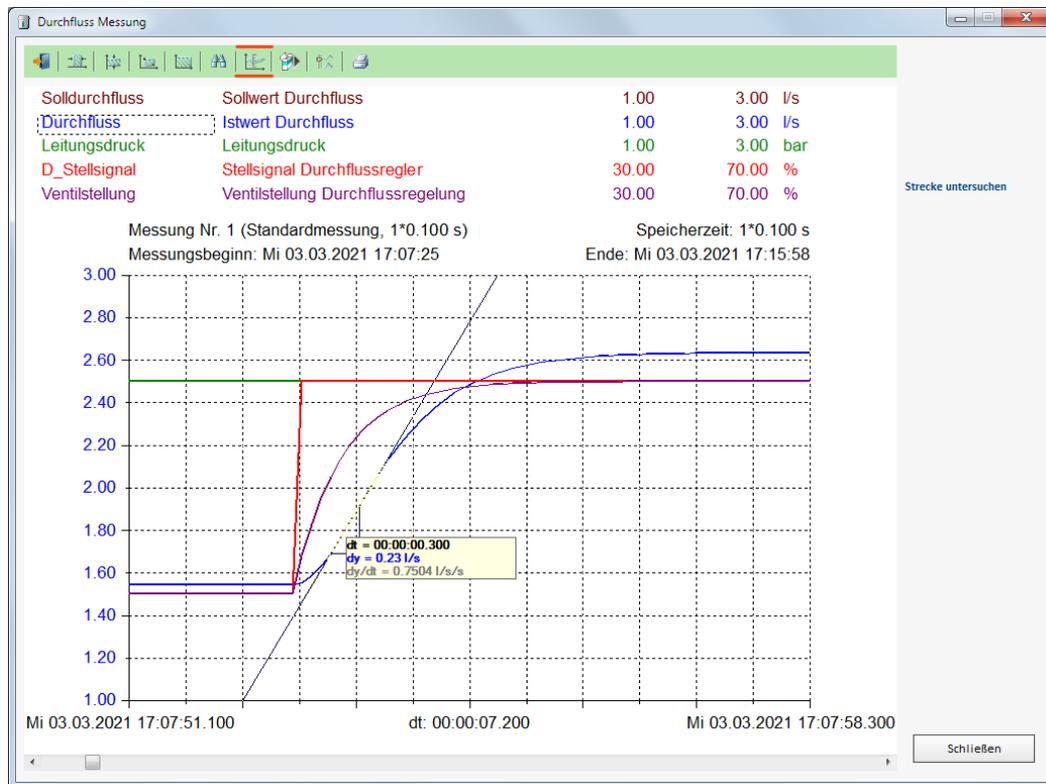
Erhöhen Sie dann das Stellsignal auf 60% und warten Sie wieder bis der Durchfluss eingeschwungen ist.

Drücken Sie auf „Auswertung“ und versuchen Sie das aufgezeichnete Systemverhalten für den Sprung auf 60% auszumessen.



Mit Hilfe der oberen Buttonleiste können Sie Zeit- und Darstellungsausschnitte verändern (Zoomen).

Klicken Sie auf das blaue Signal (Regelgröße Istdurchfluss) und versuchen Sie durch Festhalten und Ziehen die Steigung der Durchflusskurve zu bestimmen.



Aus den oben dargestellten beiden Kurvenverläufen lässt sich die Steigung der Tangente im Wendepunkt ungefähr ablesen: $dx/dt = 0,75\text{l/s/s}$

Nach der sprunghaftigen Änderung des Stellsignals von 40% auf 60% geht der Durchfluss von 1,5l/s nach der Einschwingphase auf 2,6l/s.

Damit lässt sich die Ausgleichszeit T_g berechnen:

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

$$T_g = (2,6\text{l/s} - 1,5\text{l/s}) / 0,75\text{l/s/s} = 1,466\text{s}$$

Da wir für das Stellsignal eine Sprunghöhe von 20% eingegeben haben, müssen wir diese bei der Berechnung von K_s berücksichtigen.

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

$$= (2,6\text{l/s} - 1,5\text{l/s}) / 20 = 0,055$$

Die Verzugszeit T_u lässt sich ausmessen und ist ungefähr 0,2s.

Also: $T_e = T_u = 0,2s$ $T_b = T_g = 1,466s$ $K_s = 0,055$

Damit ergeben sich für den PI-Regler durch Einsetzen der Werte in die Tabelle folgende Parameter:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) = 79,96$$

$$T_n = T_b = 1,47$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) = 46,65$$

$$T_n = 1,2 \cdot T_b = 1,76$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) = 93,29$$

$$T_n = 2,3 \cdot T_e = 0,46$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) = 79,96$$

$$T_n = 4 \cdot T_e = 0,80$$

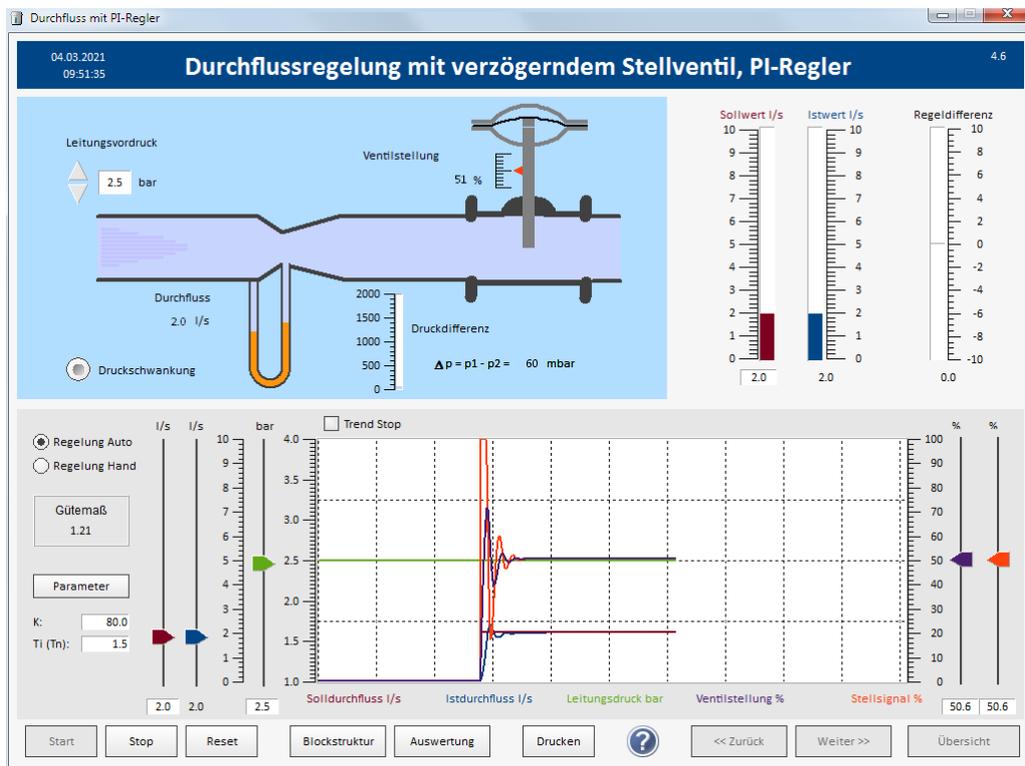


Abbildung 5-1: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

Da die Streckenuntersuchung für einen Arbeitspunkt mit dem Durchfluss von 2l/s durchgeführt wurde, sollte ein Sollwertsprung von 0l/s auf 2l/s genommen werden.

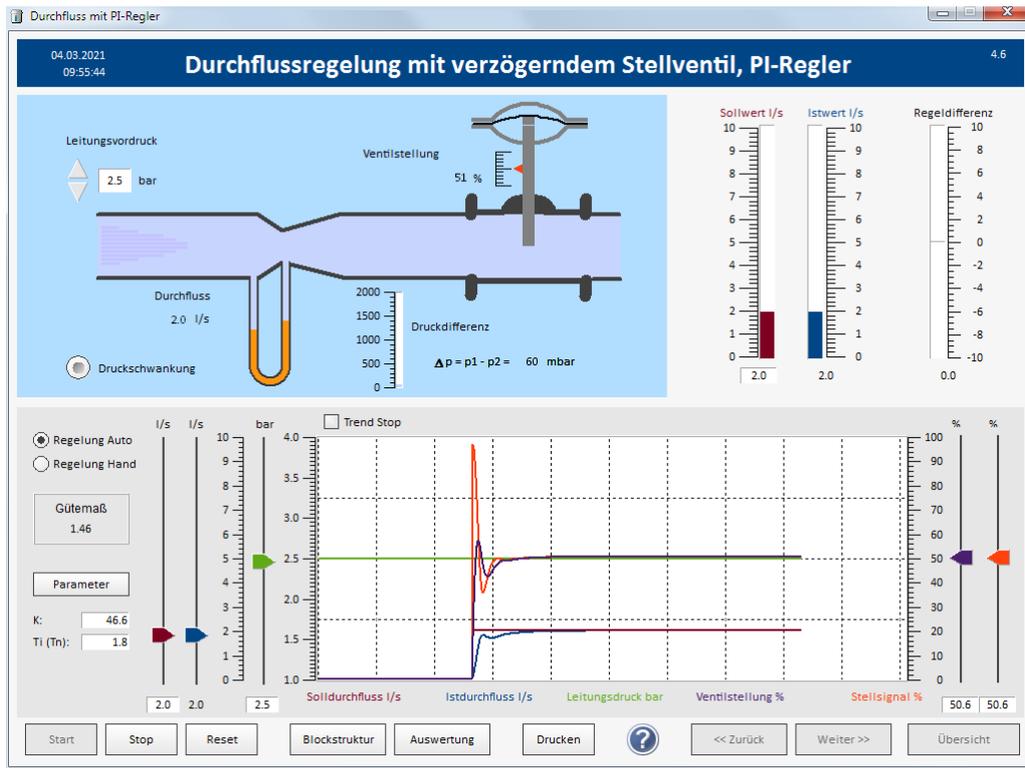


Abbildung 5-2: Führungsverhalten aperiodisch

Störsprung: Leitungsvordruck von 2,5bar auf 3,5bar:

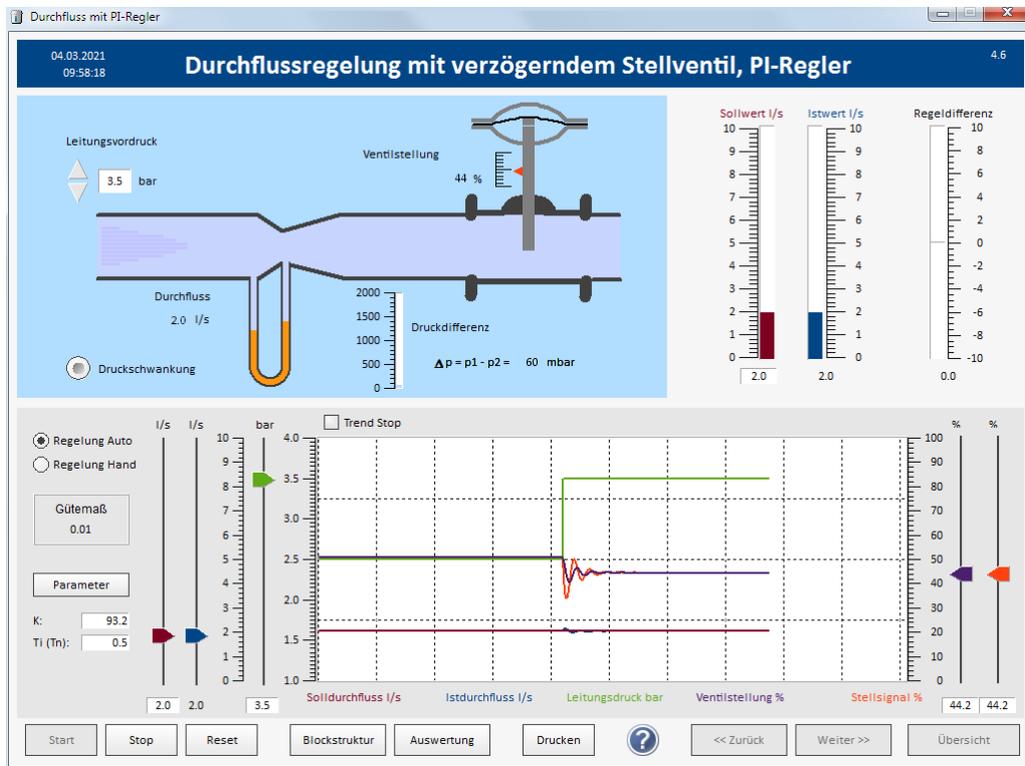


Abbildung 5-3: Störverhalten mit 20% Überschwingen

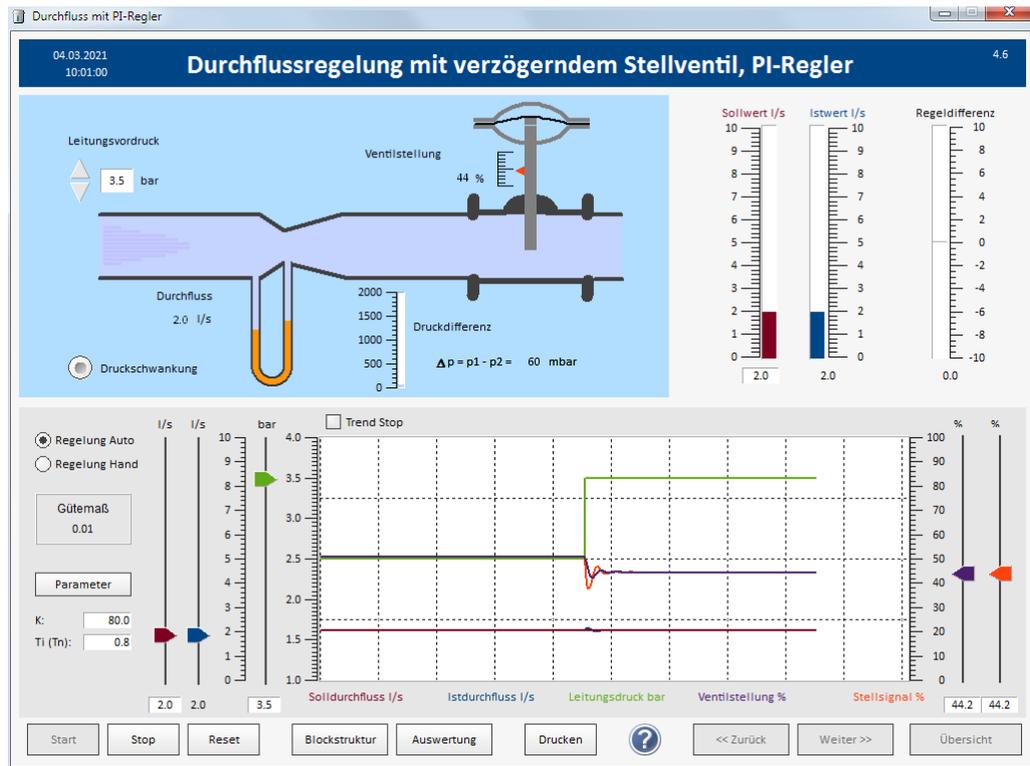


Abbildung 5-4: Störverhalten aperiodisch

Für den PID-Regler erhalten wir durch Einsetzen der Werte in die Tabelle folgende Parameter:

PID-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$\begin{aligned}
 K &= 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) && 126,61 \\
 T_n &= 1,35 \cdot T_b && 1,98 \\
 T_d &= 0,47 \cdot T_e && 0,09
 \end{aligned}$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$\begin{aligned}
 K &= 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) && 79,96 \\
 T_n &= T_b && 1,47 \\
 T_d &= 0,5 \cdot T_e && 0,10
 \end{aligned}$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$\begin{aligned}
 K &= 1,2 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) && 159,93 \\
 T_n &= 2 \cdot T_e && 0,40 \\
 T_d &= 0,42 \cdot T_e && 0,08
 \end{aligned}$$

Störverhalten aperiodisch

$$\begin{aligned}
 K &= 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) && 126,61 \\
 T_n &= 2,4 \cdot T_e && 0,48 \\
 T_d &= 0,42 \cdot T_e && 0,08
 \end{aligned}$$

Führungssprung von 0l/s auf 2l/s:

Als Vorhaltezeit wurde 0,2s genommen, da die Eingabe auf 0,2s beschränkt ist

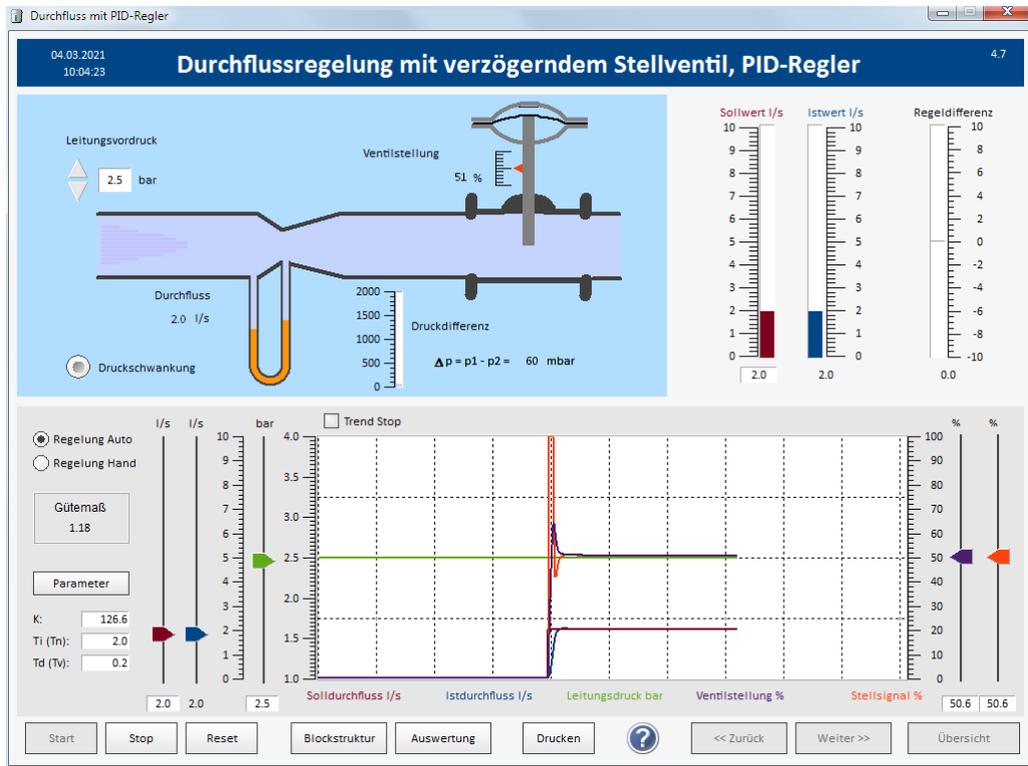


Abbildung 5-5: Führungsverhalten mit 20% Überschwngen

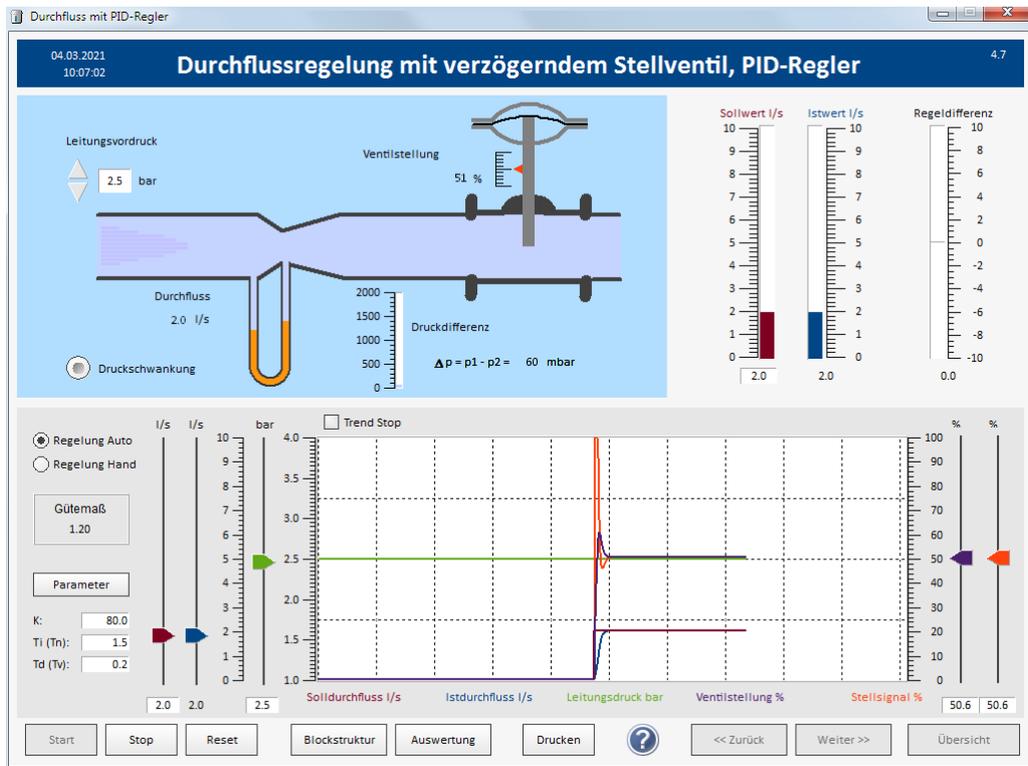


Abbildung 5-6: Führungsverhalten aperiodisch

Störsprung Leitungsdruck von 2,5bar auf 3,5bar.

Als Vorhaltezeit wurde 0,2s genommen, da die Eingabe auf 0,2s beschränkt ist

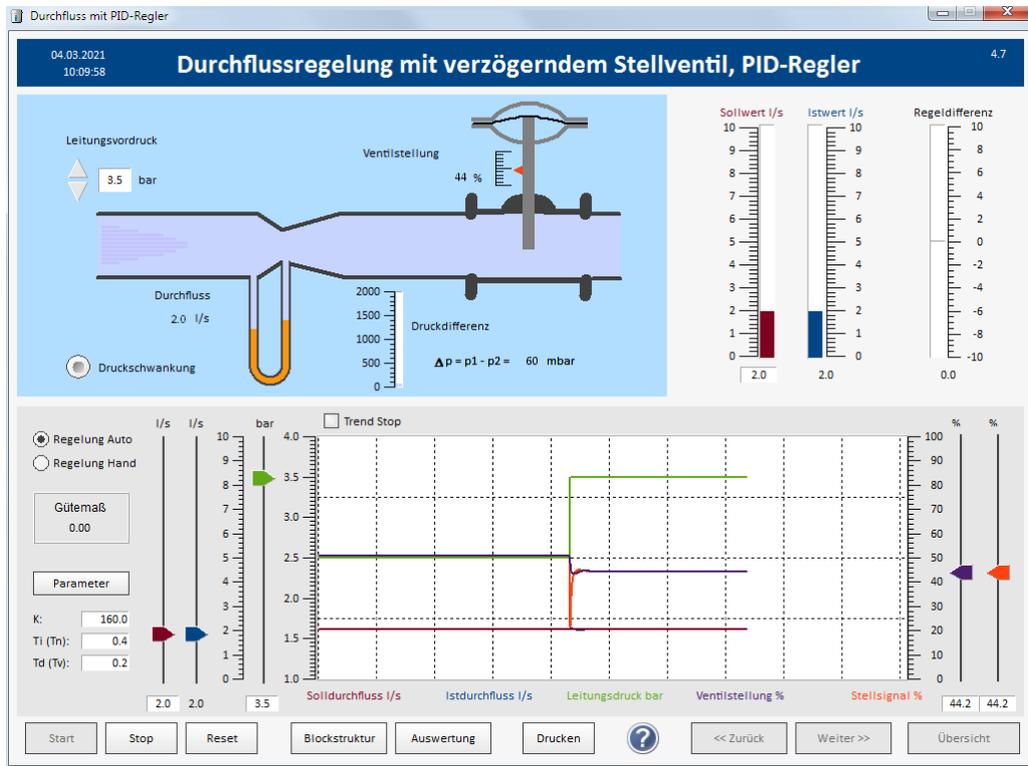


Abbildung 5-7: Störverhalten mit 20% Überschwingen

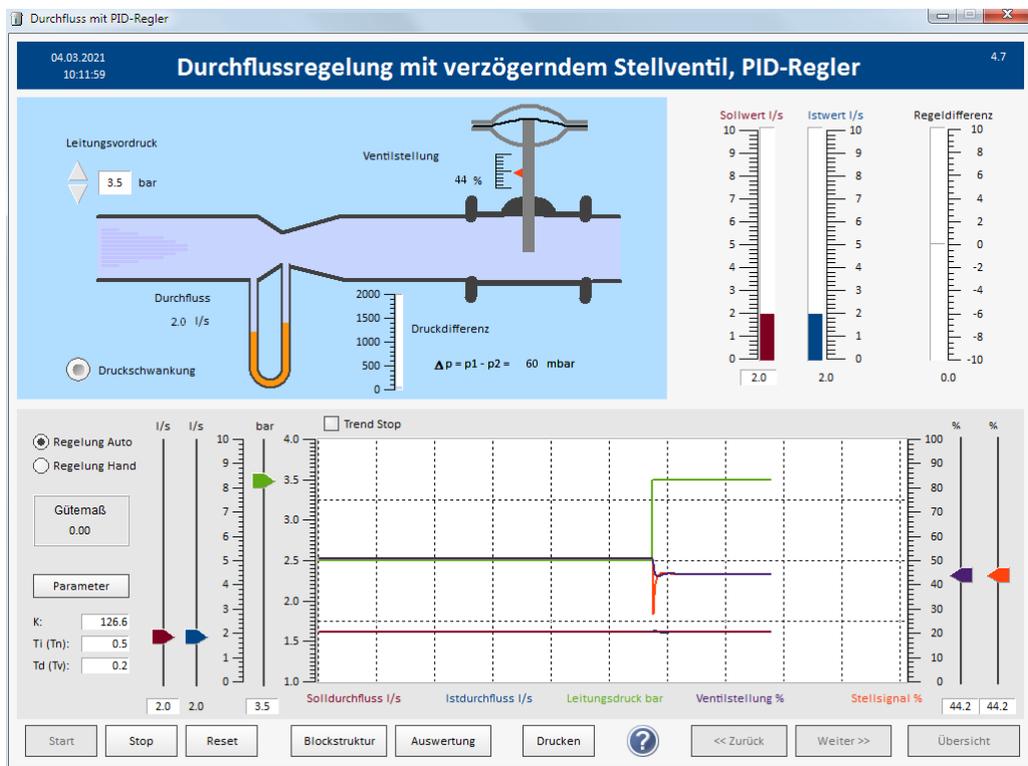


Abbildung 5-8: Störverhalten aperiodisch

5.5 Beurteilung Reglereinstellverfahren

Reglereinstellverfahren sind empirisch bestimmte Verfahren, die geeignet sind, um Daumenwerte für gute Reglerparameter zu berechnen.

Die Einstellungen für die Reglerparameter unterscheiden zwischen Stör- und Führungsverhalten. Es werden unterschiedliche Reglerparameter berechnet.

Will man mit seinen Reglerparametern beide Fälle (Stör- und Führungsverhalten) abdecken, muss man einen Kompromiss zwischen den berechneten Parametern des Störverhaltens und des Führungsverhaltens eingehen.

Die obigen Beispiele zeigen, dass man mit den berechneten Reglerparametern ein vernünftiges Regelkreisverhalten erhält. Allerdings entspricht das Verhalten nicht genau dem Einschwingverhalten, wie es in der Tabelle gewählt wurde.

Dass das System nicht genau aperiodisch bzw. mit 20% Überschwingen eingeschwungen ist, liegt auch daran, dass das Stellsignal teilweise in die Begrenzung geht und die Zeitkonstanten nicht exakt berechnet werden können.

Bei den gezeigten Beispielen und Aufgaben waren die von Chien/Hrones/Reswick vorgeschlagenen Reglerparameter für diese Strecke gut geeignet.

6 Temperaturregelung (ohne/mit Verzögerung), Regelungstechnisches Praktikum I

Bei dem Prozess handelt es sich um einen Behälter, der kontinuierlich von Wasser durchströmt wird. Eine Füllstandänderung findet dabei nicht statt. Mit Hilfe einer elektrischen Heizung kann die Temperatur des Wassers in dem Behälter beeinflusst werden. Die regelungstechnische Aufgabe besteht darin, die Temperatur des Wassers im Behälter durch Veränderung der Heizleistung so zu regeln, dass diese einem vorgegebenen Sollwert entspricht. Die Heizleistung ist die Eingangsgröße (Stellgröße), die Temperatur des abfließenden Wassers die Ausgangsgröße (Regelgröße) des Systems. Schwankungen in der Temperatur im Zulauf stellen eine Störgröße dar.

In diesem Kapitel werden die Punkte „3. Temperaturregelung“ und „4. Temperaturregelung mit Verzögerung“ zusammen behandelt, da es sich bei den Prozessen um die gleichen Anlagen handelt. Der Unterschied besteht darin, dass unter „3. Temperaturregelung“ die Temperatur (Regelgröße) im Behälter während im anderen Fall die Temperatur im Abfluss gemessen wird. Dadurch ergibt sich eine verzögerte Messung der Regelgröße (Isttemperatur). Die Temperatur im Behälter wird erst zeitverzögert im Abflussrohr gemessen.

Obwohl die beiden Anlagen bis auf die Temperaturmessung gleich sind, verhalten sich die Systeme unterschiedlich.

6.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum I den Punkt 3.1 „Ungeregelte Anlage“.

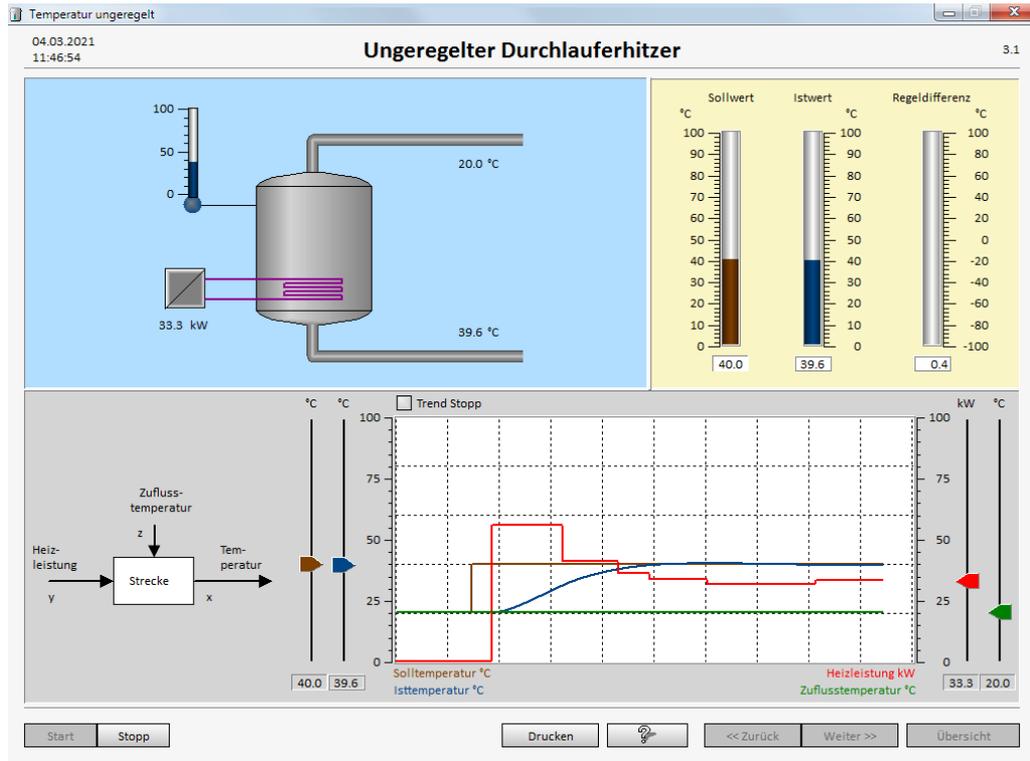
Drücken Sie auf „Start“.

Sie können die Werte für den Sollwert (Solltemperatur °C), den Stellwert (Heizleistung kW) und die Störung (Zuflusstemperatur °C) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

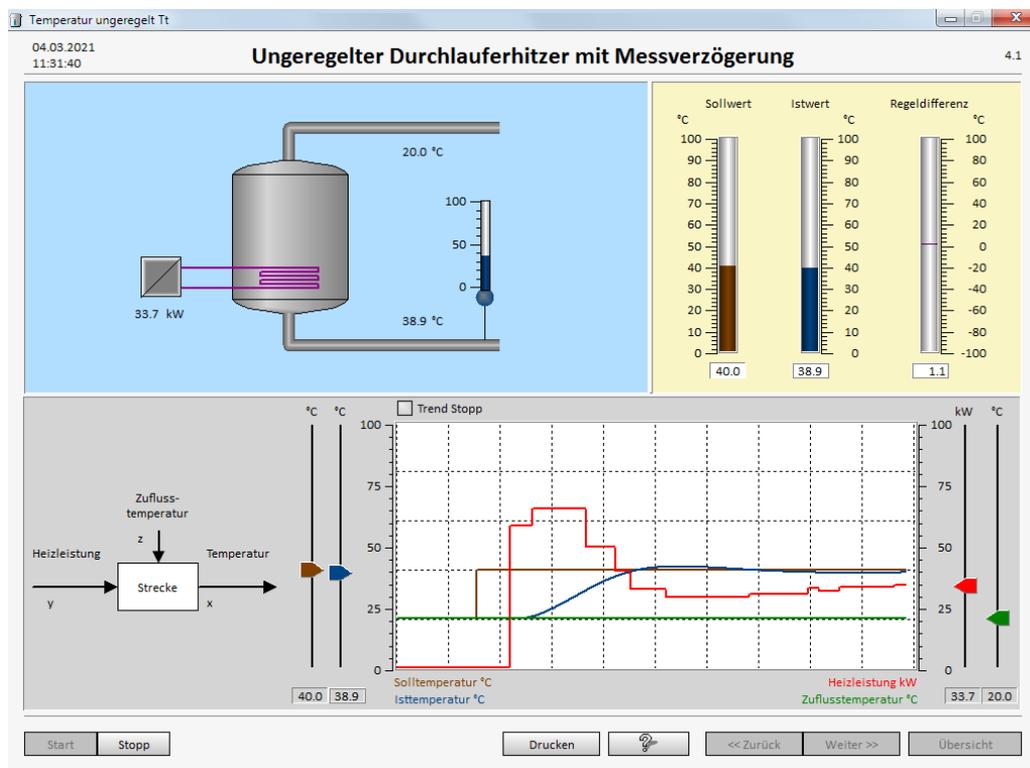
Aufgabe 1:

Verstellen Sie die Solltemperatur (Führungsgröße) auf 40°C und versuchen Sie dann durch Verstellen der Heizleistung (Stellgröße) die Isttemperatur (Regelgröße) im Behälter auf die Solltemperatur zu bringen.

In diesem Fall spricht man vom Führungsverhalten. Der Sollwert wird verstellt und es wird versucht, den Istwert (Regelgröße) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen.



Wählen Sie Punkt 4.1 (Temperaturregelung mit Verzögerung, Ungeregelte Anlage) und führen Sie den gleichen Versuch durch

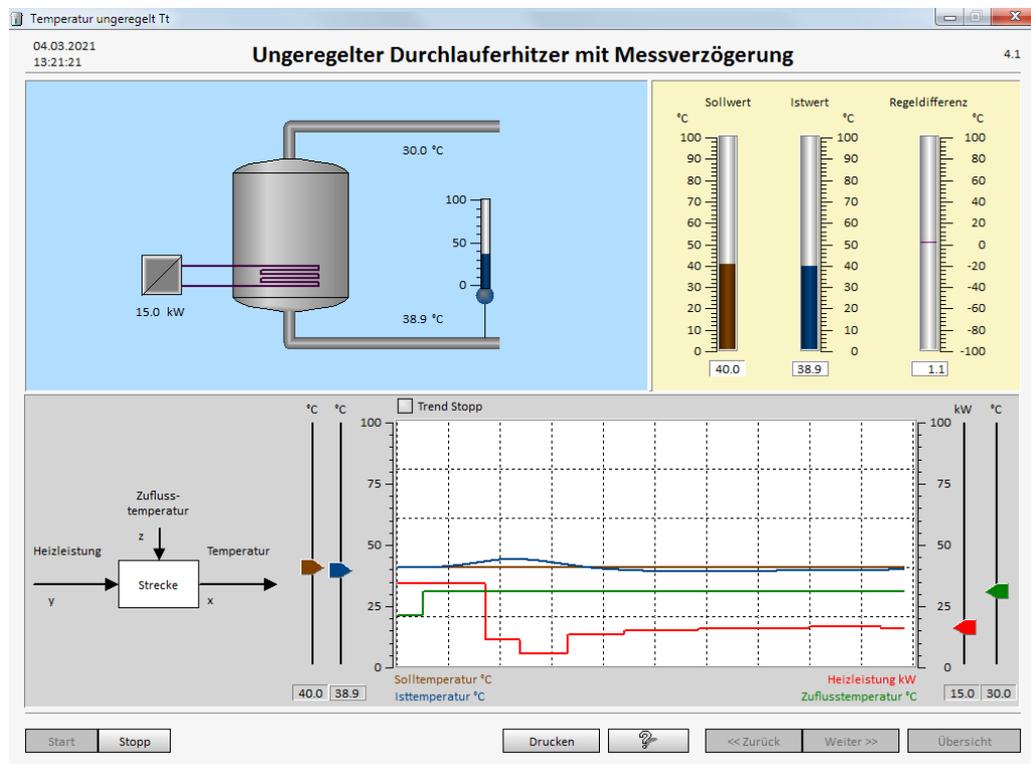
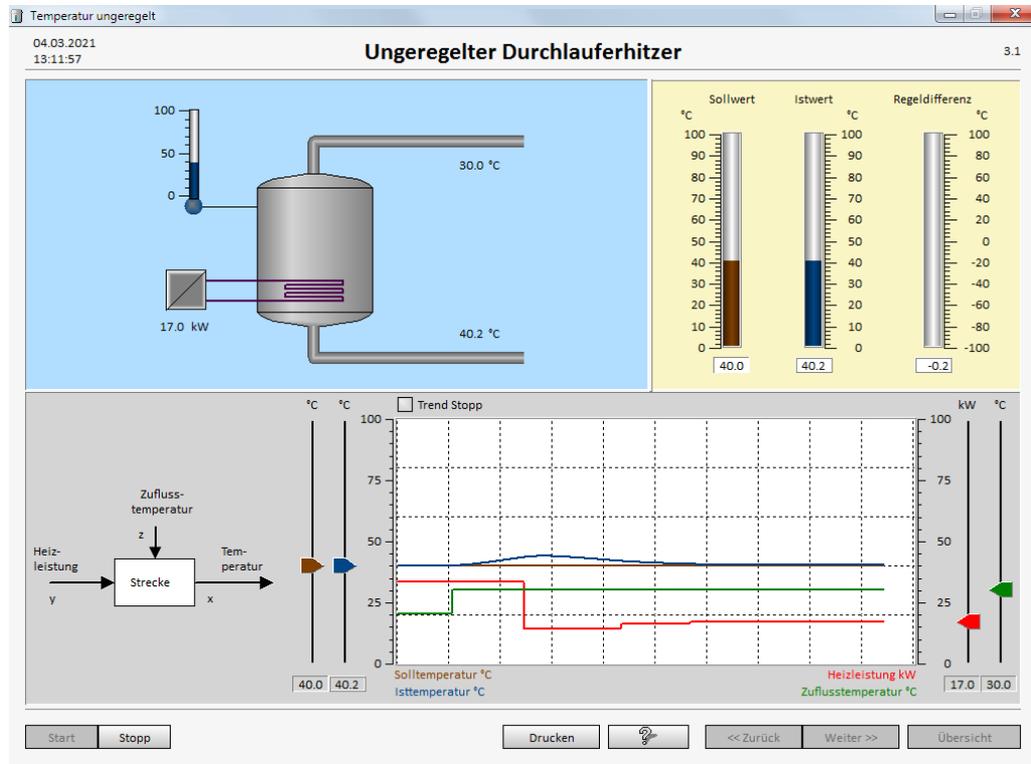


Im unteren Bild ist zu sehen, dass nach der Änderung der Heizleistung die Isttemperatur erst später anfängt zu steigen.

Aufgabe 2:

Geben Sie eine Störung vor. Verändern Sie die Zuflusstemperatur auf 30°C.

Beschreiben Sie das Verhalten und versuchen Sie die Störung auszuregeln.



Durch die steigende Zuflusstemperatur steigt die Innentemperatur und die Heizleistung muss reduziert werden. Wird versucht eine Störung auszuregeln, dann spricht man von der Untersuchung des Störverhaltens.

6.2 Regelkreisuntersuchung

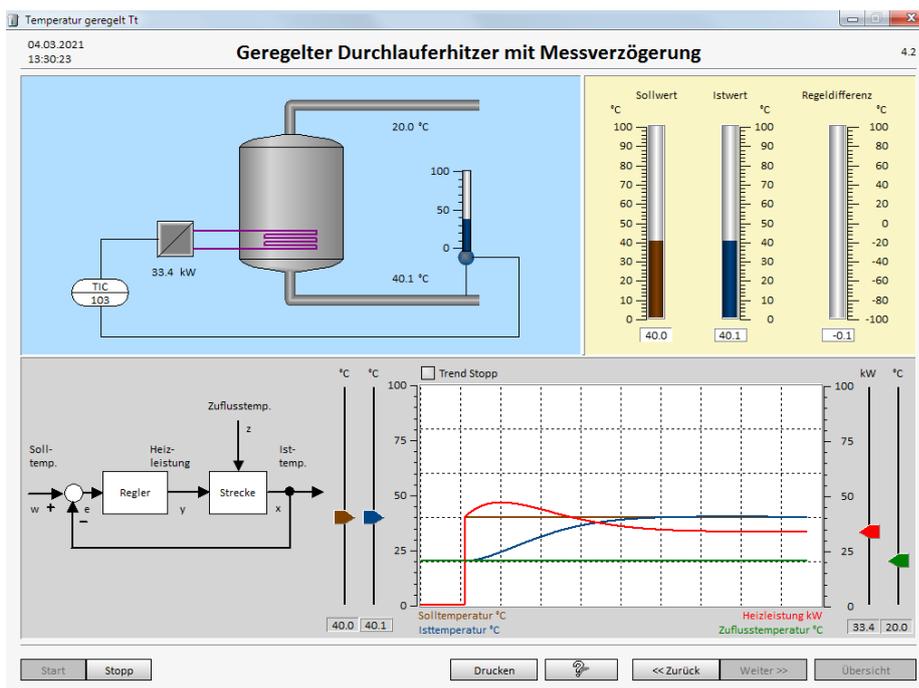
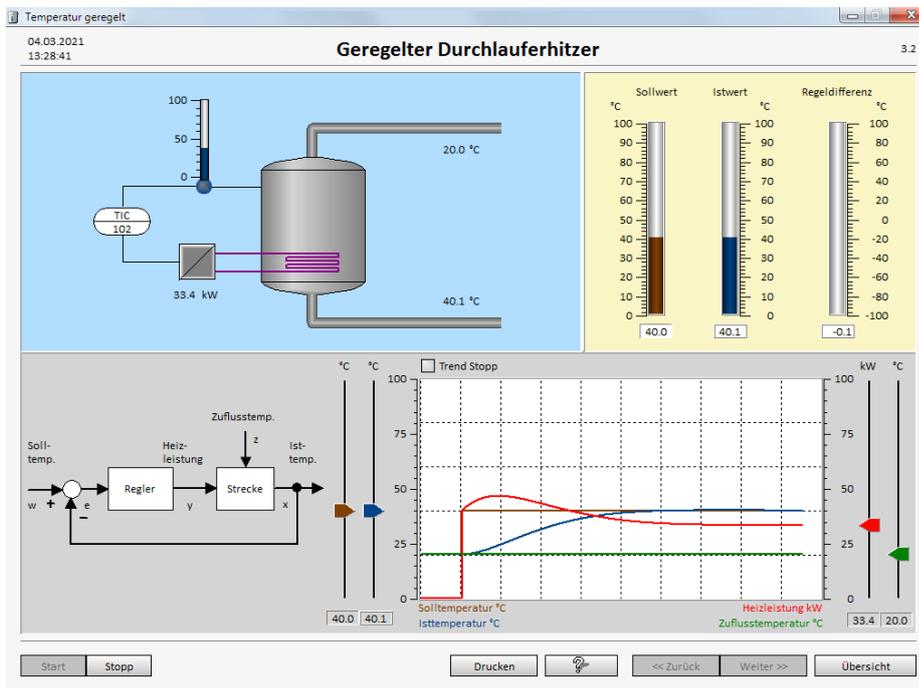
6.2.1 Geregelte Anlage

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.2 bzw. 4.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung durch den Benutzer ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 3:

Drücken Sie „Start“ und stellen Sie den Sollwert auf 40°C.



Mit einem kleinen Überschwingen geht der Istwert in beiden Fällen nach einer gewissen Zeit auf den Sollwert.

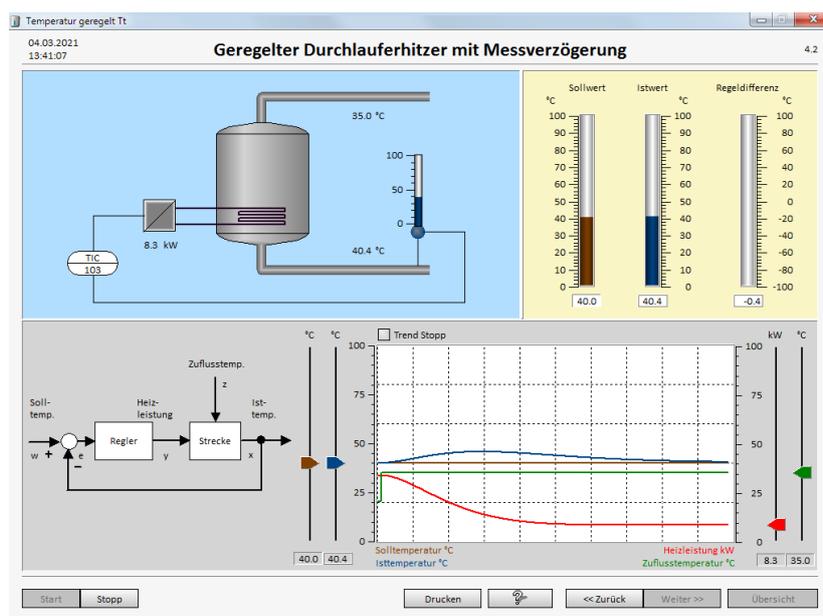
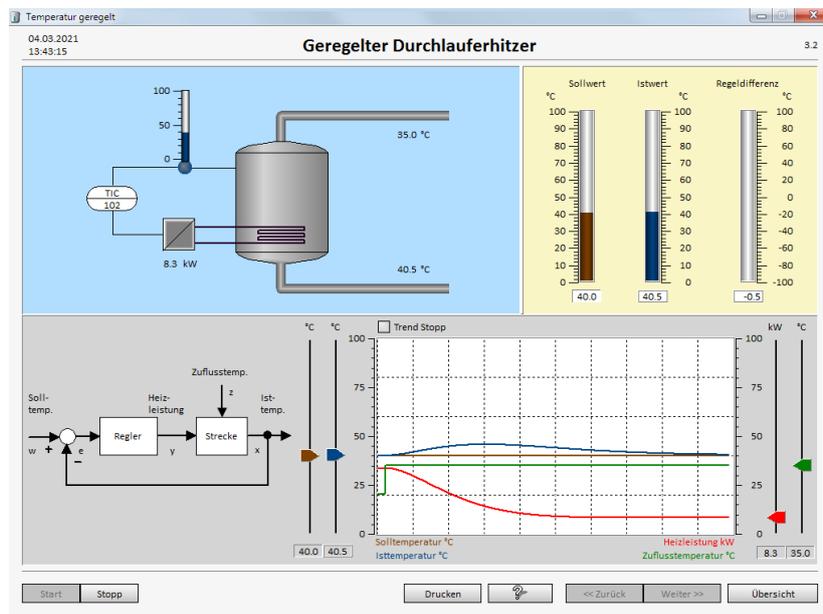
Die Untersuchung des Systems auf eine Änderung des Sollwertes (Führungsgröße) wird als Führungsverhalten bezeichnet.

Aufgabe 4:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Setzen Sie den Sollwert auf 40°C und warten Sie bis das System eingeschwungen ist (die Isttemperatur hat 40°C erreicht und sie ändert sich nicht mehr).

Erhöhen Sie die Zuflusstemperatur auf 35°C. Beobachten Sie das Systemverhalten.



Die Innentemperatur fängt an zu steigen. Deshalb reduziert der Regler die Heizleistung.

6.2.2 Regelung mit P-Regler

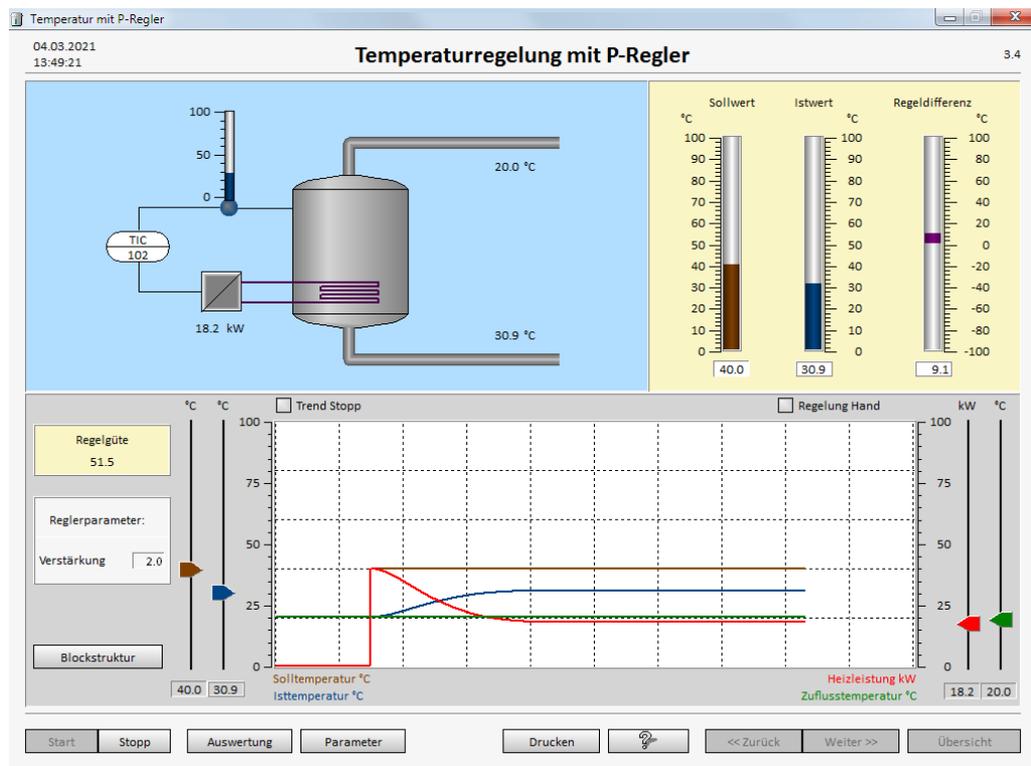
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.4 bzw. 4.4 „Regelung mit P-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 5:

Verändern Sie die Solltemperatur (Führungsgröße) auf 40°C und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.

Beobachten Sie das Verhalten.

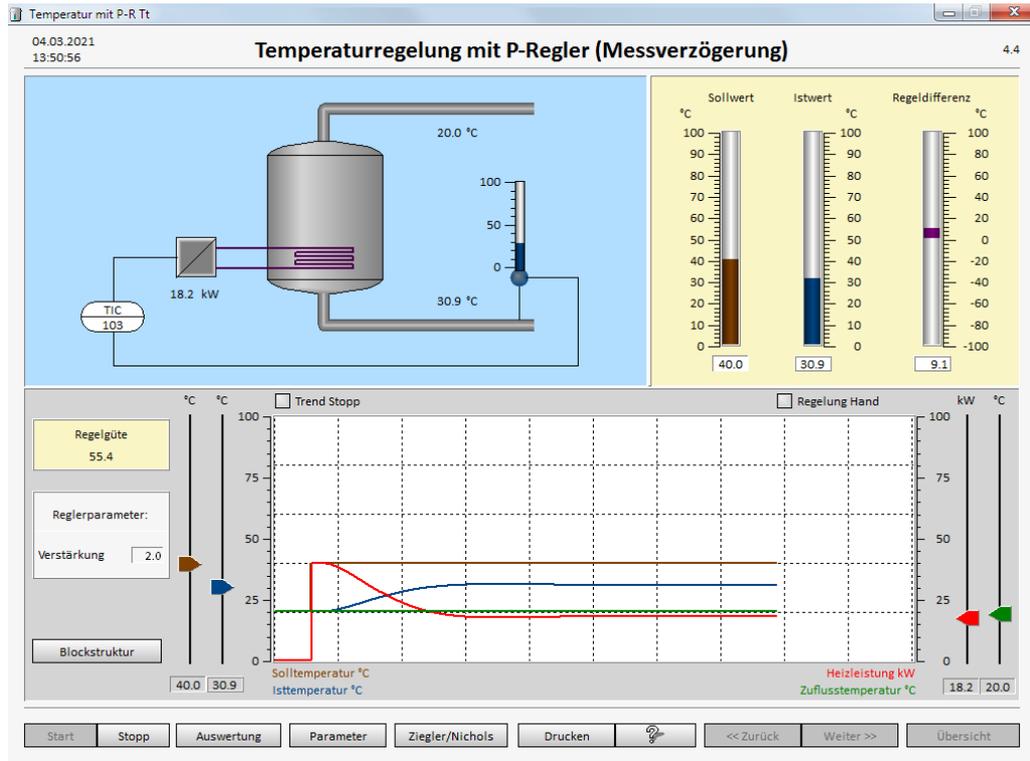


Nach der Einschwingphase ist deutlich zu sehen, dass der Istwert (Regelgröße) den Sollwert (Führungsgröße) nicht erreicht. Wir erhalten eine bleibende Regeldifferenz.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$



Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $w - x$ (Sollwert - Istwert) wird mit dem vorgegebenen Verstärkungsfaktor (hier $K = 2$) verstärkt. Damit der P-Regler ein Stellsignal (eine Heizleistung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Gibt der P-Regler 0 aus, wird die Heizleistung ausgeschaltet.

Der Wert des Stellsignals y lässt sich im eingeschwungenen Fall durch die Regeldifferenz und die Verstärkung berechnen.

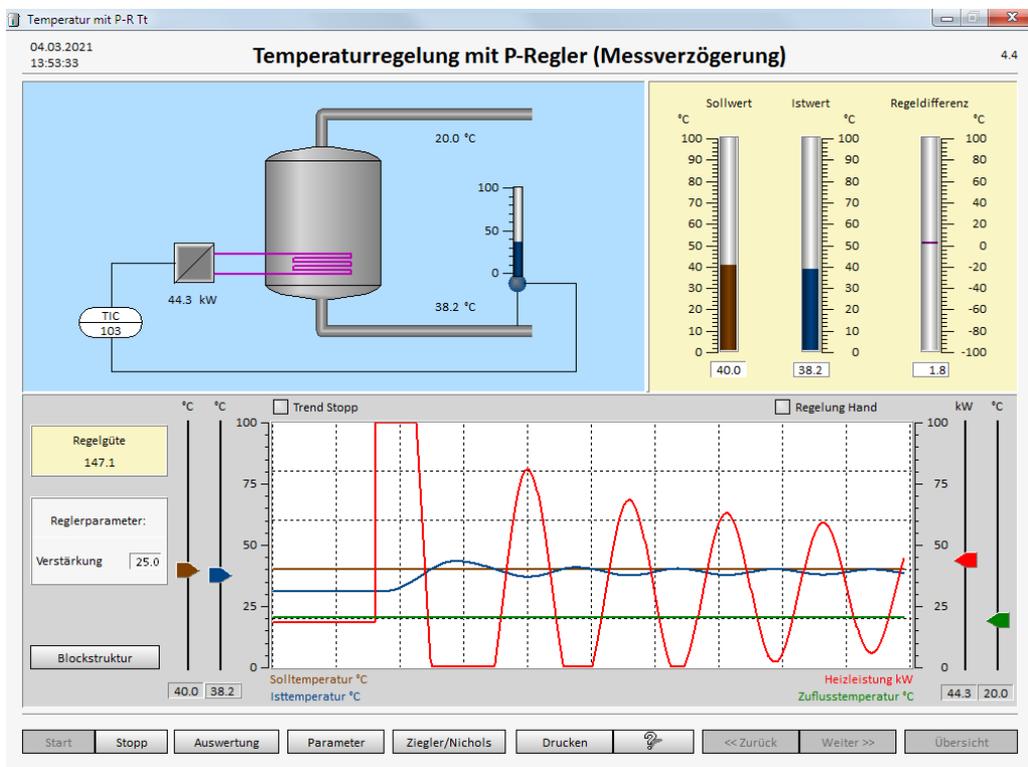
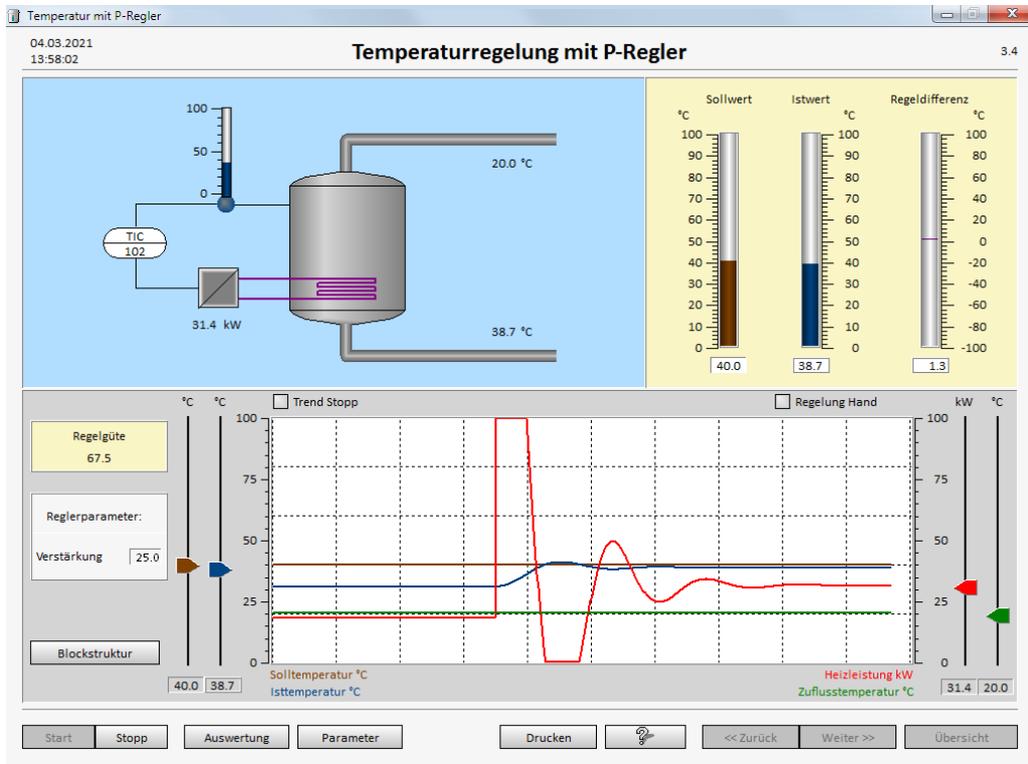
Im eingeschwungenen Fall erreicht der Istwert x (Isttemperatur) den Wert $30,9^{\circ}\text{C}$ bei dem eingestellten Sollwert $w = 40^{\circ}\text{C}$.

Damit ergibt sich:

$$\text{Stellsignal } y = K * (w - x) = 2 * (40 - 30,9) = 18,2$$

Aufgabe 6:

Verändern Sie die Verstärkung des P-Regler von 2 auf 25 und warten Sie bis der Regelkreis wieder eingeschwungen ist.



Die Regeldifferenz zwischen Sollwert und Istwert wird mit der Erhöhung der Verstärkung K von 2 auf 25 wesentlich kleiner. Allerdings schafft es der P-Regler auch hier nicht, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Wir erhalten aus dem oben beschriebenen Grund ebenso eine bleibende, wenn auch wesentlich kleinere Regeldifferenz ($e = w - x$).

Deutlich ist ein Unterschied beim Systemverhalten mit der Verstärkung 25 zwischen der Temperaturregelung mit und ohne Messverzögerung zu sehen.

Der Regelkreis mit Messverzögerung (Punkt 4.4) fängt wesentlich mehr an zu schwingen. Es ist auch möglich, mit einer noch höheren Verstärkung eine Dauerschwingung zu erzeugen. Dies kann genutzt werden, um Reglerparameter mithilfe des Reglereinstellverfahrens von Ziegler/Nichols zu bestimmen. Für weitere Informationen können Sie unter Punkt 4.4 „Temperaturregelung mit P-Regler (Messverzögerung)“ auf den Button „Ziegler/Nichols“ drücken.

Auf eine Störung (Veränderung der Zuflusstemperatur) reagiert der P-Regler ebenfalls. Auch hierfür erhält man eine bleibende Regeldifferenz.

Wie am Einschwingverhalten zu sehen ist, reagiert der P-Regler sofort und schnell auf Sollwert- und Störwertänderungen. Allerdings erhält man mit dem P-Regler eine bleibende Regeldifferenz oder der Regelkreis kann instabil werden.

6.2.3 Regelung mit I-Regler

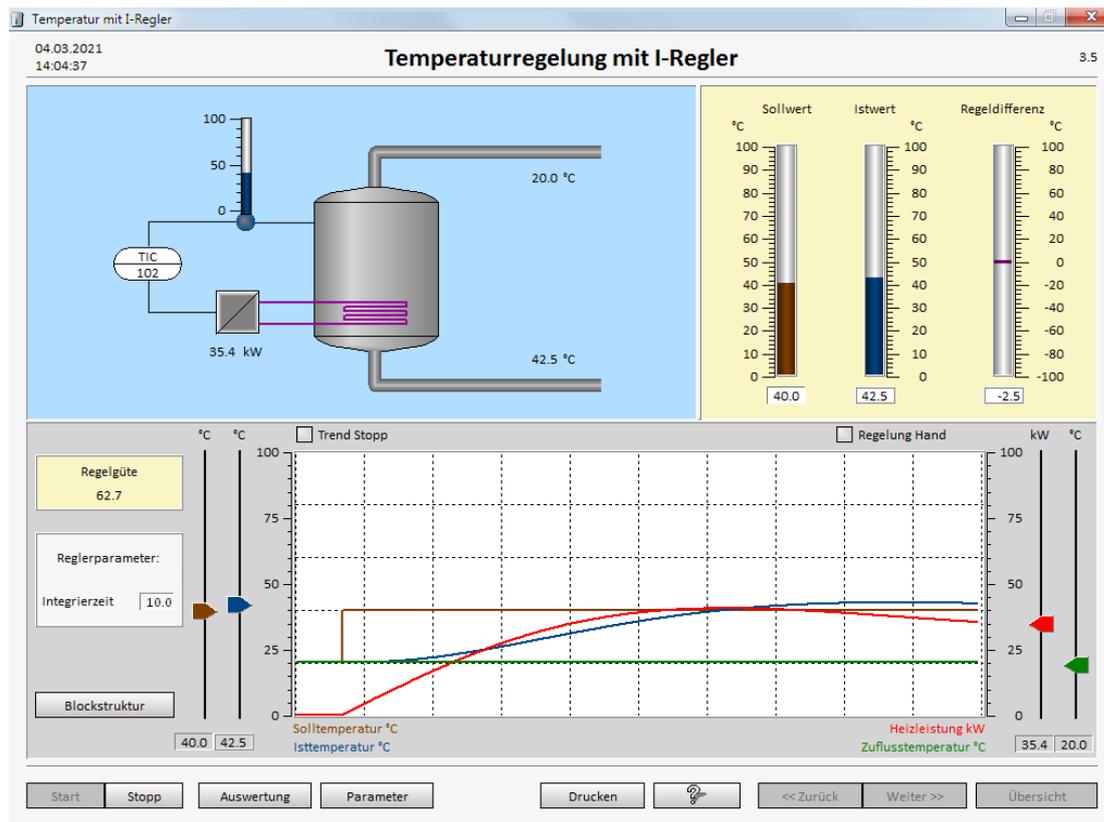
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Punkt 3.5 bzw. 4.5 „Regelung mit I-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

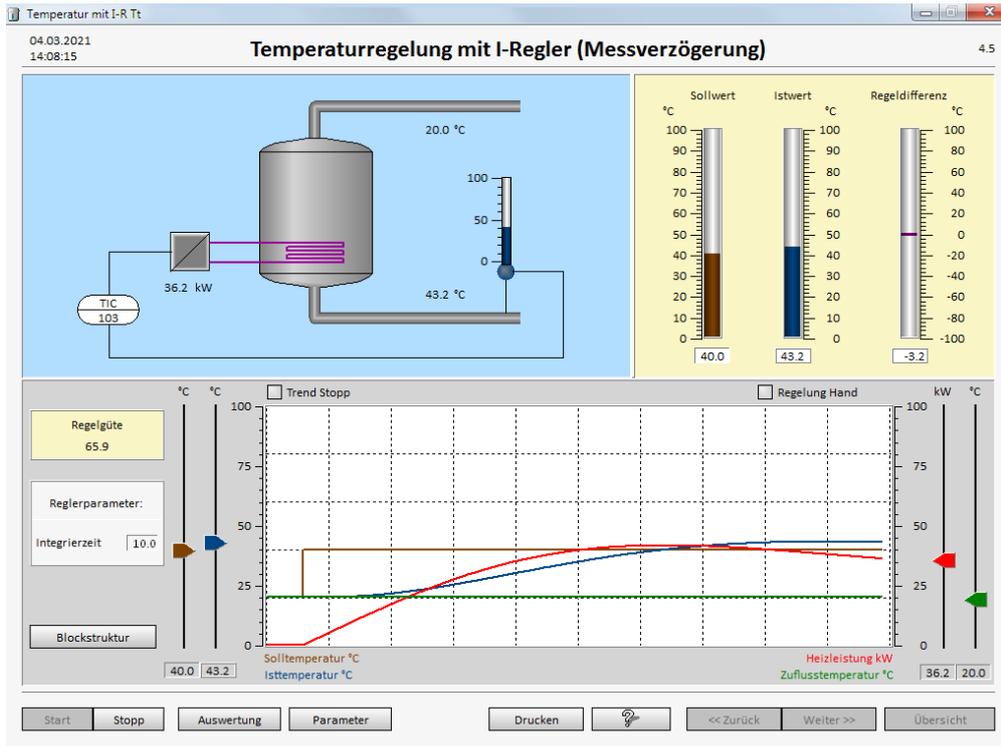
Aufgabe 7:

Lassen Sie die eingestellte Integrationszeit T_i auf 10.

Untersuchen Sie das Führungsverhalten.



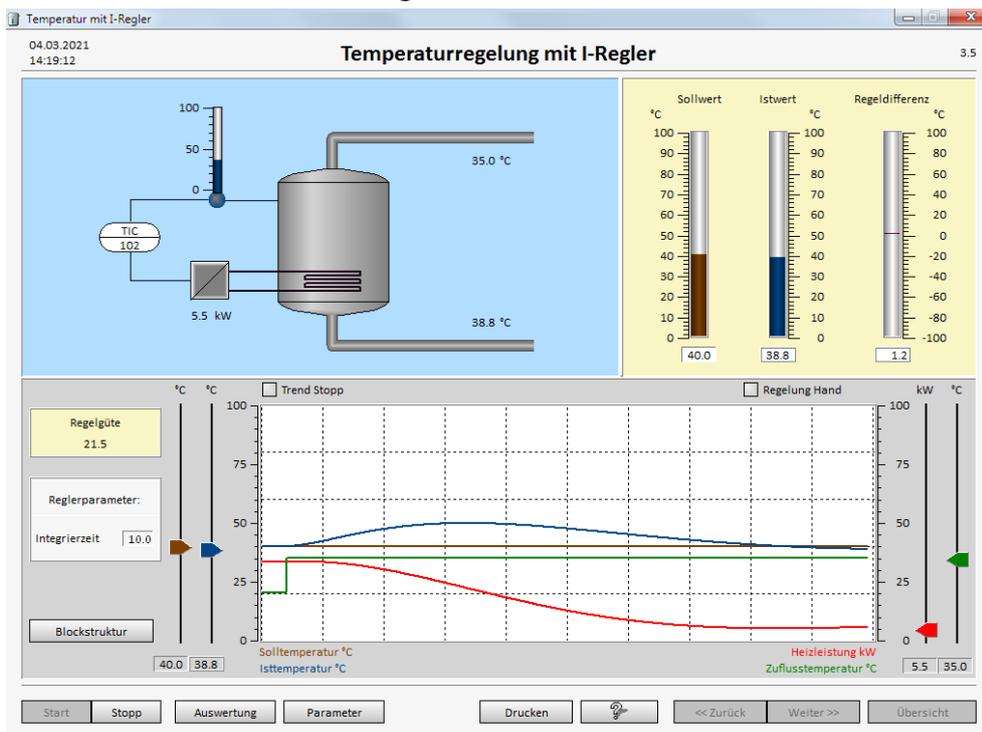
Verändern Sie die Solltemperatur (Führungsgröße) auf 40°C und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.

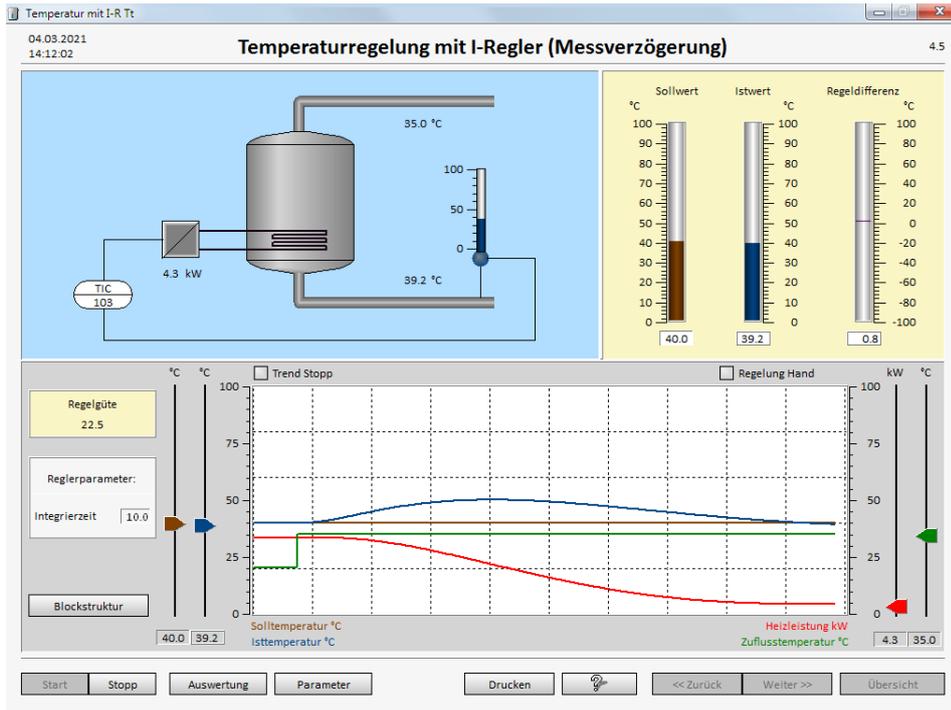


Nach einer langen Einschwingphase erreicht der Istwert bei der eingestellten Integrationszeit T_i von 10 mit einem Überschwinger den Sollwert. Man erhält keine bleibende Regeldifferenz.

Aufgabe 8:

Untersuchen Sie das Störverhalten. Geben Sie eine Störung ein, verändern Sie die Zulauftemperatur auf 35°C. Wie verhält sich der Regelkreis.





Nach einer langen Einschwingphase geht der Istwert wieder auf den Sollwert.

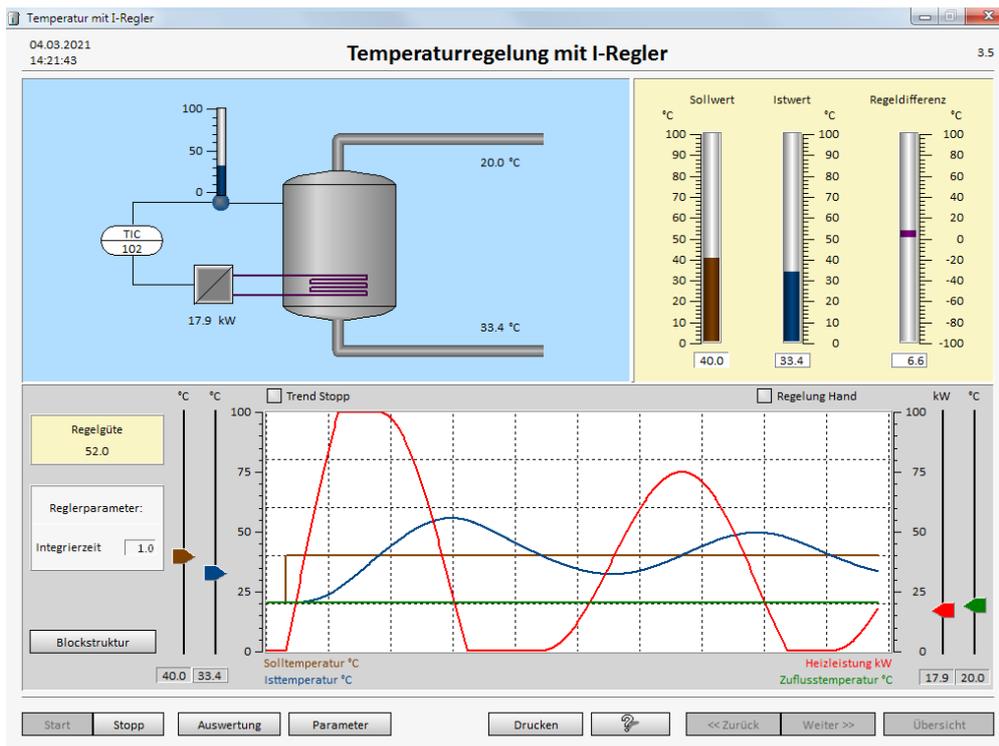
Man erhält auch für das Störverhalten keine bleibende Regeldifferenz.

Aufgabe 9:

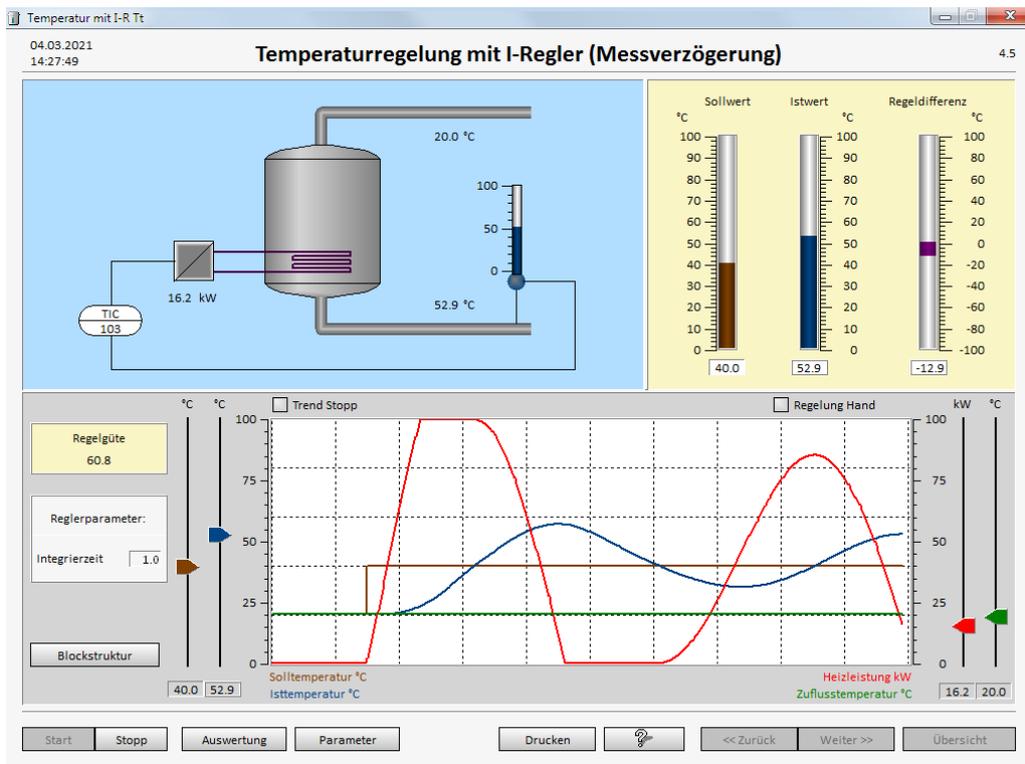
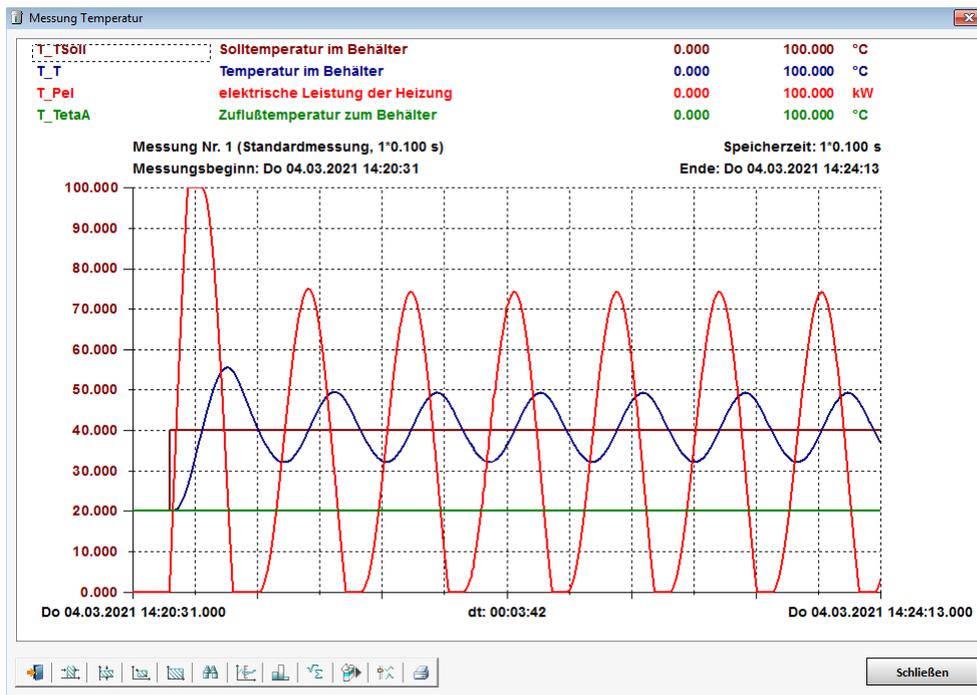
Starten Sie die Temperaturregelung mit dem I-Regler neu.

Verändern Sie die eingestellte Integrationszeit T_i auf 1.

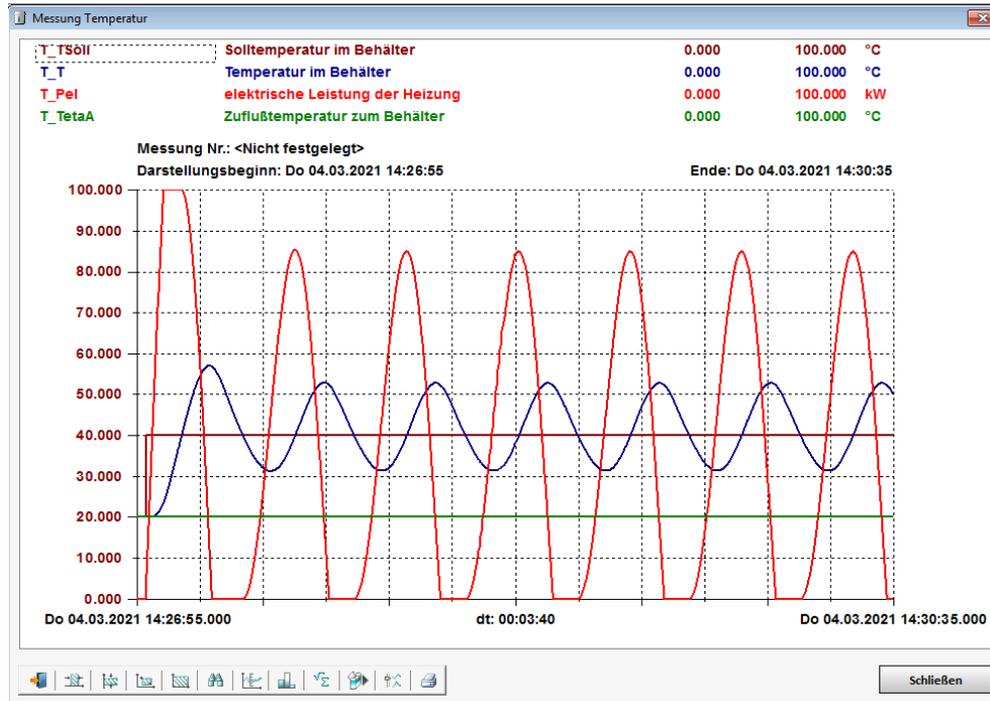
Untersuchen Sie das Führungsverhalten. Ändern Sie den Sollwert auf 40°C.



Durch Klick auf „Auswertung“ erhalten Sie die aufgezeichneten Signalverläufe.



Durch Klick auf „Auswertung“ erhalten Sie die aufgezeichneten Signalverläufe.



Der Regelkreis für die Temperaturregelung mit/ohne Messverzögerung wird instabil. Der Istwert schwingt dauerhaft um den Sollwert.

Info:

Wenn ein I-Anteil (Integrator) im Regler vorhanden ist, schafft es der Regler entweder den Istwert nach einer Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen oder der Regelkreis wird instabil.

Dies erklärt sich durch das Verhalten des Integrators:

Wenn der Wert des Eingangssignals in einen Integrator positiv ist, steigt der Wert des Ausgangssignals (Stellsignal). Ist das Eingangssignal gleich Null, behält der Integrator seinen Ausgangswert (der Wert bleibt konstant). Ist der Eingangswert negativ, nimmt der Ausgangswert des Integrators ab.

Damit ein Regelkreis auf einen Wert einschwingt, muss das Stellsignal (Ausgang des Reglers) konstant sein. Der Ausgangswert eines Integrators ist nur dann konstant, wenn der Eingangswert des Integrators gleich Null ist, also wenn Sollwert und Istwert gleich sind.

6.2.4 Regelung mit PI-Regler

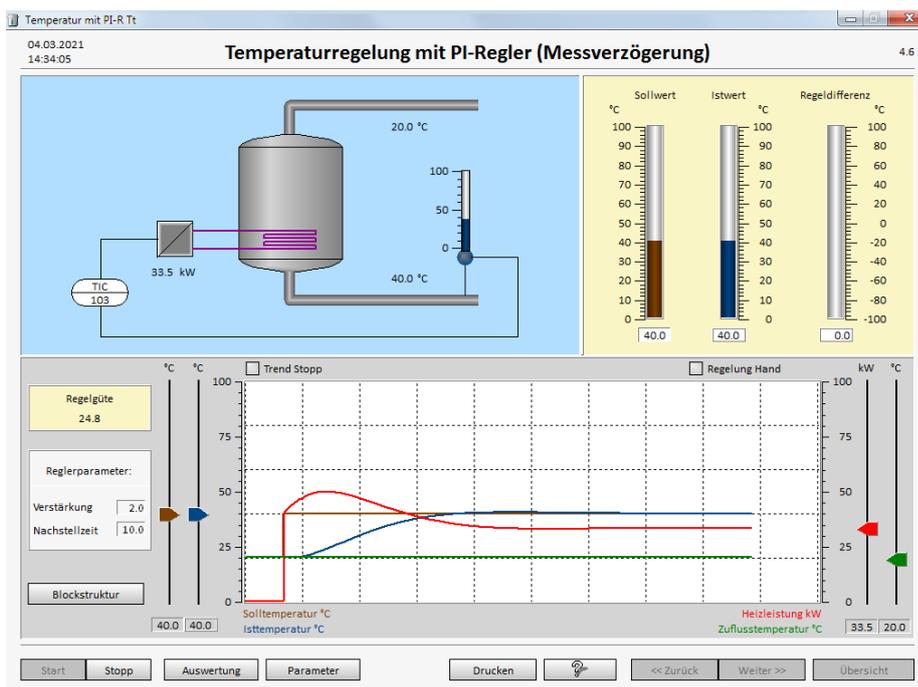
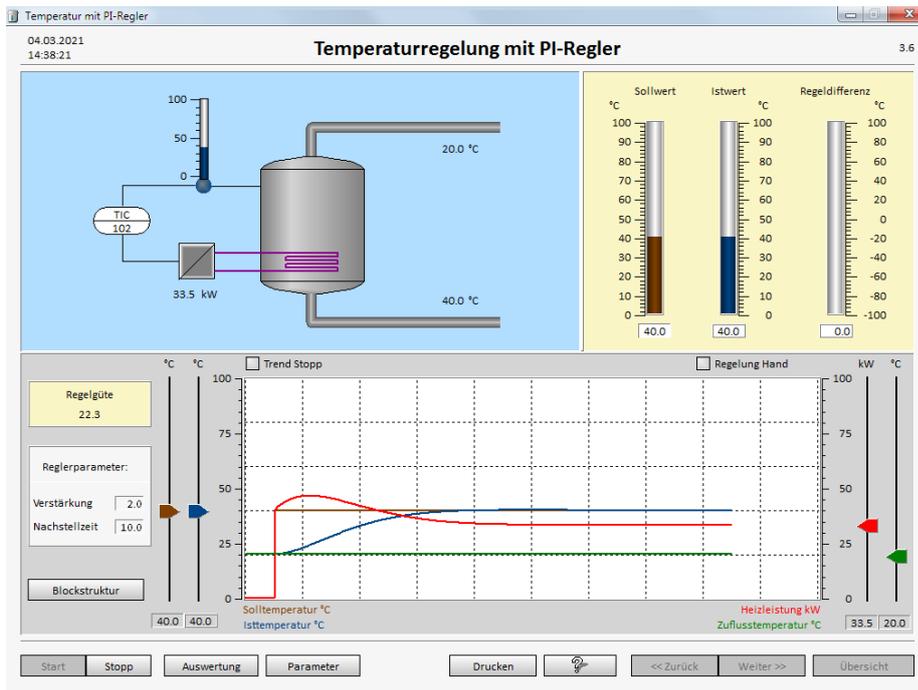
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.6 bzw. 4.6 „Regelung mit PI-Regler“. Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 10:

Stellen Sie die Parameter auf $K = 2$, $T_i = 10$.

Untersuchen Sie das Führungsverhalten.

Verändern Sie den Sollwert (Führungsgröße) von 20°C auf 40°C.



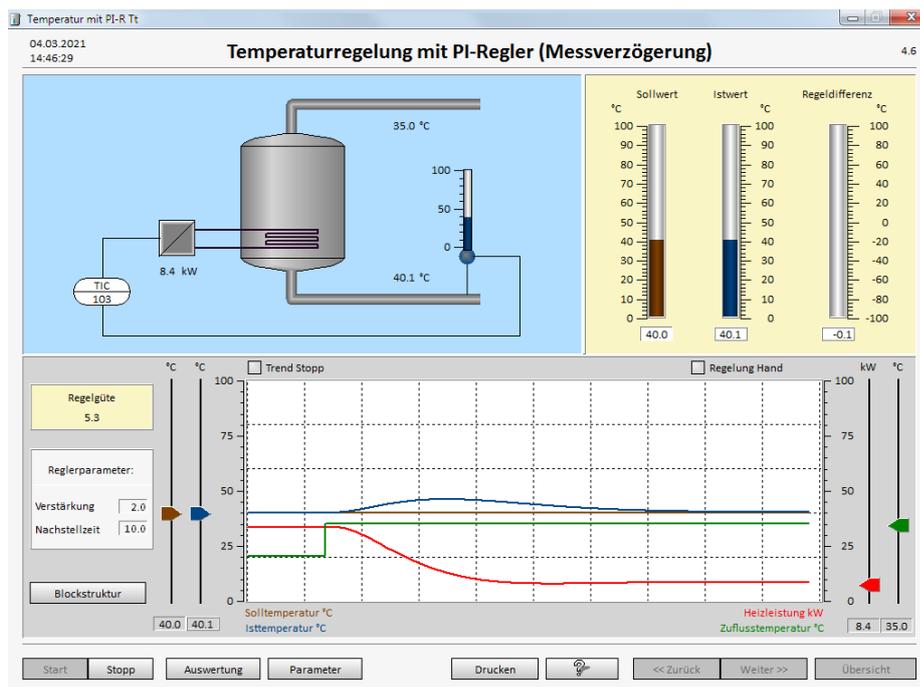
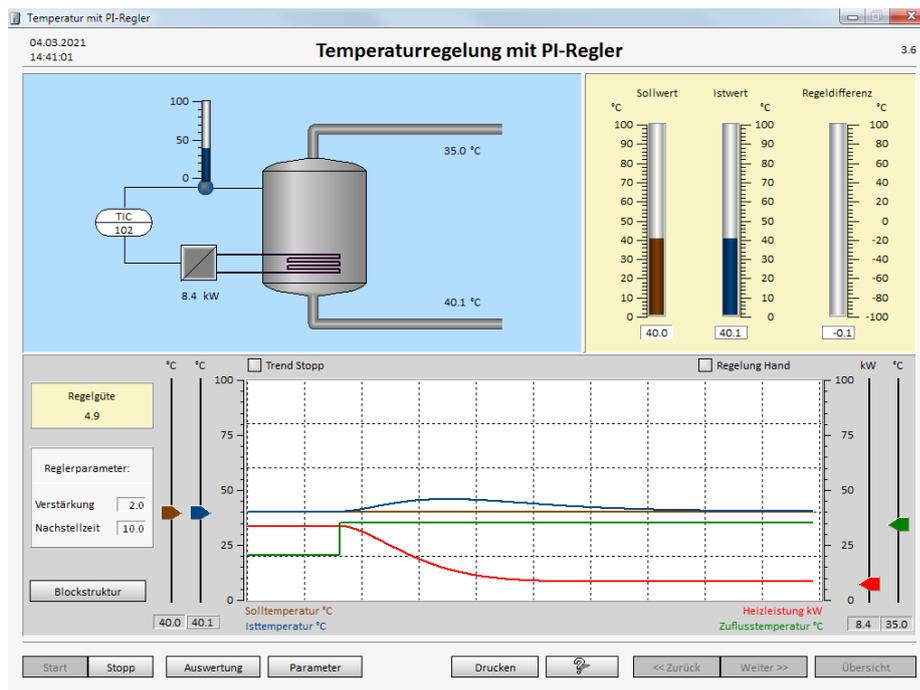
Der Regelkreis mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern schwingt mit einem kleinen Überschwinger auf den Sollwert ein. Der Istwert (Regelgröße) erreicht den Sollwert (Führungsgröße).

Aufgabe 11:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Lassen Sie den Regelkreis mit den Parametern $K = 2$ und $T_i = 10$ auf den Sollwert 40°C einschwingen.

Wenn der Regelkreis eingeschwungen ist, verändern Sie die Zuflusstemperatur auf 35°C und beobachten Sie das Verhalten.



Die höhere Zuflusstemperatur bewirkt ein Steigen der Isttemperatur im Behälter. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und reduziert die Heizleistung. Nach einer Einschwingphase erreicht der Istwert wieder den Sollwert.

Aufgabe 12:

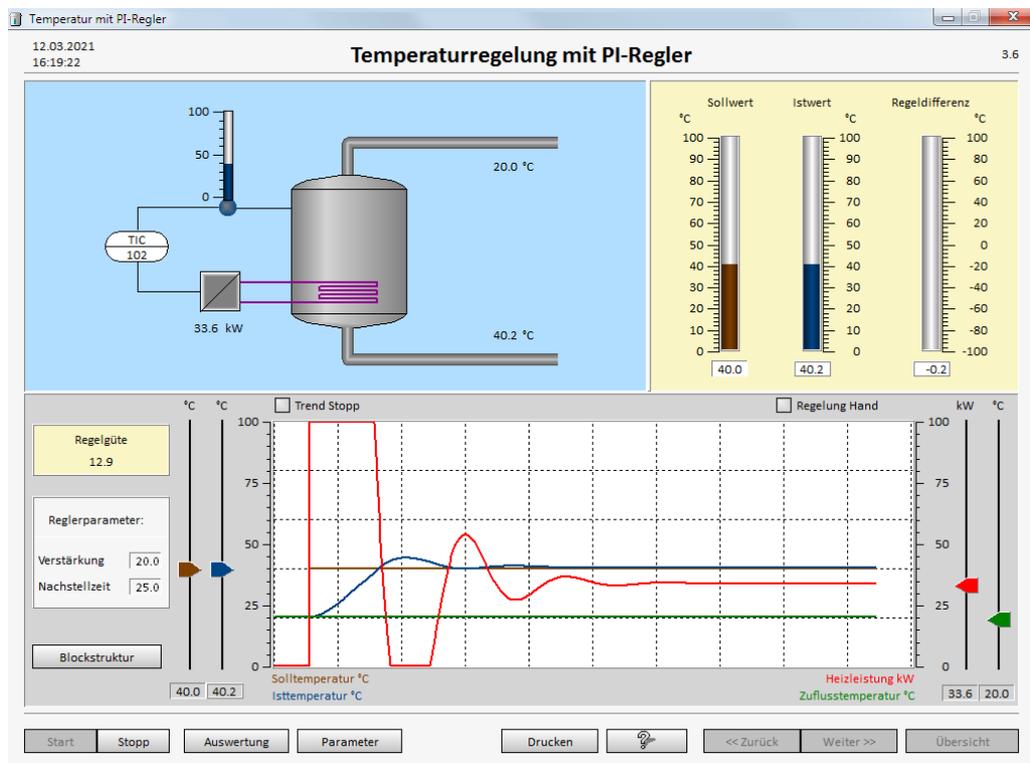
Die mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwingenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl wird, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwingen, wenn der Istwert hat den Sollwert erreicht hat.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Mit den Reglerparametern $K = 2$ und $T_i = 10$ wurde eine Regelgüte von 22,5 bzw. 23,7 (Temperaturregelung mit Messverzögerung) bei einem Sollwertsprung von 20°C auf 40°C erreicht.

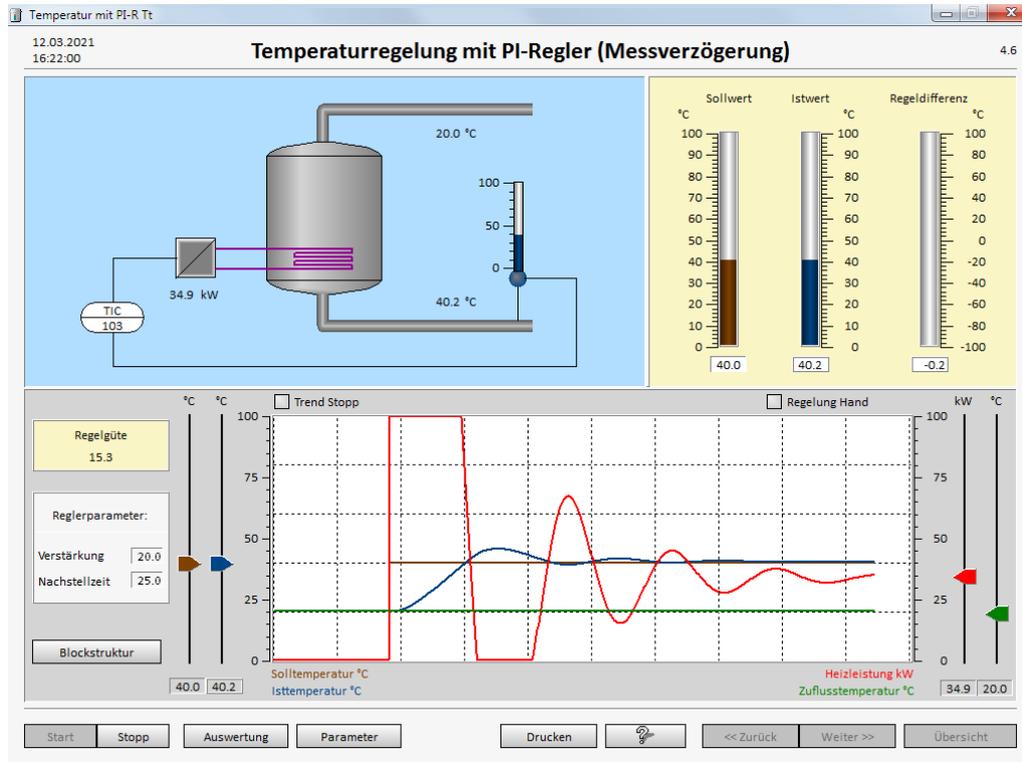
Damit die Regelgüte vergleichbar ist, müssen alle Versuche mit den gleichen Anfangszuständen gestartet werden. Hierfür drücken Sie am besten „Stopp“ und wieder „Start“. Damit erhalten Solltemperatur (Führungsgröße), Zuflusstemperatur (Störgröße) und Isttemperatur (Regelgröße) wieder ihre Anfangswerte.

Verändern Sie jetzt die Reglerparameter und verstellen Sie dann den Sollwert auf 40°C . Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwingen ist.



Mit den Parametern Verstärkung $K = 20$ und Nachstellzeit $T_i = 25$ erhält man zum Beispiel eine Regelgüte von 12,9.

Mit diesen Parametern erhalten Sie für die Temperaturregelung mit Messverzögerung eine Regelgüte von über 15 und ein sehr unruhiges Einschwingen mit vielen Überschwingern.



Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- „Stopp“ und „Start“ drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 40°C stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Info:

Wenn ein I-Anteil (Integrator) im Regler vorhanden ist, schafft es der Regler entweder den Istwert nach einer Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen oder der Regelkreis wird instabil.

Dies erklärt sich durch das Verhalten des Integrators:

Wenn der Eingangswert in einen Integrator positiv ist, steigt der Wert des Ausgangssignals (Stellsignal). Ist das Eingangssignal gleich Null, behält der Integrator seinen Ausgangswert (der Wert bleibt konstant). Ist der Eingangswert negativ, nimmt der Ausgangswert des Integrators ab.

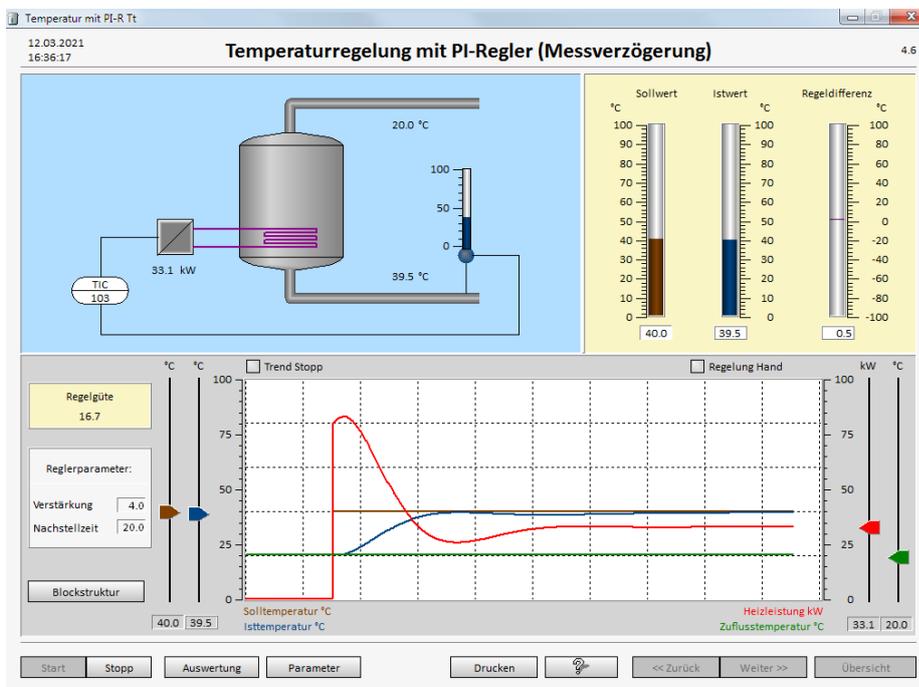
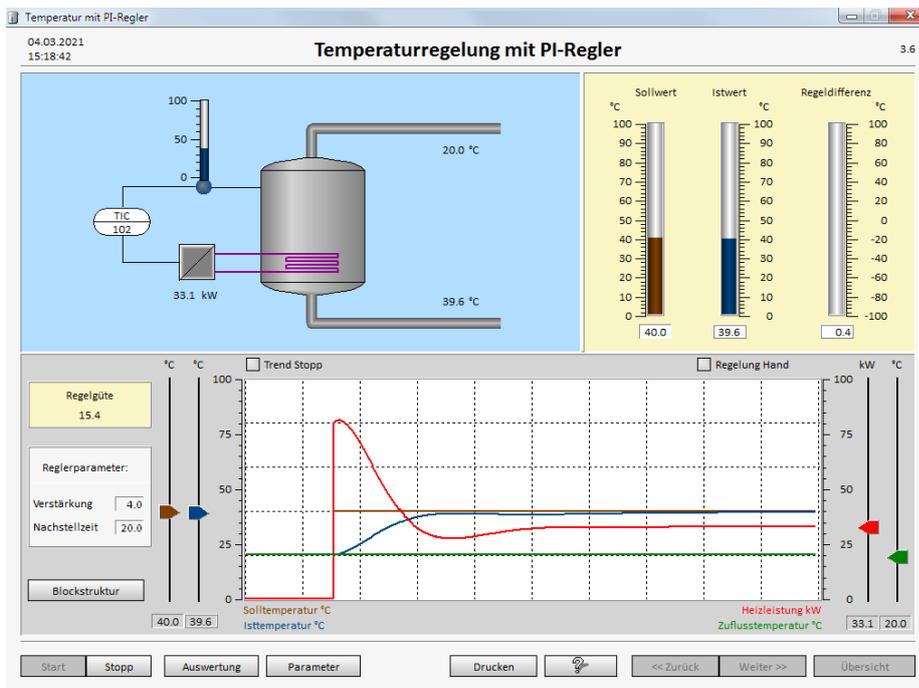
Damit ein Regelkreis auf einen Wert einschwingt, muss das Stellsignal konstant sein (Ausgang des Reglers). Der Ausgangswert eines Integrators ist nur dann konstant, wenn der Eingangswert des Integrators gleich Null ist, also wenn Sollwert und Istwert gleich sind.

Aufgabe 13:

Starten Sie die Temperaturregelung mit dem PI-Regler neu.

Probieren Sie Reglerparameter zu finden, mit denen der Istwert ohne Überschwingen den Sollwert erreicht. In diesem Fall spricht man von einem aperiodischen Fall (ohne Überschwingen).

Gehen Sie wieder vom Anfangszustand aus, verstellen Sie die Parameter und verändern Sie dann den Sollwert auf 40°C.



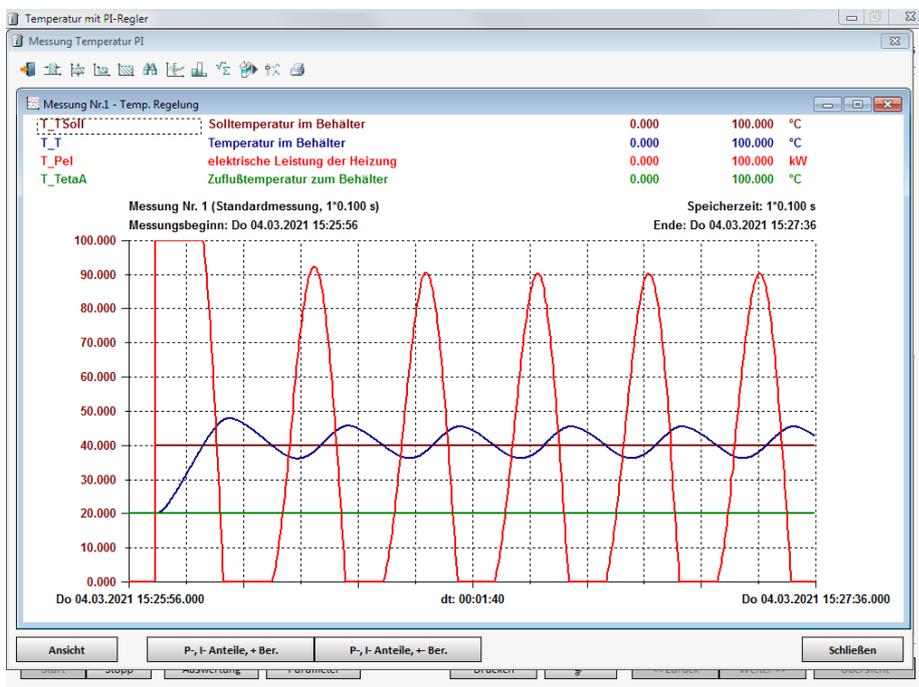
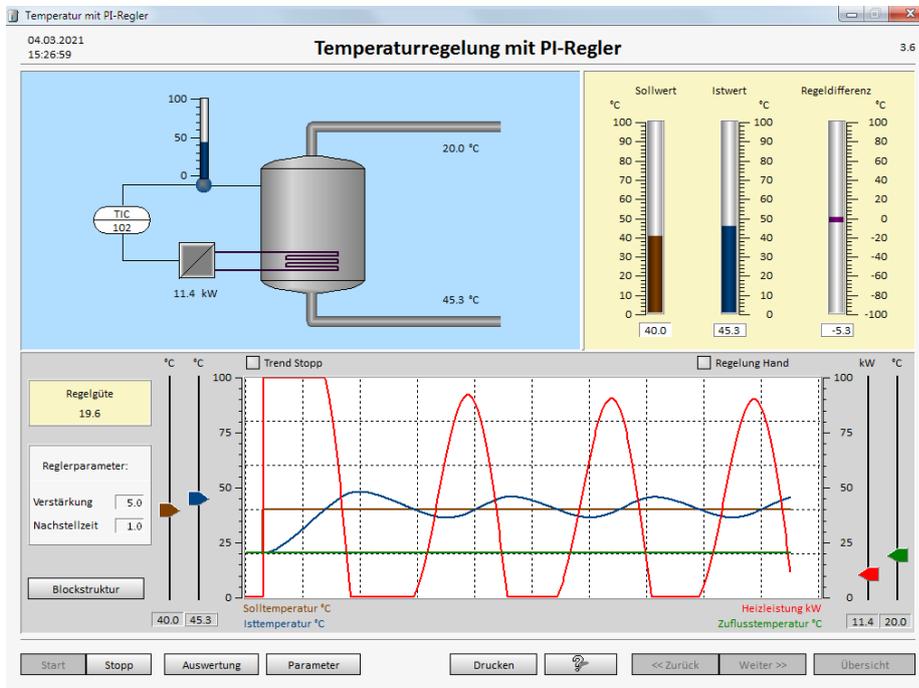
Mit den Parametern $K = 4$ und $T_i = 20$ erhält man z.B. für beide Temperaturregelungen ein aperiodisches Verhalten.

Aufgabe 14:

Starten Sie die Temperaturregelung mit dem PI-Regler neu.

Versuchen Sie, die Reglerparameter so einzustellen, dass der Regelkreis instabil wird.

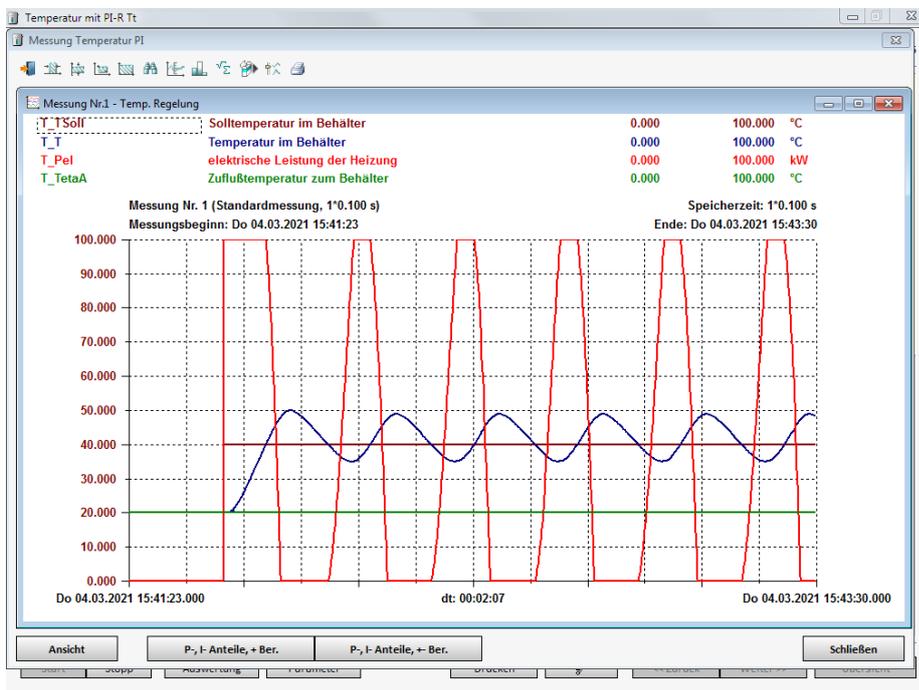
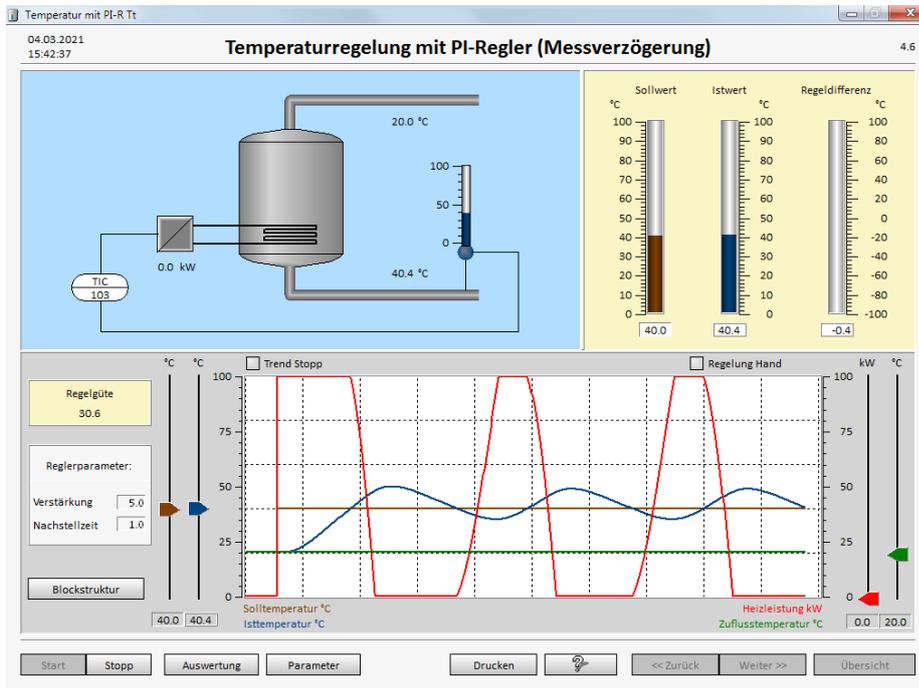
Geben Sie jeweils einen Sollwertsprung von 20°C auf 40°C vor.



Dies erreichen Sie z.B. mit den Reglerparametern:

Verstärkung $K = 5$ und Nachstellzeit $T_i = 1s$.

Auch bei der Temperaturregelung mit Messverzögerung erhalten Sie mit diesen Parametern ein instabiles Verhalten.



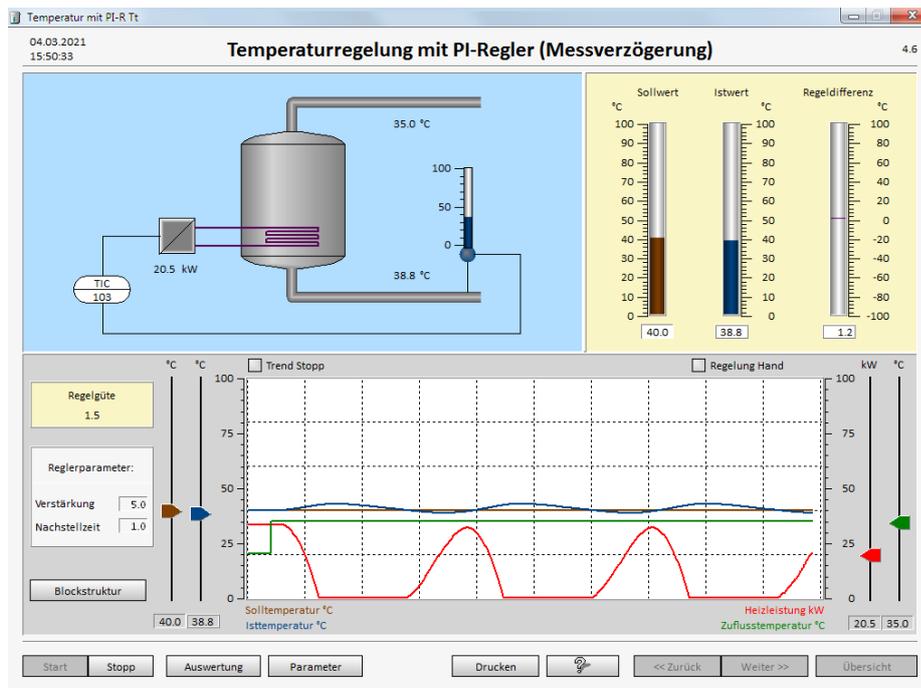
Durch Drücken von „Auswertung“ haben Sie die Möglichkeit, die gespeicherten Signalverläufe anzuschauen und das Einschwingverhalten zu untersuchen.

Aufgabe 15:

In der obigen Aufgabe wurde das Führungsverhalten mit den Parametern Verstärkung $K = 5$ und der Nachstellzeit $T_i = 1$ s untersucht.

Untersuchen Sie nun das Störverhalten mit diesen Parametern.

Lassen Sie den Regelkreis stabil auf den Sollwert 40°C einschwingen. Ändern Sie dann die Parameter auf Verstärkung $K = 5$ und Nachstellzeit $T_i = 1$. Geben Sie einen Störsprung von 20°C auf 35°C vor.



Auch für das Störverhalten wird der Regelkreis mit diesen Parametern instabil.

Als Fazit lässt sich sagen:

- mit dem PI-Regler und entsprechend gut eingestellten Reglerparametern lässt sich der Regelkreis gut und schnell ausregeln. Der Istwert erreicht den Sollwert und bleibt auf dem Sollwert.
- Das gilt für das Führungsverhalten wie für das Störverhalten.
- Mit falsch eingestellten Parametern kann der Regelkreis auch instabil werden.

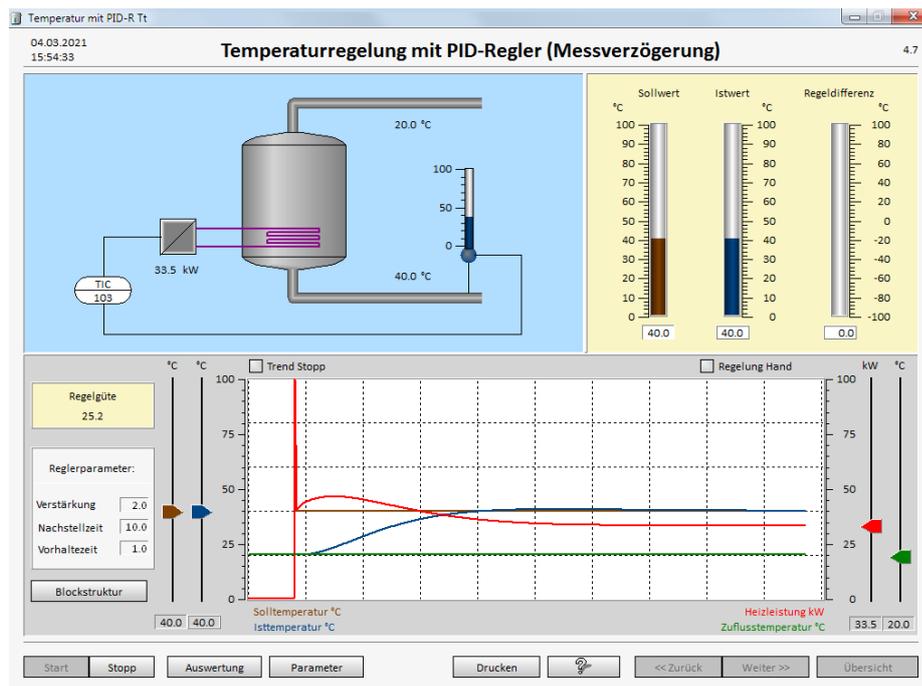
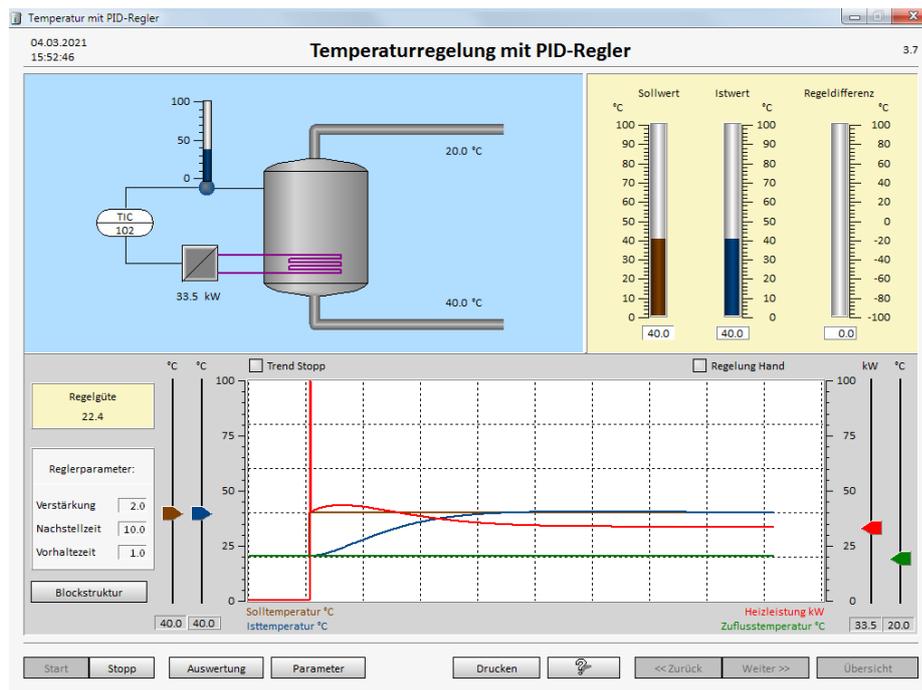
6.2.5 Regelung mit PID-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.7 bzw. 4.7 „Regelung mit PID-Regler“. Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 16:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern: Verstärkung $K = 2$, Nachstellzeit $T_i = 10$, Vorhaltezeit $T_d = 1$

Ändern Sie den Sollwert auf 40°C .



Der Regelkreis geht mit einem kleinen Überschwingen in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals (Heizleistung). Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Die Regelgüte geht auf 22,8 bzw. 24,4 und ist damit ähnlich wie beim PI-Regler mit den Parametern $K = 2$ und $T_i = 10$.

Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

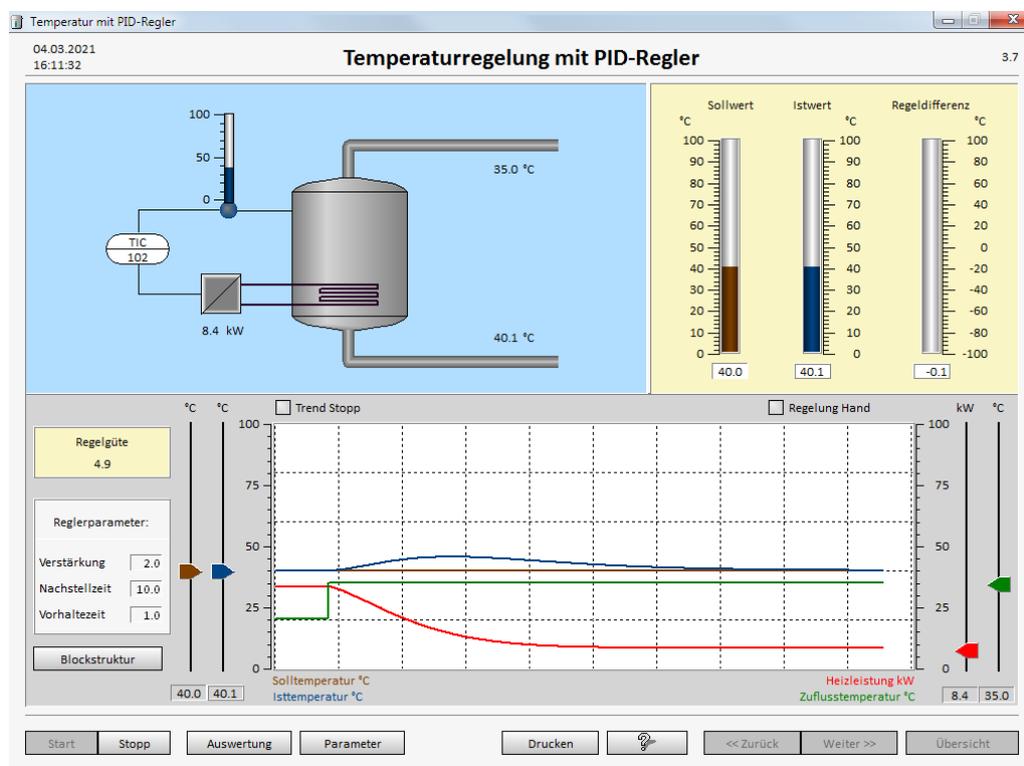
In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

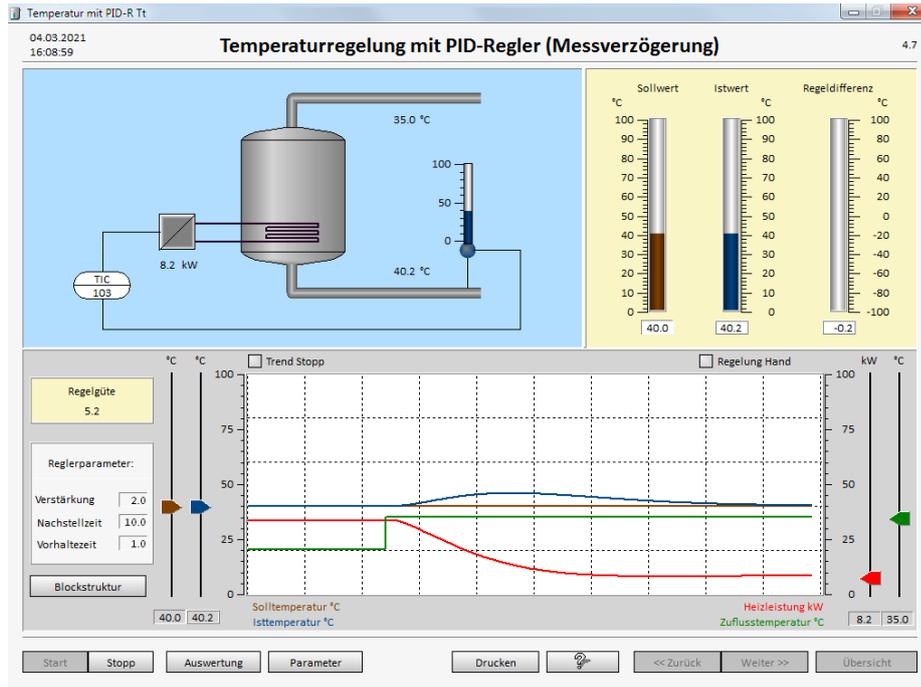
Aufgabe 17:

Untersuchen Sie das Störverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 2$, Nachstellzeit $T_i = 10$, Vorhaltezeit $T_d = 1$

Lassen Sie das System auf die Solltemperatur 40°C einschwingen (die Isttemperatur erreicht 40°C und verändert sich nicht mehr) und verändern Sie die Zufusstemperatur von 20°C auf 35°C



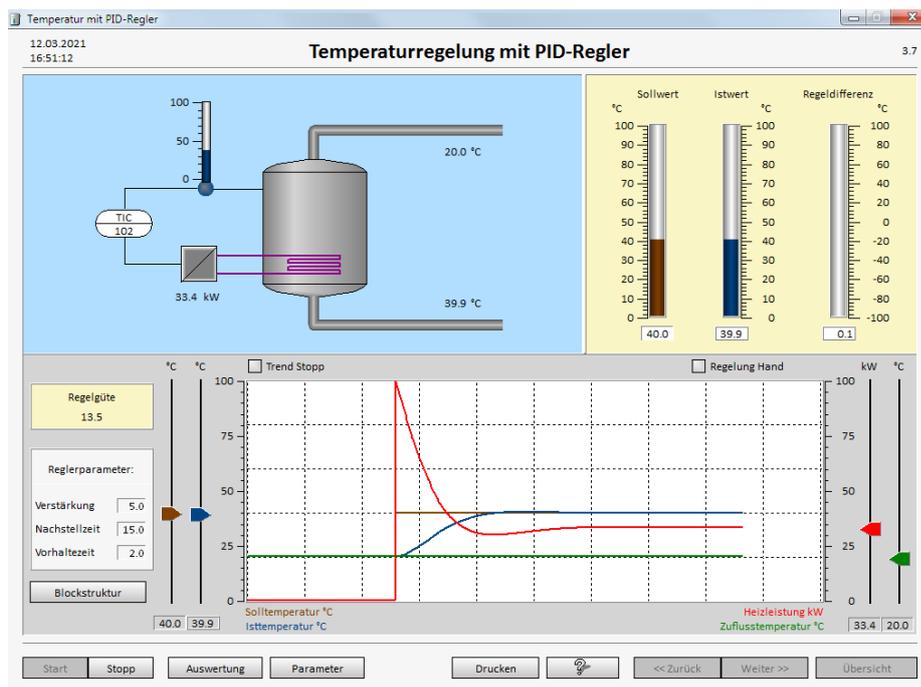


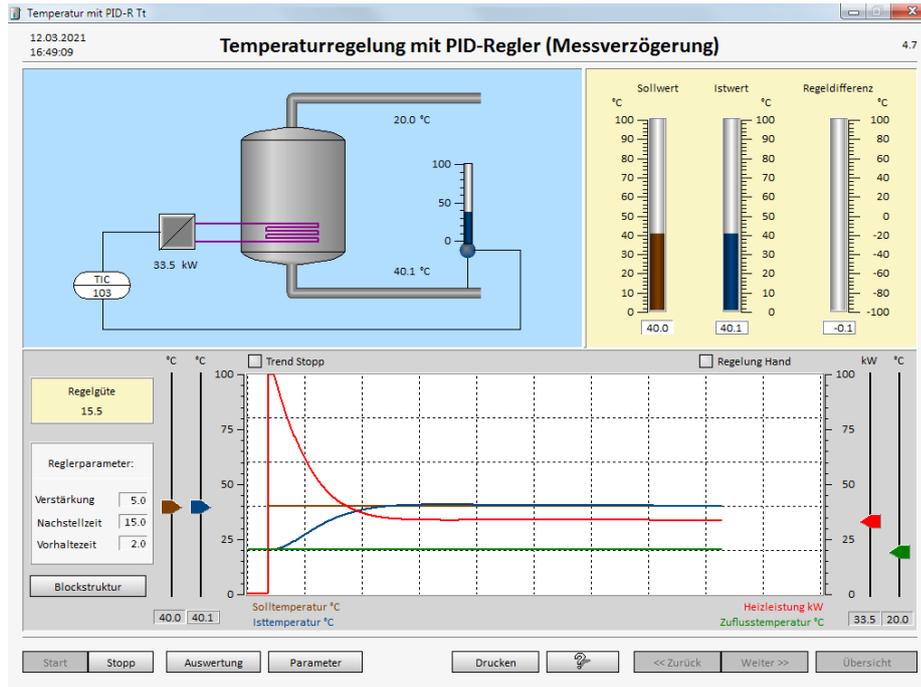
Auch beim Störverhalten wird mit den vorgegebenen Reglerparametern der Regelkreis ausgegeregelt und die Isttemperatur (Regelgröße) erreicht nach einer Zeitspanne wieder die Solltemperatur (Führungsgröße).

Aufgabe 18:

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter die Regelgüte zu verbessern

Damit Sie die Versuche vergleichen können, müssen Sie immer von den gleichen Anfangszuständen ausgehen. Drücken Sie deshalb „Stopp“ und wieder „Start“, verändern Sie die Reglerparameter und verstellen Sie dann den Sollwert auf 40°C.





Mit den Reglerparametern $K = 5$, $T_i = 15$ und $T_d = 2$ erhalten Sie z.B. eine Regelgüte von 13,5 bzw. 15,5.

Die Versuche, die mit dem PI-Regler durchgeführt wurden, lassen sich auch mit dem PID-Regler durchführen (instabiles Verhalten, aperiodisches Verhalten, etc.).

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

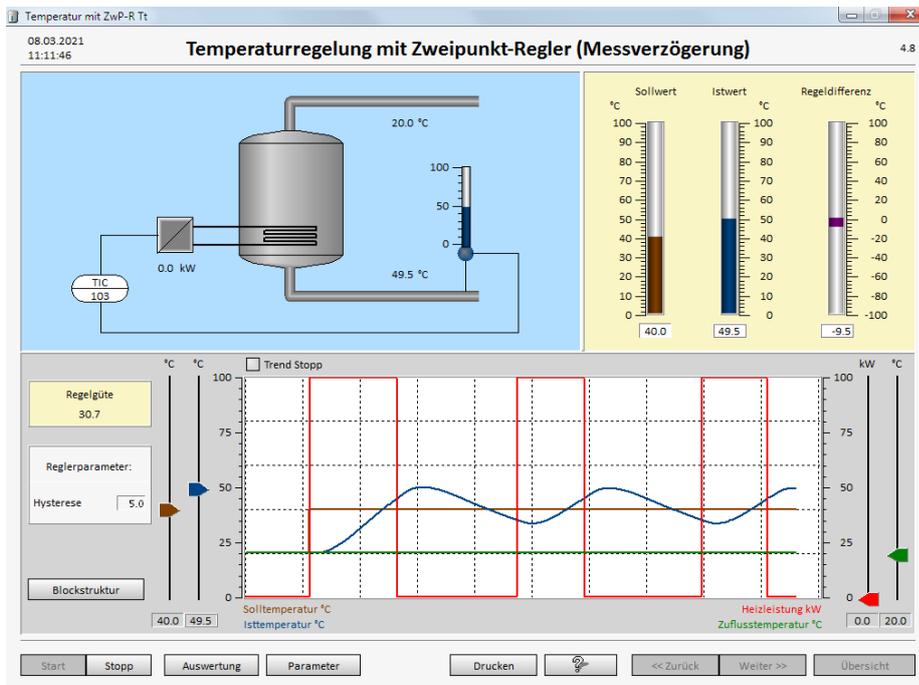
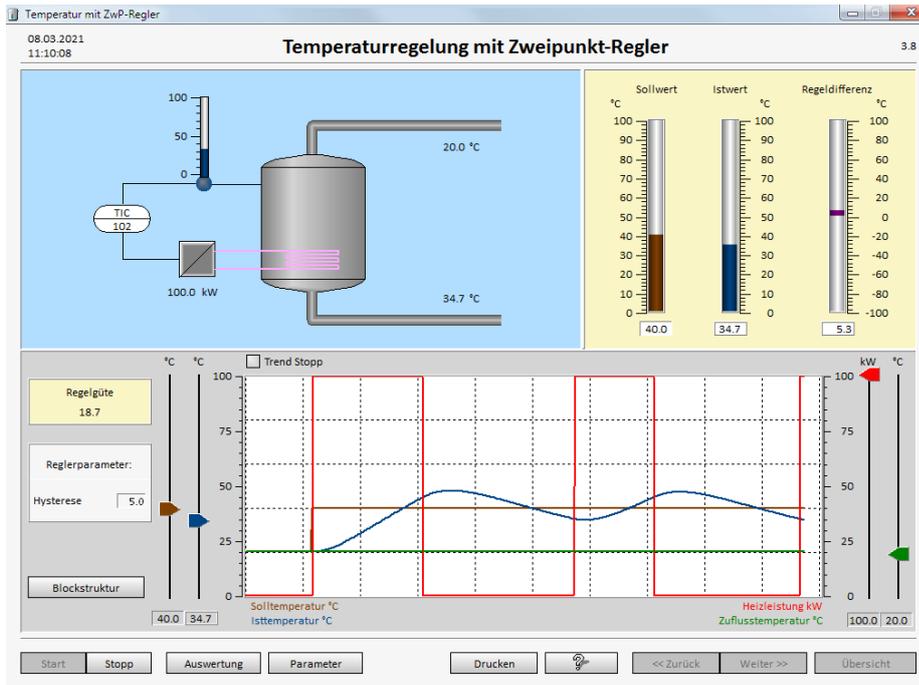
Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

6.2.6 Regelung mit Zweipkt-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.8 bzw. 4.8 „Regelung mit Zweipkt-Regler“. Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 19:

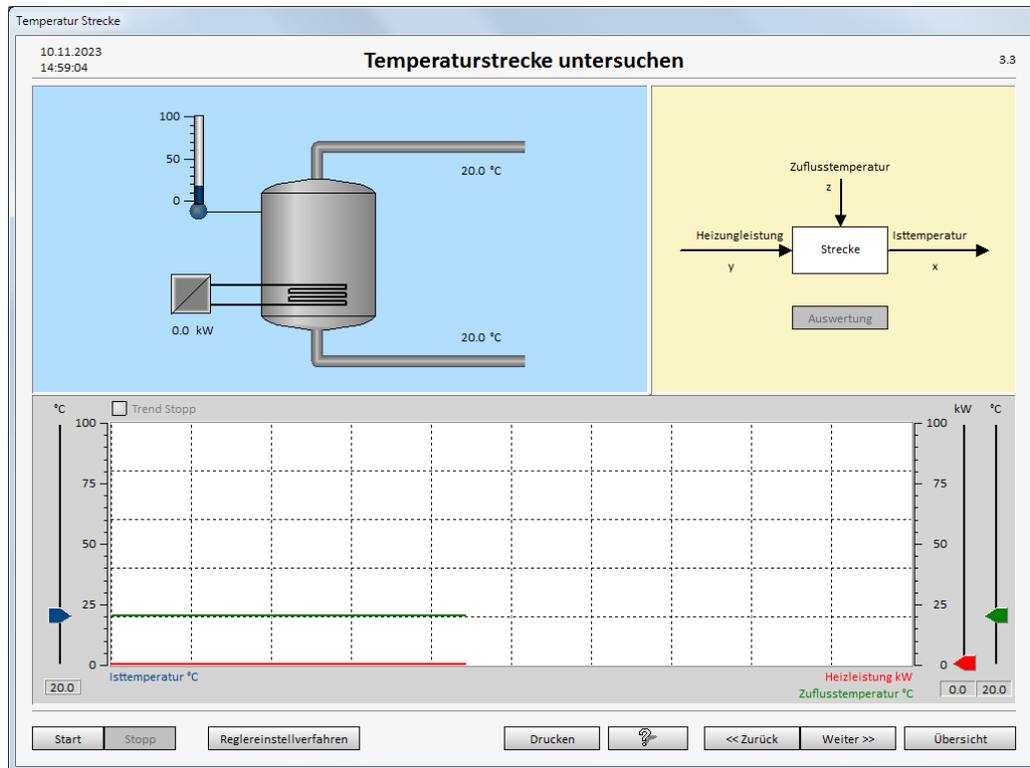
Die Hysterese sei 5. Ändern Sie den Sollwert auf 40°C und beobachten Sie das Verhalten.



Die Isttemperatur (Regelgröße) schwingt um den Sollwert. Die Größe der Schwingung ist abhängig vom Parameter (Hysterese).

6.3 Strecke untersuchen

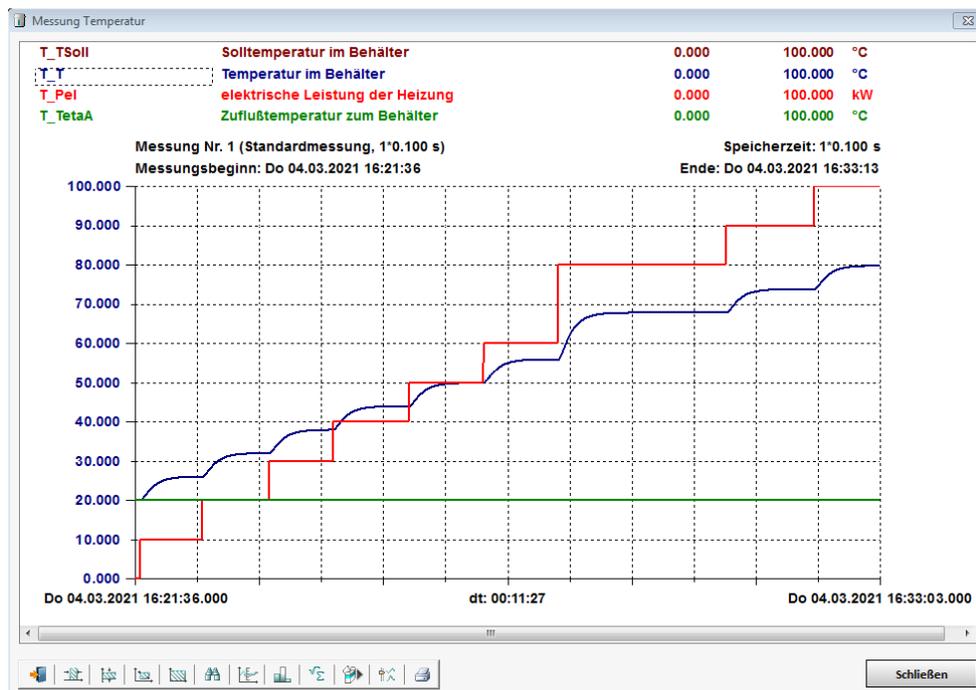
Wählen Sie den Punkt 3.3 bzw. 4.3 „Strecke untersuchen“ und drücken Sie „Start“.



Aufgabe 20:

Erhöhen Sie die Heizleistung jeweils um 10% und warten Sie jedes Mal bis die Isttemperatur sich nicht mehr ändert.

Beobachten Sie das Temperaturverhalten.



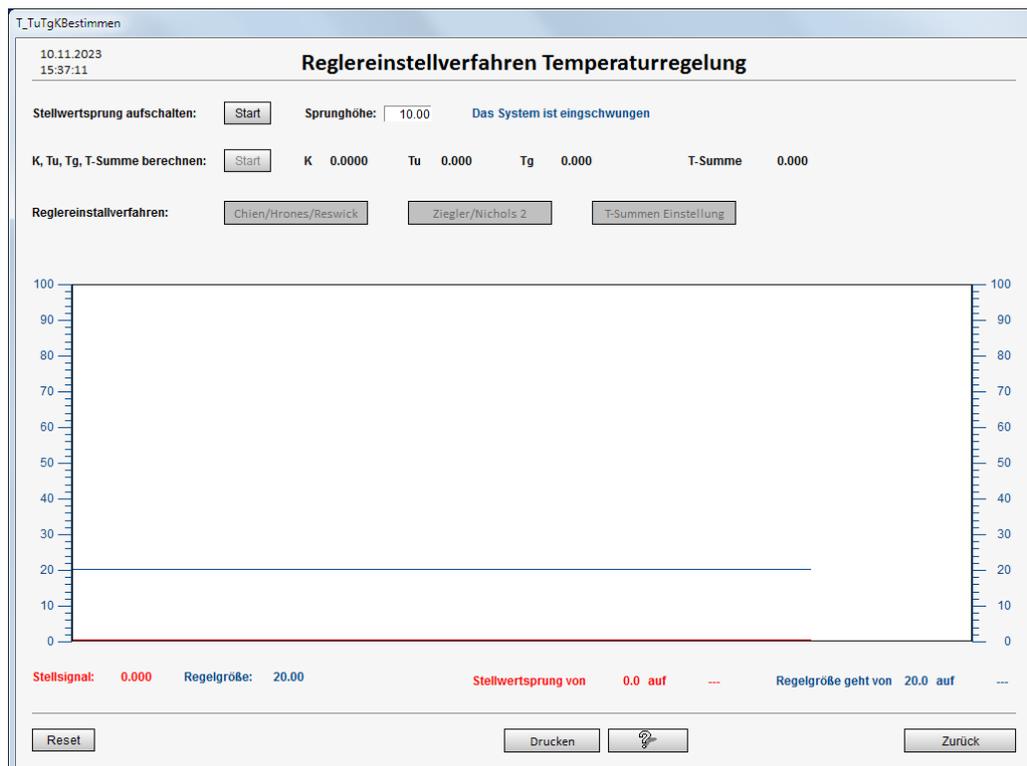
Wie aus den aufgezeichneten Daten zu ersehen ist, ist das Streckenverhalten bei den Sprüngen ähnlich. Die Isttemperatur verändert sich beim Sprung der Heizleistung um 10% immer ca. um 6°C. Dies muss bei einer Regelstrecke nicht immer der Fall sein.

Bei vielen Regelstrecken ist das Verhalten abhängig vom Arbeitspunkt. Das bedeutet, die Regelungen werden sich bei gleichem Regler und gleichen Reglerparametern in verschiedenen Arbeitspunkten unterschiedlich verhalten.

Durch Klicken auf den Button „Reglereinstellverfahren“ können Sie automatisch die Tabellen für die Reglereinstellverfahren „Chien/Hrones/Reswick“, „Ziegler Nichols 2“ und „T-Summen-Verfahren“ generieren.

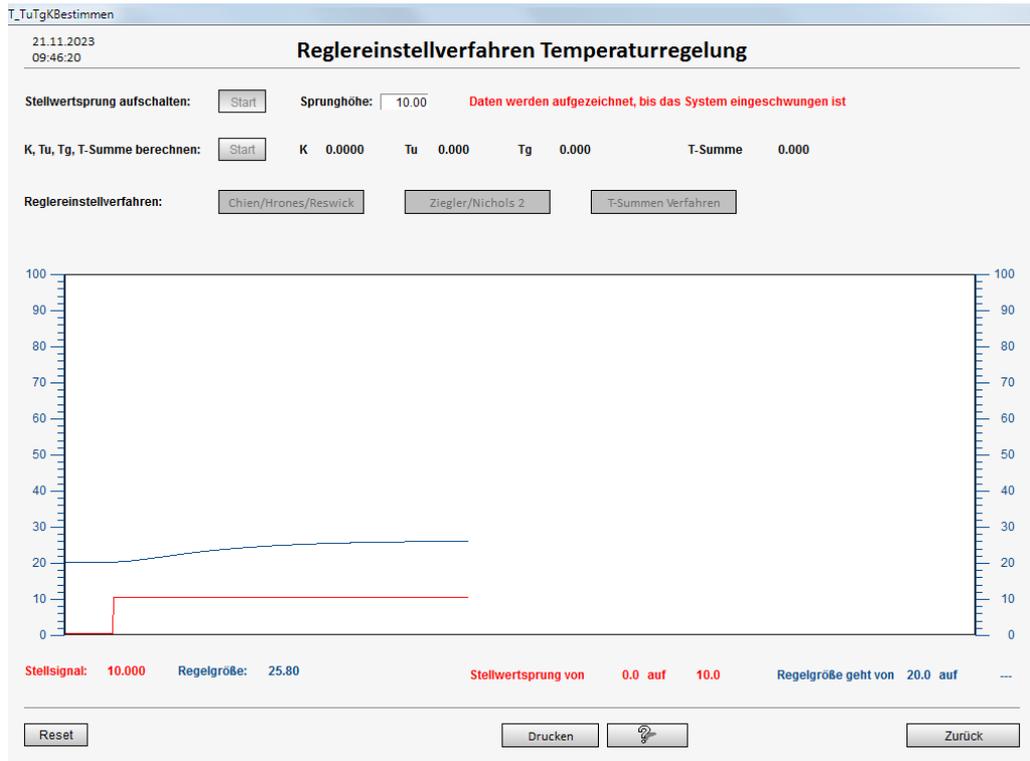
6.3.1 Reglereinstellverfahren, Erstellen der Tabellen der Reglereinstellverfahren

Hier haben Sie die Möglichkeit, einen Stellwertsprung aufzuschalten, automatisch die Parameter K (Verstärkung), T_u (Verzugszeit) und T_g (Ausgleichszeit) zu berechnen und mithilfe dieser Parameter die Tabellen der Reglereinstellverfahren nach „Chien/Hrones/Reswick“, „Ziegler Nichols 2“ und „T-Summen-Verfahren“ zu generieren.



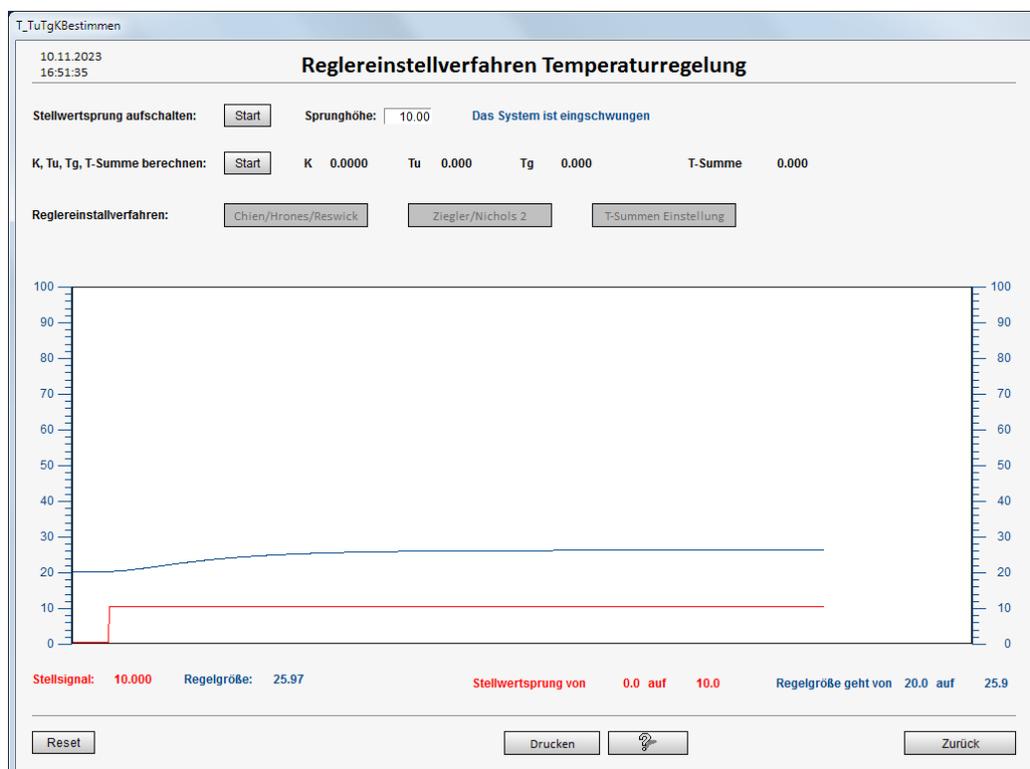
Aufgabe 21:

Tragen Sie bei „Sprunghöhe“ den Wert 10 ein und drücken Sie auf „Start“ bei „Stellwertsprung aufschalten“.



Es wird ein Stellwertsprung mit der bei „Sprunghöhe“ eingestellten Sprunghöhe von 10 aufgeschaltet, d.h. die Heizleistung wird sprunghaft um 10% erhöht.

Warten Sie bis das System eingeschwungen ist. Die Meldung „Das System ist eingeschwungen“ wird angezeigt.

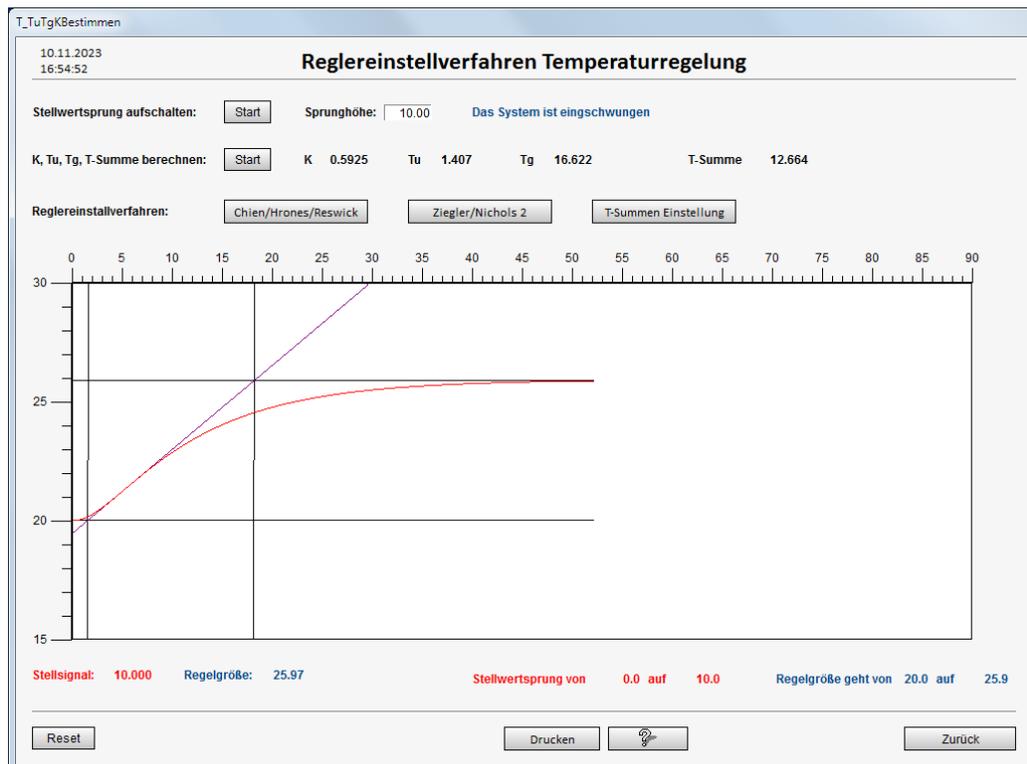


Sie haben jetzt die Möglichkeit, die Parameter K, Tu, Tg und T-Summe berechnen zu lassen.

Aufgabe 22:

Lassen Sie sich die Parameter berechnen durch Drücken auf „Start“ bei „K, Tu, Tg, T-Summe berechnen“.

Es wird eine Seite ausgegeben, in der die berechneten Werte angezeigt werden. Eine Grafik zeigt die Tangente der Sprungantwort im Wendepunkt, die unteren und oberen Werte der Sprungantwort sowie die Schnittpunkte der Tangente mit den unteren und oberen Werten der Sprungantwort an. Aus dieser Grafik werden die Parameter automatisch bestimmt.



Sie haben jetzt die Möglichkeit, die Tabellen für die drei Reglereinstellverfahren auszugeben.

Aufgabe 23:

Schauen Sie sich die Tabellen für die einzelnen Reglereinstellverfahren an und speichern Sie diese oder Drucken Sie sie aus.

In dem folgenden Kapitel „6.4 Reglereinstellverfahren“ wird das Reglereinstellverfahren von Chien/Hrones/Reswick beschrieben. Es wird dargestellt, wie die Parameter K, Tu und Tg per Hand mithilfe der aufgezeichneten Messwerte bestimmt werden können.

TabelleCHR

Reglereinstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick

K = 0.59 Tu = 1.4 Tg = 16.6

Regler	aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20% Überschwingen	
	Störung	Führung	Störung	Führung
P-Regler	$K_p = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 5.98$	$K_p = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 5.98$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 13.96$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 13.96$
PI-Regler	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 11.97$ $T_n = 4,0 \cdot T_u = 5.63$	$K_p = \frac{0,35 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 6.98$ $T_n = 1,2 \cdot T_g = 19.95$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 13.96$ $T_n = 2,3 \cdot T_u = 3.24$	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 11.97$ $T_n = 1,0 \cdot T_g = 16.62$
PID-Regler	$K_p = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 18.95$ $T_n = 2,4 \cdot T_u = 3.38$ $T_v = 0,42 \cdot T_u = 0.59$	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 11.97$ $T_n = 1,0 \cdot T_g = 16.62$ $T_v = 0,5 \cdot T_u = 0.70$	$K_p = \frac{1,2 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 23.93$ $T_n = 2,0 \cdot T_u = 2.81$ $T_v = 0,42 \cdot T_u = 0.59$	$K_p = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 18.95$ $T_n = 1,35 \cdot T_g = 22.44$ $T_v = 0,47 \cdot T_u = 0.66$

Stellwertsprung 0.0 auf 10.0 Regelgröße geht von 20.0 auf 25.9 Drucken Schließen

TabelleZN2

Reglereinstellregeln nach Ziegler/Nichols 2

K = 0.59 Tu = 1.4 Tg = 16.6

P-Regler	PI-Regler	PID-Regler
$K_p = \frac{1,0 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 19.94$	$K_p = \frac{0,9 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 11.97$ $T_n = 0,33 \cdot T_u = 0.46$	$K_p = \frac{1,2 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 23.93$ $T_n = 2,0 \cdot T_u = 2.81$ $T_v = 0,5 \cdot T_u = 0.70$

Stellwertsprung 0.0 auf 10.0 Regelgröße geht von 20.0 auf 25.9 Drucken Schließen

TabelleTSumme

Reglereinstellregeln nach T-Summenregel

Ks = 0.59 T-Summe = 12.7

Regler	normales Einschwingen	schnelles Einschwingen
PI-Regler	$K_p = \frac{0,5}{K_s} = 0.84$ $T_n = 0,5 \cdot T_{summe} = 6.33$	$K_p = \frac{1,0}{K_s} = 1.69$ $T_n = 0,7 \cdot T_{summe} = 8.86$
PID-Regler	$K_p = \frac{1,0}{K_s} = 1.69$ $T_n = 0,66 \cdot T_{summe} = 8.36$ $T_v = 0,167 \cdot T_{summe} = 2.11$	$K_p = \frac{2,0}{K_s} = 3.38$ $T_n = 0,8 \cdot T_{summe} = 10.13$ $T_v = 0,194 \cdot T_{summe} = 2.46$

Stellwertsprung 0.0 auf 10.0 Regelgröße geht von 20.0 auf 25.9 Drucken Schließen

Aufgabe 24:

Nehmen Sie die Reglerparameter aus den Tabellen und vergleichen Sie sie mit den im Kapitel 6.4 per Hand bestimmten Reglerparametern für das Verfahren von Chien/Hrones/Reswick.

Die per Hand bestimmten Parameter entsprechen den automatisch bestimmten Parametern aus der Tabelle.

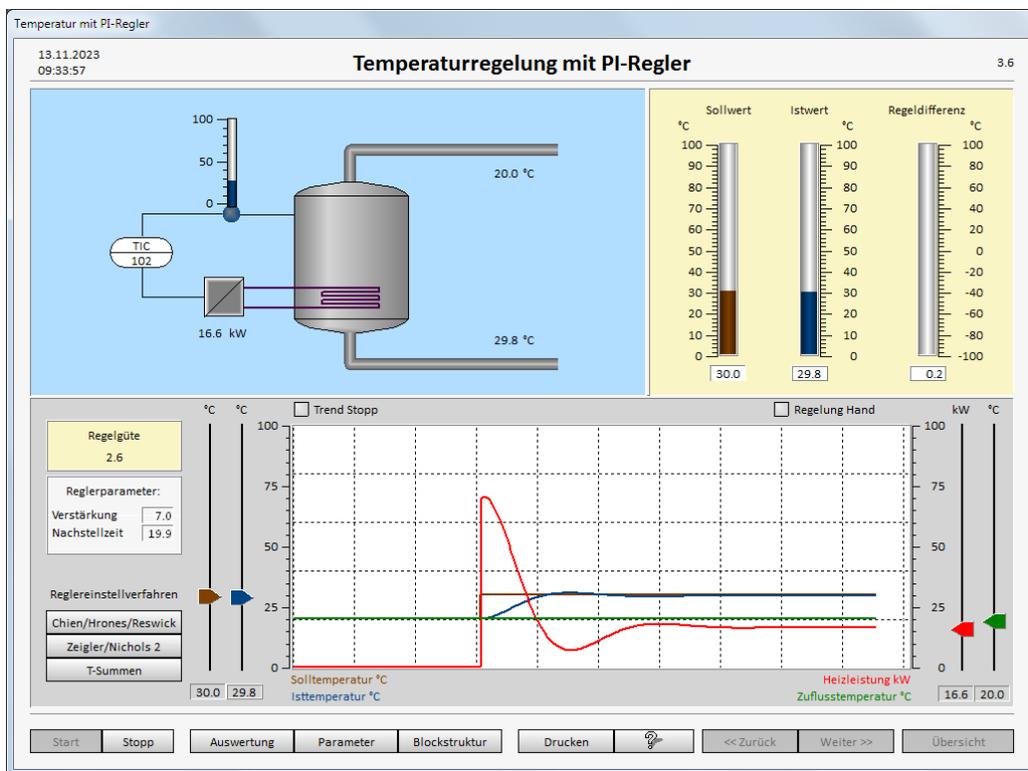
6.3.2 Vergleich der Reglereinstellregeln

Hier werden die Einschwingverhalten der Regelkreise für die unterschiedlichen Reglereinstellverfahren untersucht.

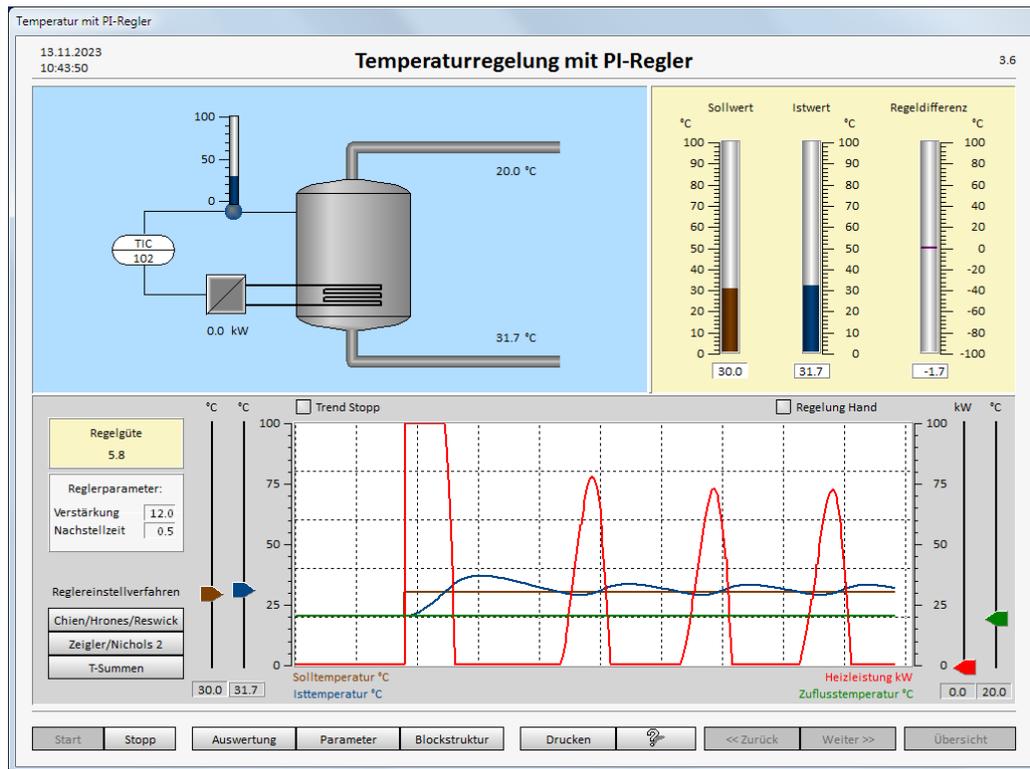
Aufgabe 25:

Nehmen Sie die Reglerparameter aus den Tabellen und führen Sie Versuche mit diesen Reglerparametern für die PI-Regelung durch.

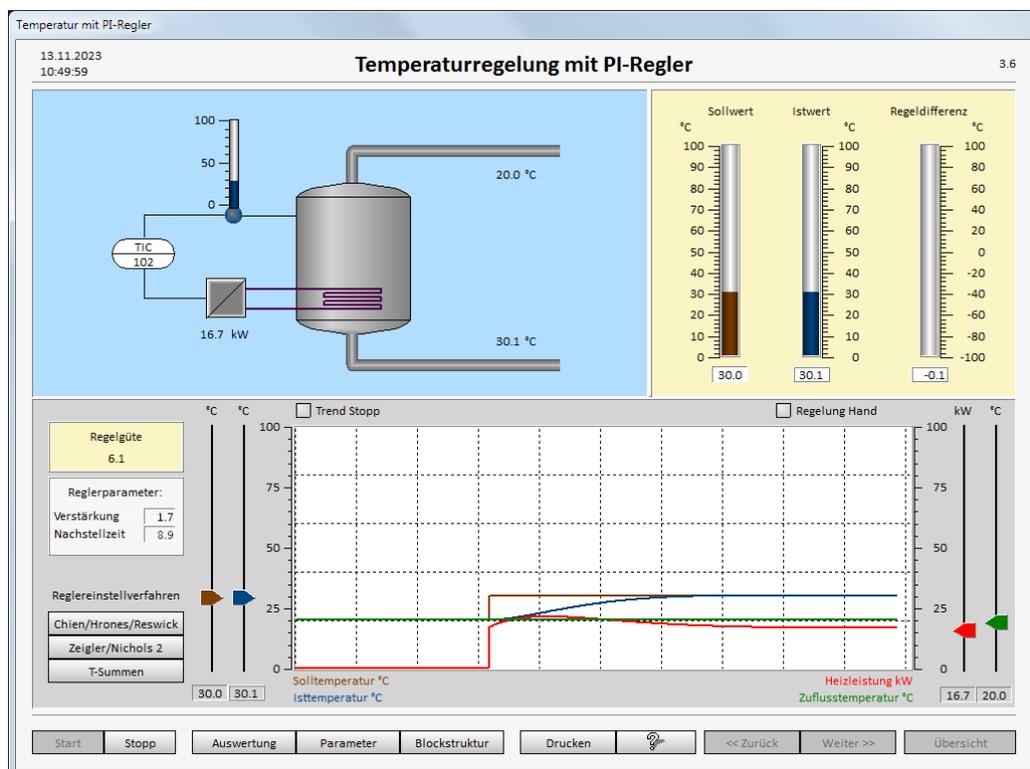
Im Folgenden werden die drei Reglereinstellverfahren für den Regelkreis ohne Messverzögerung miteinander verglichen. Es wurde jeweils ein Sollwertsprung von 20°C auf 30°C vorgegeben.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Chien/Hrones/Reswick für den PI-Regler mit asymptotischen Führungsverhalten.



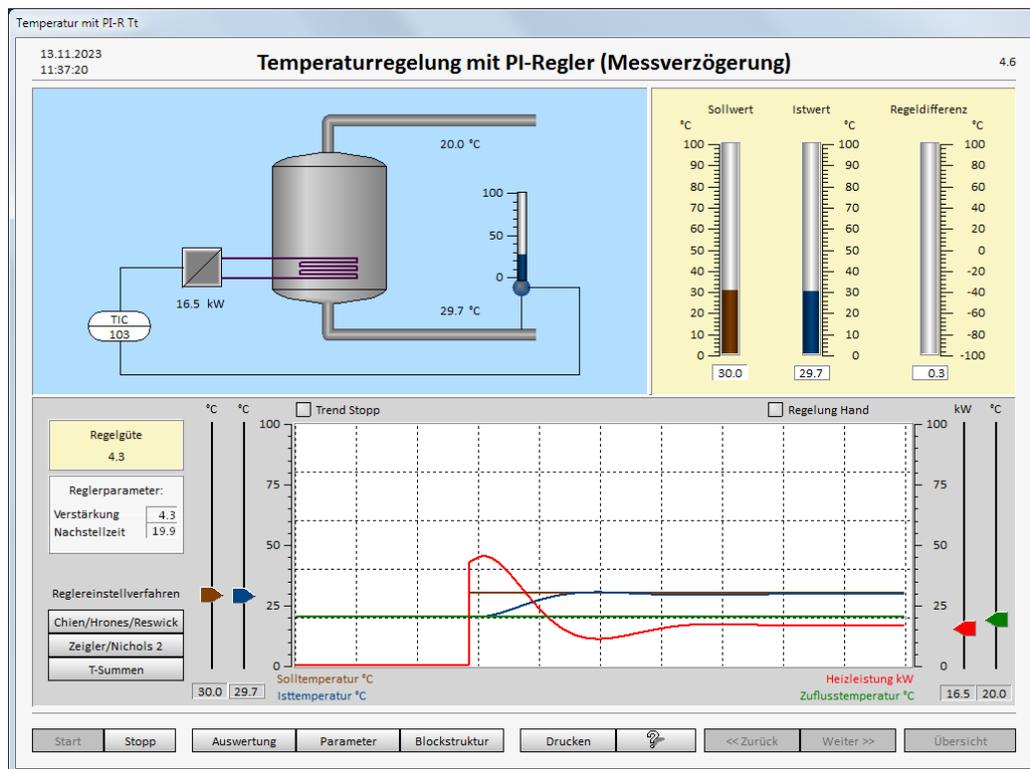
Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Ziegler/Nichols 2 für den PI-Regler



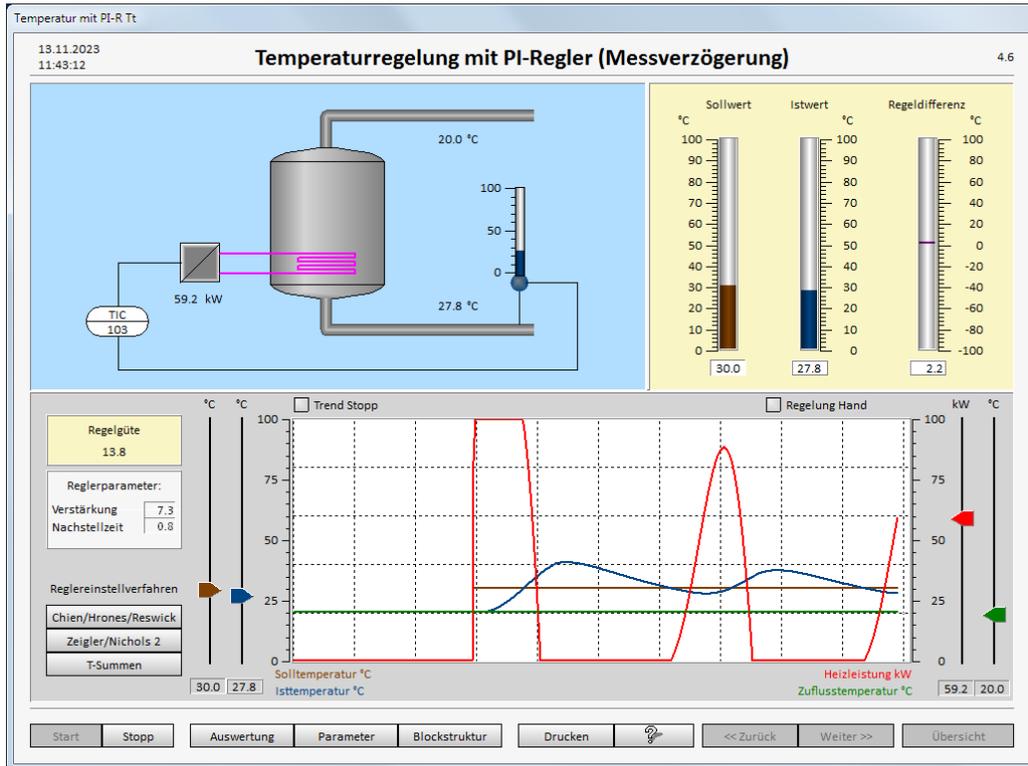
Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach der T-Summen-Regel für den PI-Regler für schnellen Regelverlauf

Der Vergleich der drei Verfahren zeigt, dass die Reglerparameter von Chien/Hrones/Reswick und der T-Summen-Regel ein gutes Einschwingverhalten zeigen, während das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 nicht geeignet ist. Das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 sollte nur für Strecken erster Ordnung mit Totzeit (PT1Tt-Glied) eingesetzt werden.

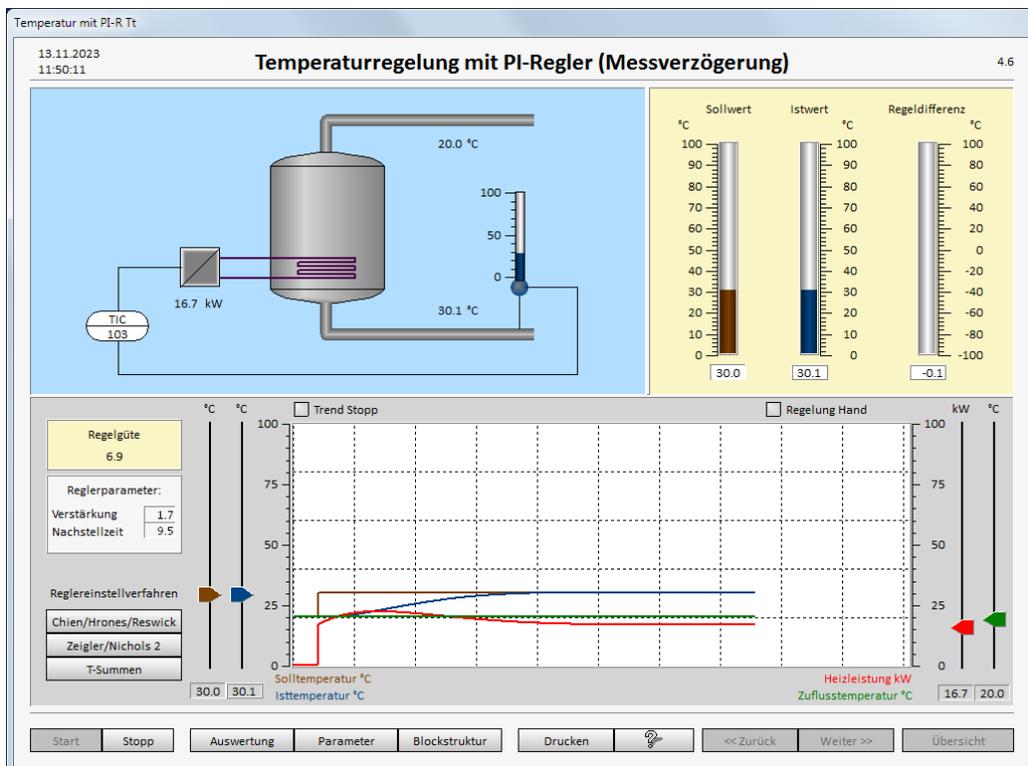
Im Folgenden werden die drei Reglereinstellverfahren für den Regelkreis mit Messverzögerung miteinander verglichen. Es wurde jeweils ein Sollwertsprung von 20°C auf 30°C vorgegeben.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Chien/Hrones/Reswick für den PI-Regler mit asymptotischen Führungsverhalten.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Ziegler/Nichols 2 für den PI-Regler



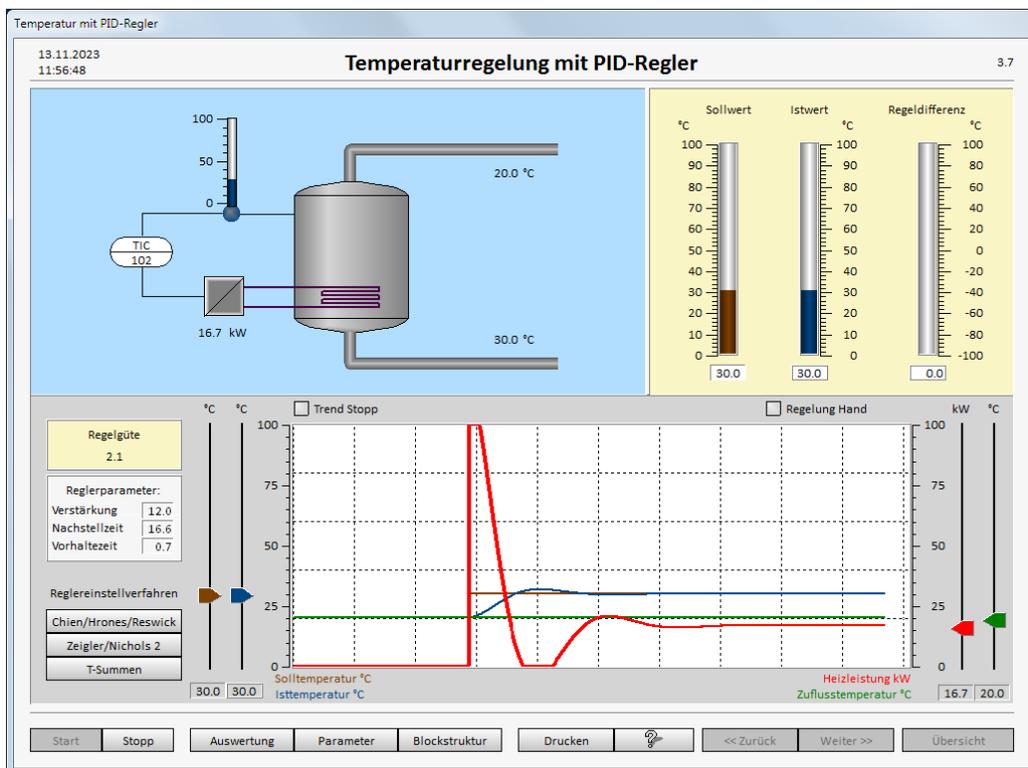
Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach der T-Summen-Regel für den PI-Regler für schnellen Regelverlauf

Auch hier zeigt sich, dass die Reglerparameter von Chien/Hrones/Reswick und der T-Summen-Regel ein gutes Einschwingverhalten zeigen, während das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 nicht geeignet ist. Laut Literatur ist das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 nur für Strecken erster Ordnung mit Totzeit (PT1Tt-Glied) geeignet.

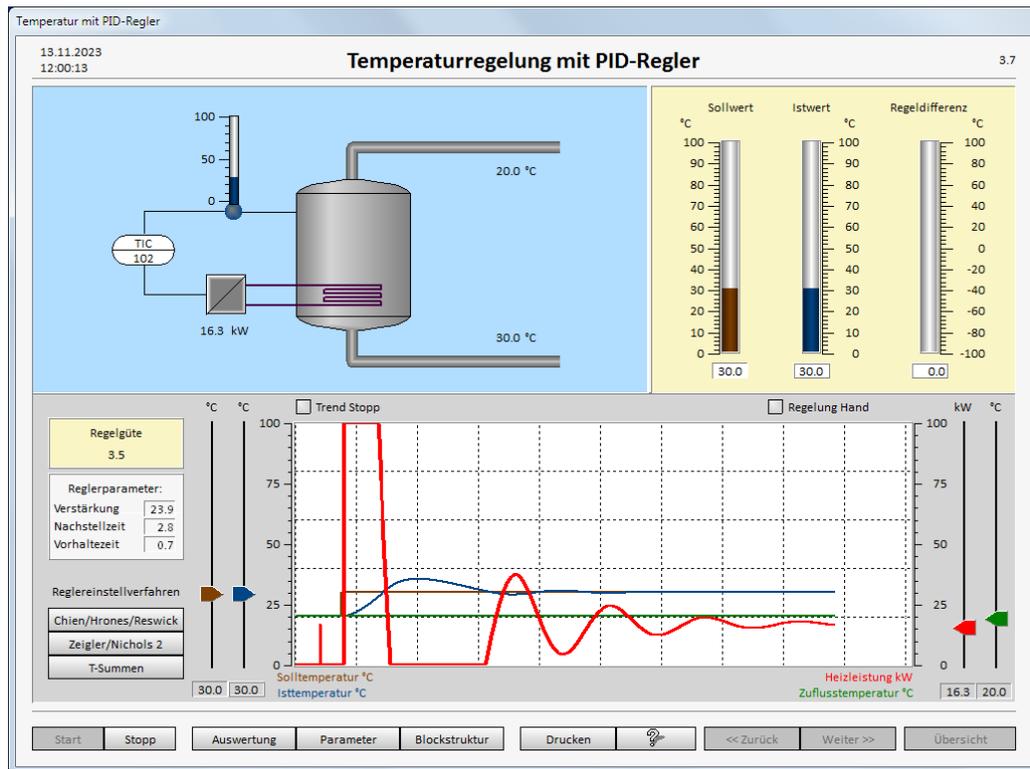
Aufgabe 26:

Nehmen Sie die Reglerparameter aus den Tabellen und führen Sie Versuche mit diesen Reglerparametern für die PID-Regelung durch.

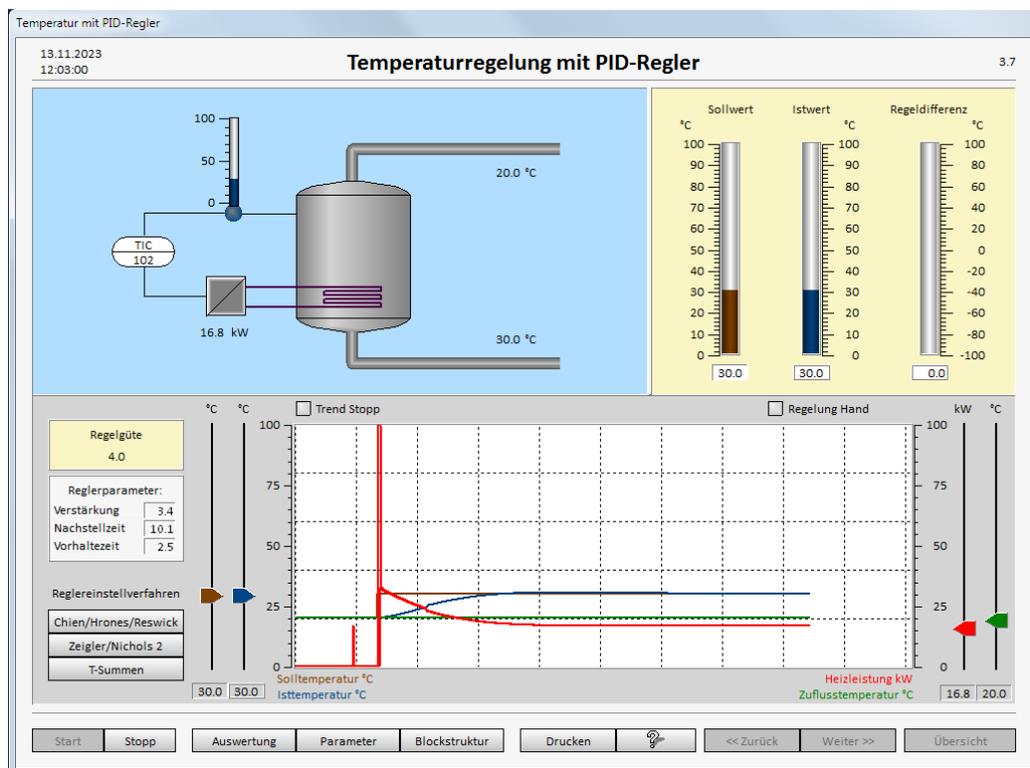
Im Folgenden werden die drei Reglereinstellverfahren für den Regelkreis ohne Messverzögerung miteinander verglichen. Es wurde jeweils ein Sollwertsprung von 20°C auf 30°C vorgegeben.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Chien/Hrones/Reswick für den PID-Regler mit asymptotischen Führungsverhalten.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Ziegler/Nichols 2 für den PID-Regler

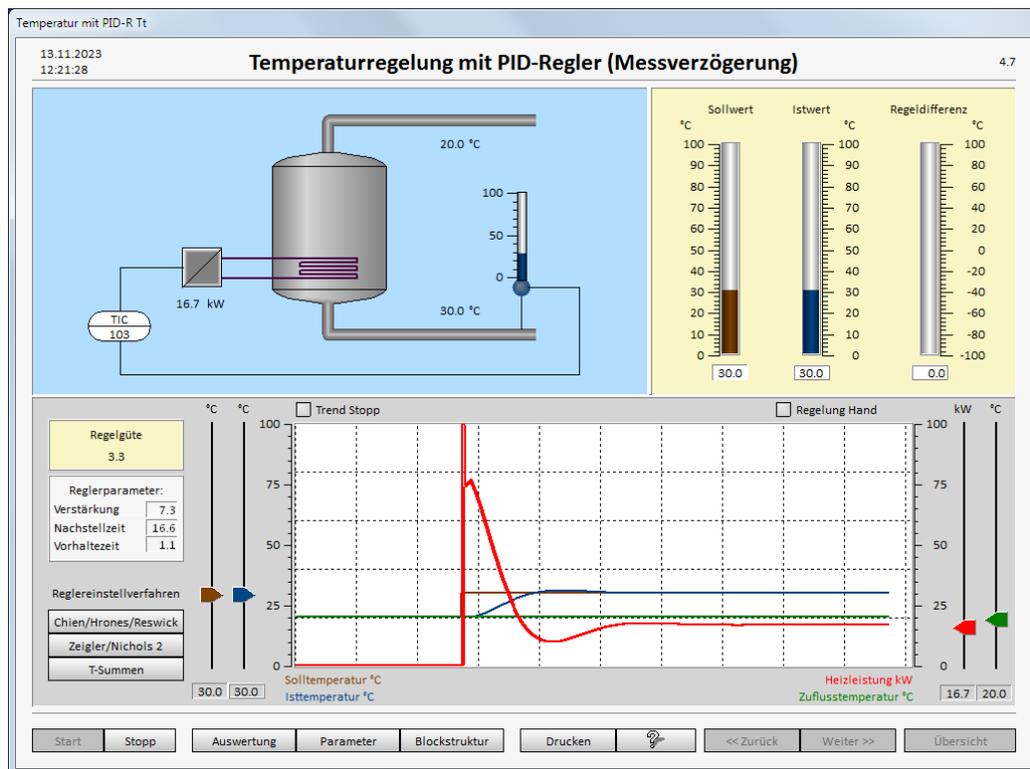


Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach der T-Summen-Regel für den PID-Regler für schnellen Regelverlauf

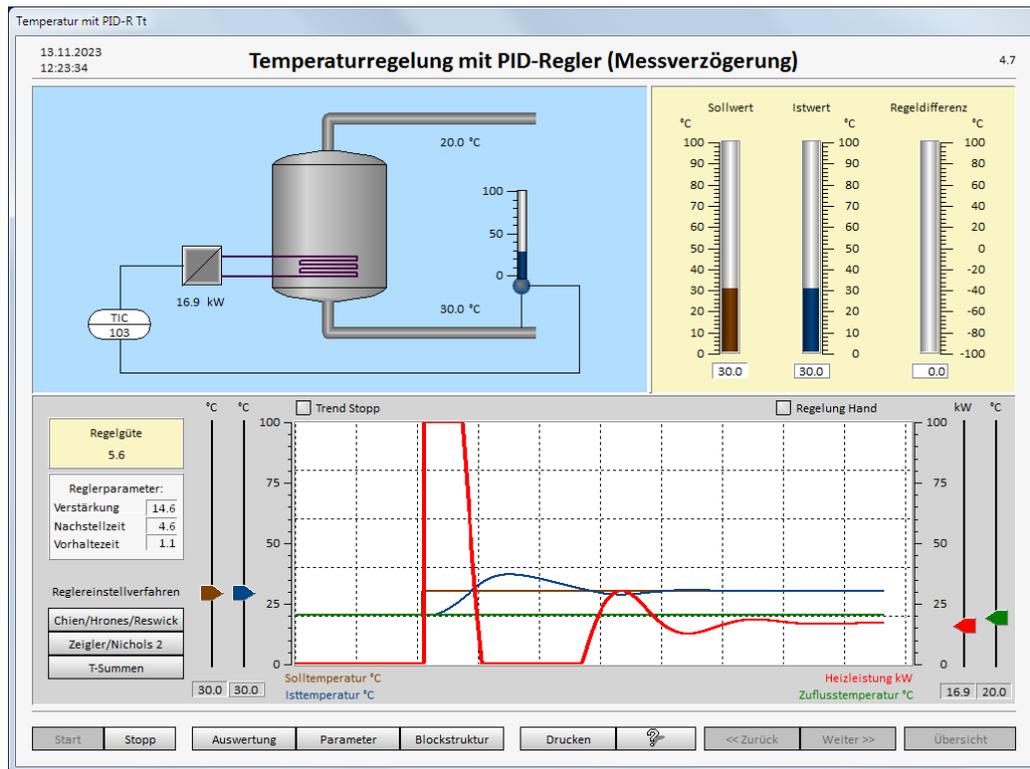
Auch hier zeigt sich, dass die Reglerparameter von Chien/Hrones/Reswick und der T-Summen-Regel ein gutes Einschwingverhalten zeigen, während das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 nicht gut geeignet ist.

Das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 sollte nur für Strecken erster Ordnung mit Totzeit (PT1Tt-Glied) eingesetzt werden.

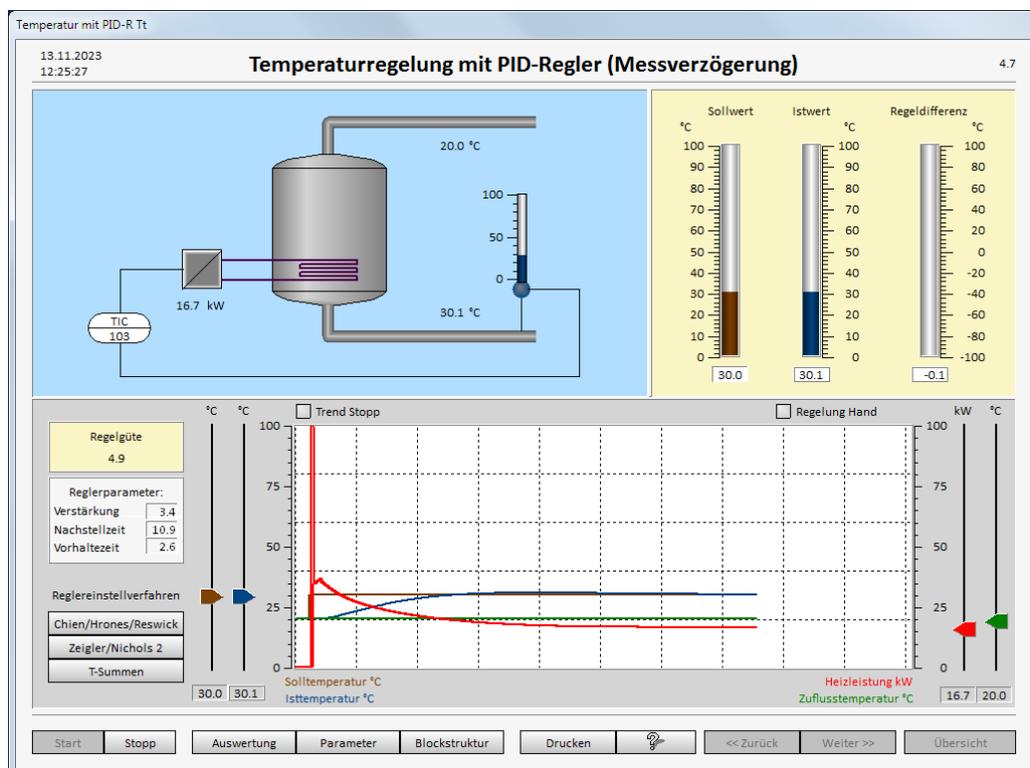
Im Folgenden werden die drei Reglereinstellverfahren für den Regelkreis mit Messverzögerung miteinander verglichen. Es wurde jeweils ein Sollwertsprung von 20°C auf 30°C vorgegeben.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Chien/Hrones/Reswick für den PID-Regler mit asymptotischen Führungsverhalten.



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach Ziegler/Nichols 2 für den PID-Regler



Einschwingverhalten mit den Reglerparametern nach der T-Summen-Regel für den PID-Regler für schnellen Regelverlauf

Auch hier zeigt sich, dass die Reglerparameter von Chien/Hrones/Reswick und der T-Summen-Regel ein gutes Einschwingverhalten zeigen, während das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 nicht gut geeignet ist.

Das Verfahren von Ziegler/Nichols 2 sollte nur für Strecken erster Ordnung mit Totzeit (PT1Tt-Glied) eingesetzt werden.

Bei anderen Sollwertsprüngen wird man ein ähnliches Regelkreisverhalten erreichen, da die Temperaturstrecke im ganzen Bereich von 20°C bis ca. 80°C ein ähnliches Verhalten hat.

Die oben dargestellten Versuche können jetzt mit den in den Tabellen ausgegebenen Parametern auch für das Störverhalten untersucht werden. Sie können z.B. den Sollwert auf 40°C stellen, warten bis das System eingeschwungen ist, um dann eine Störung durch Verändern der Vorlauftemperatur auf 30°C zu erzeugen.

Hier zeigen die Verfahren von Chien/Hrones/Reswick und das Ziegler/Nichols 2 Verfahren ein gutes Störverhalten. Auch das Verfahren nach der T-Summen-Regel zeigt ein akzeptables Einschwingverhalten.

Beim Verfahren von Chien/Hrones/Reswick werden unterschiedliche Parameter für das Führungs- bzw. das Störverhalten berechnet. Das bedeutet, dass man bei seiner Regelkreisuntersuchung entscheiden muss, ob der Regelkreis gut auf Störungen oder auf Führungsänderungen reagieren soll.

6.4 Reglereinstellverfahren

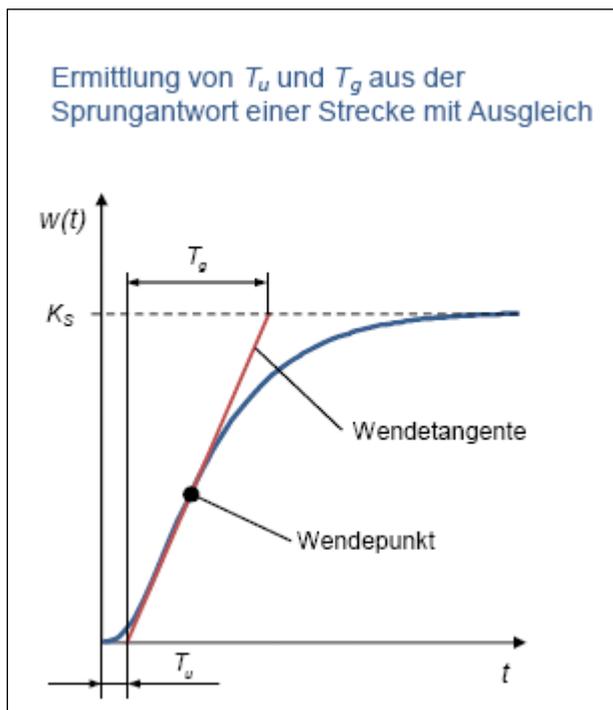
Die Temperaturstrecke mit und ohne Messverzögerung ist eine Strecke mit Ausgleich.

Eine Strecke mit Ausgleich schwingt nach einer endlichen Zeit bei einer sprunghaftigen Änderung des Eingangswertes (Stellwertes) des Systems auf einen konstanten Ausgangswert (Regelgröße) ein, während bei einer Strecke ohne Ausgleich die Regelgröße (Istwert) immer weiter steigt.

Das Verhalten der Temperatur in dem Behälter ist eine Strecke mit Ausgleich, da beim sprunghaftigen Hochstellen der Heizleistung, die Temperatur nach einer gewissen Zeit wieder einen festen Wert annimmt (bei konstanter Zulufttemperatur), wie unter Punkt 6.3 zu sehen war.

Als Reglereinstellverfahren soll das Verfahren nach Chien/Hrones/Reswick für Strecken mit Ausgleich genutzt werden.

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



Aus dieser Sprungantwort müssen die Parameter K_S , T_g und T_u bestimmt werden. Die Regelstreckenverstärkung K_S ergibt sich aus der sprunghaftigen 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.

Es bedeuten:

$T_e = T_u =$ Verzugszeit

$T_b = T_g =$ Ausgleichszeit

$K_s =$ Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich

Mithilfe dieser drei Parameter lassen sich dann die Reglerparameter aus der Einstelltabelle nach Chien/Hrones/Reswick bestimmen:

Tabelle 4: Gleichungen zur Berechnung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick

Regler- verhalten	Gütekriterium			
	Mit 20 % Überschwingung		Aperiodischer Regelvorgang	
	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.

Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg

Aufgabe 27:

Wählen Sie bei der Temperaturregelung den Punkt 3.3 bzw. 4.3 „Strecke untersuchen“.

Geben Sie einen Sprung der Heizleistung von 0% auf 10% vor.

Alle Signalverläufe werden gespeichert und können über „Auswertung“ ausgewertet und ausgemessen werden. Bestimmen Sie die Parameter K_s , T_e (T_u) und T_b (T_g) aus den gespeicherten Signalverläufen.

Durch Klick auf die Schaltfläche „Auswertung“ erhalten Sie die Messkurven. Mithilfe der unten angezeigten Buttonleiste lassen sich Zeit- und Wertausschnitte wählen (Zoomen).



Versuchen Sie den für die Auswertung interessanten Bereich mit dem Sprung der Heizleistung und dem Einschwingen der Isttemperatur einzustellen.

Sie können auch das Diagramm ausdrucken und die Kurven mithilfe eines Lineals ausmessen, um T_e und T_b zu bestimmen.

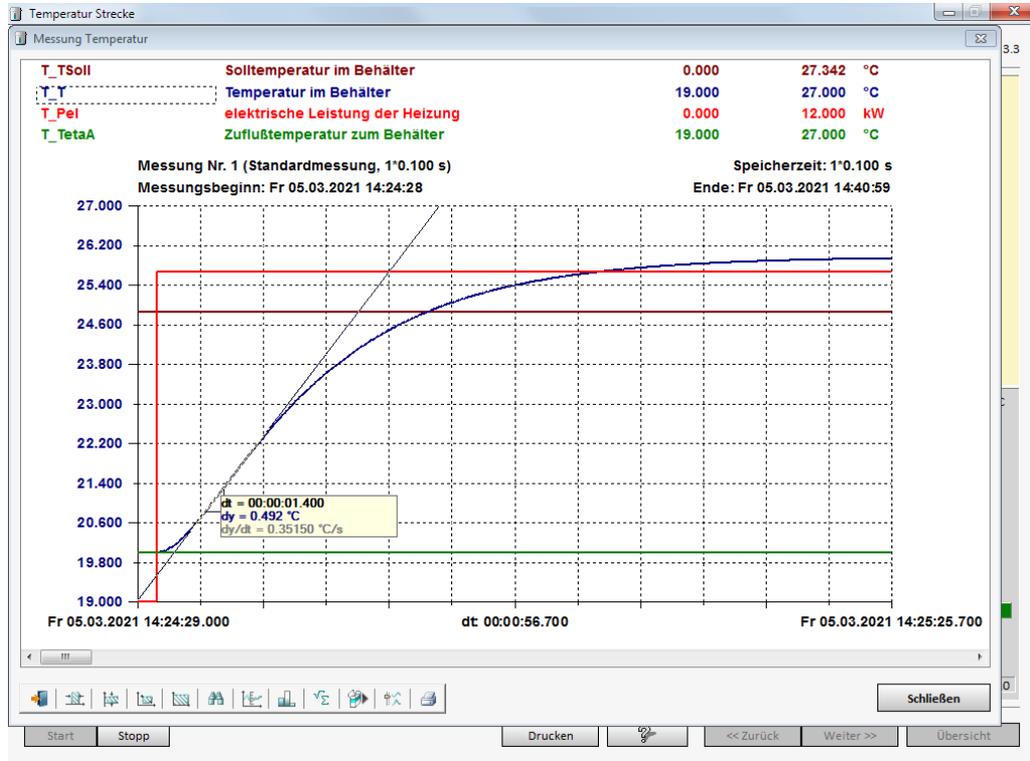


Abbildung 6-1: Signalverlauf für Temperaturstrecke ohne Messverzögerung

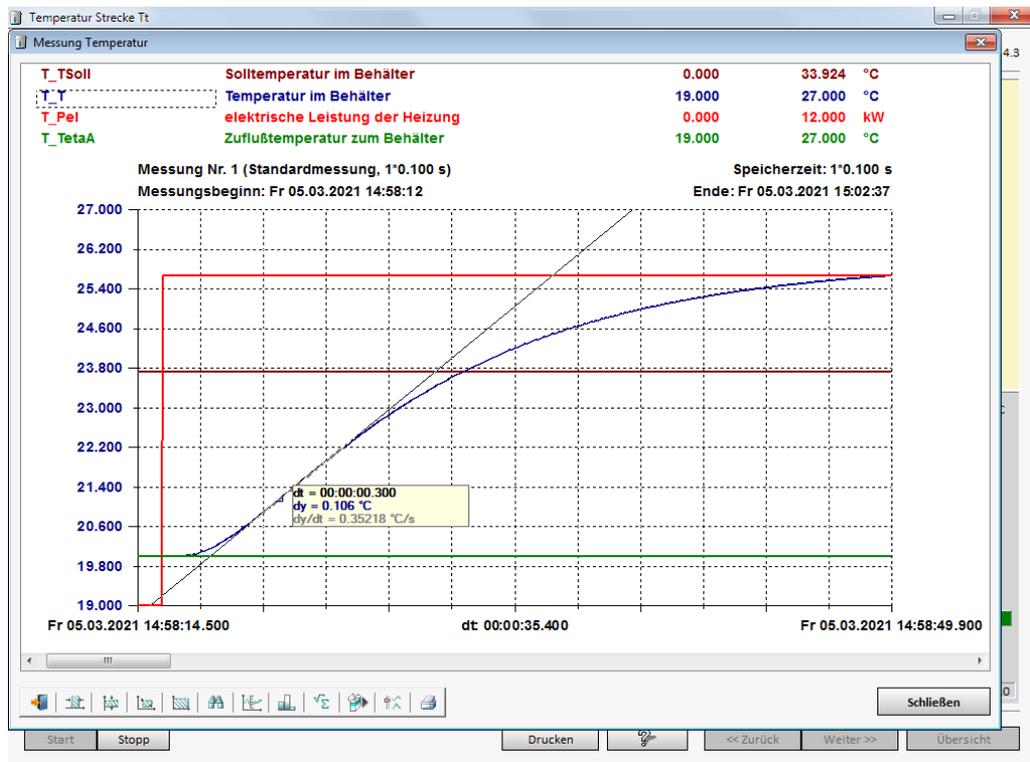


Abbildung 6-2: Signalverlauf für Temperaturstrecke mit Messverzögerung

Klicken Sie auf das blaue Signal „T_T“ (Temperatur im Behälter). Durch den Klick auf die blaue Kurve werden der zugehörige Messwert und der Zeitpunkt angezeigt. Durch Festhalten und Ziehen erhalten Sie die Zeit- und Wertedifferenz sowie die Steigung. Versuchen Sie, die Steigung der blauen Kurve im Wendepunkt zu bestimmen.

Für beide Temperaturstrecken (mit und ohne Messverzögerung) lässt sich aus den oben dargestellten Kurvenverläufen die Steigung der Tangenten im Wendepunkt ablesen. Beide haben ungefähr die Steigung $dx/dt = 0,35^\circ\text{C/s}$

Nach der sprunghaftigen Änderung der Heizleistung von 0% auf 10% geht die Innentemperatur für beide Strecken nach der Einschwingphase von 20°C auf 26°C .

Damit kann die Ausgleichszeit T_g berechnet werden:

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

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

$$T_g = (26^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) / 0,35^\circ\text{C/s} = 17,14\text{s}$$

K_s ergibt sich aus:

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

$$= (26^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) / 10\% = 0,6^\circ\text{C}/\%$$

Die Verzugszeit T_u für die Strecke ohne Messverzögerung lässt sich aus dem ersten Diagramm ausmessen und ist ungefähr 1,3s.

$$\text{Also: } T_e = T_u = 1,3\text{s} \quad T_b = T_g = 17,14\text{s} \quad K_s = 0,6$$

Die Verzugszeit T_u für die Strecke mit Messverzögerung lässt sich aus dem zweiten Diagramm ausmessen und ist ungefähr 2,3s.

$$\text{Also: } T_e = T_u = 2,3\text{s} \quad T_b = T_g = 17,14\text{s} \quad K_s = 0,6$$

In dem unten dargestellten Diagramm wurde für die Temperaturstrecke mit Messverzögerung ein Sprung der Heizleistung von 0% auf 40% vorgegeben. Die Temperatur im Behälter erreichte dann ungefähr den Endwert 44°C .

Als Tangente im Wendepunkt erhält man ungefähr $1,4^\circ\text{C/s}$. Setzt man diese Werte in die obere Berechnung ein, erhält man ähnliche Werte für T_g und K_s . T_u lässt sich ausmessen zu $T_u = 2,3\text{s}$

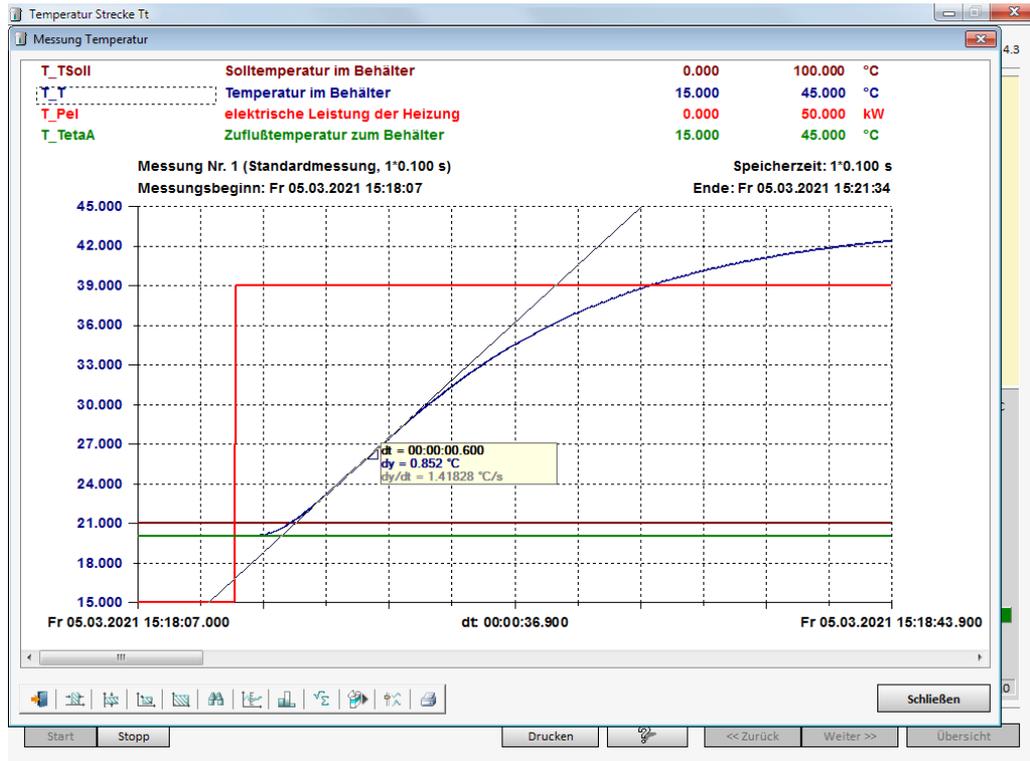


Abbildung 6-3: Strecke mit Messverzögerung und Sprung der Heizleistung von 0% auf 40%

Damit ergeben sich für die Strecke ohne Messverzögerung aus der Tabelle in etwa folgende Reglerparameter für den PI-Regler:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 13,18$$

$$T_n = T_b \quad 17,14$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 7,69$$

$$T_n = 1,2 \cdot T_b \quad 20,57$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 15,38$$

$$T_n = 2,3 \cdot T_e \quad 2,99$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 13,18$$

$$T_n = 4 \cdot T_e \quad 5,20$$

Um nicht in die Begrenzung zu kommen, wurde ein Sprung von 25°C auf 30°C vorgegeben, nach dem die Regelgröße auf 25°C eingeschwungen war.

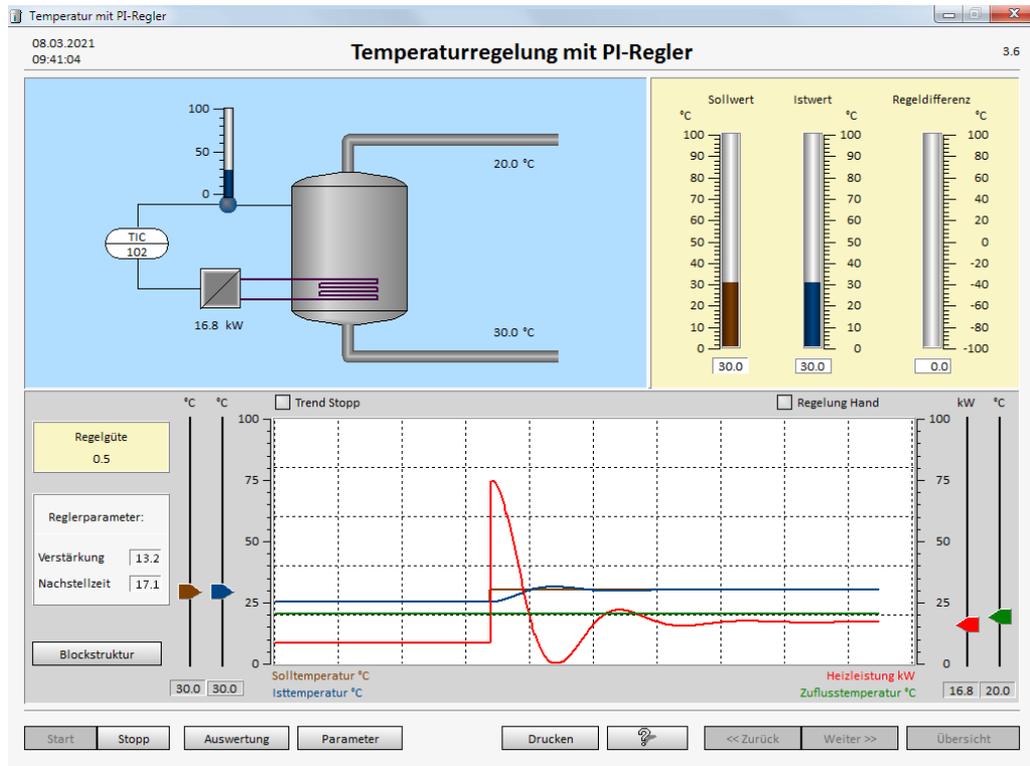


Abbildung 6-4: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

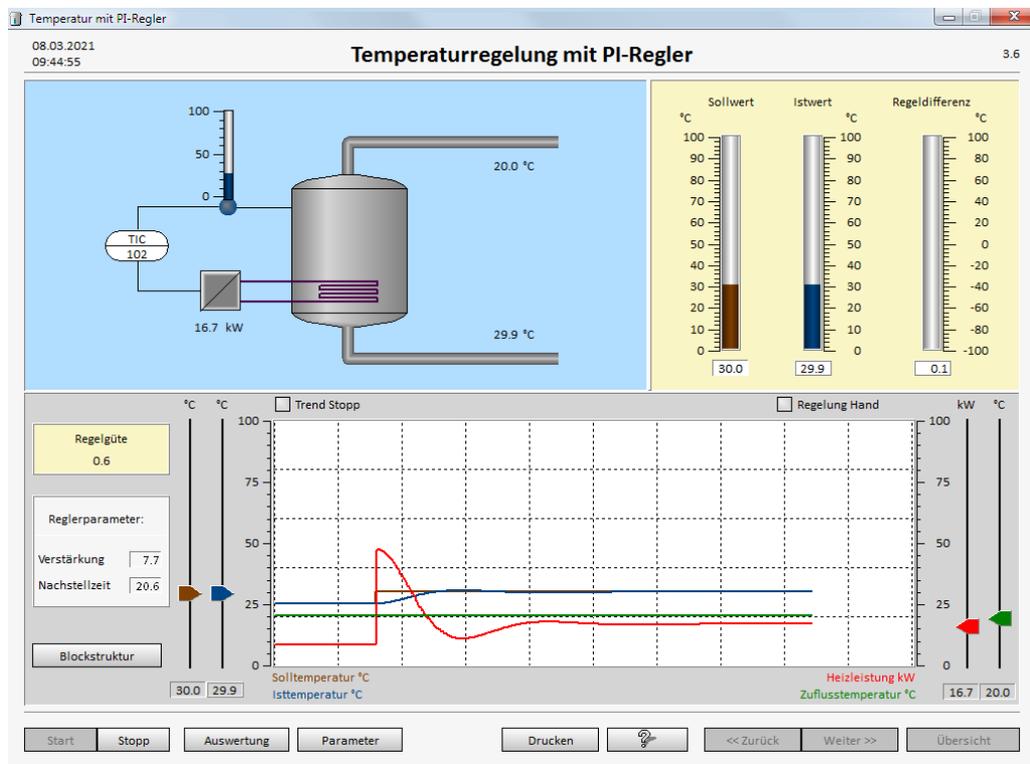


Abbildung 6-5: Führungsverhalten aperiodisch

Hier war das System auf 30°C eingeschwungen und es wurde eine Störung durch die Zuflusstemperatur von 20°C auf 25°C vorgegeben.

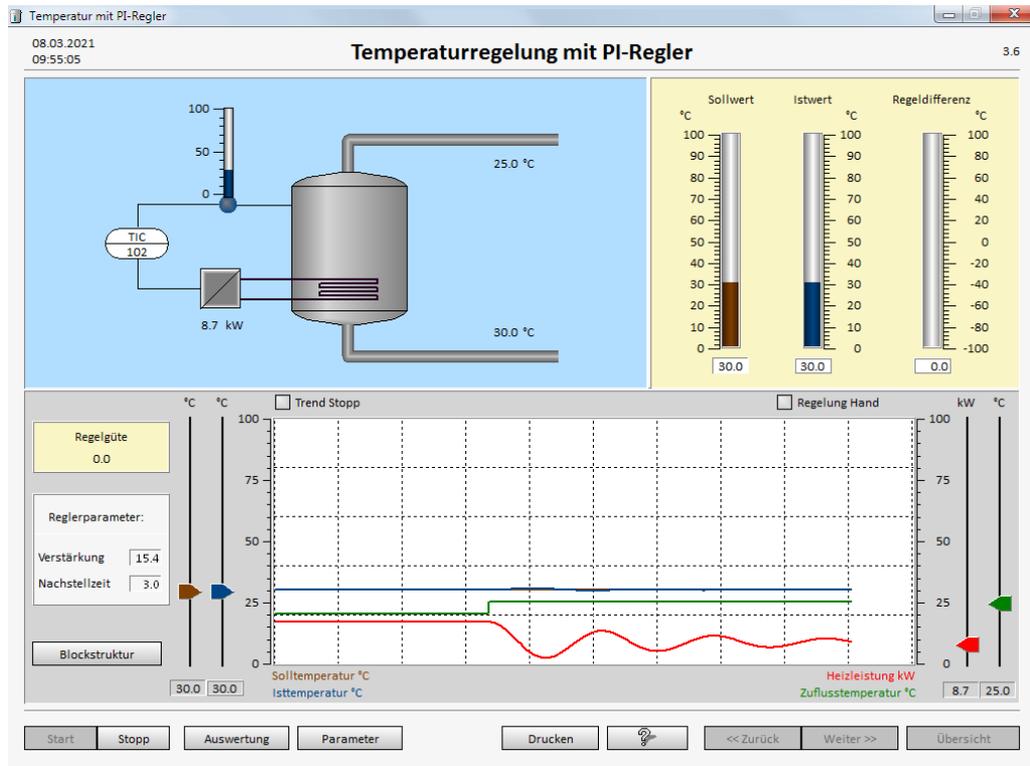


Abbildung 6-6: Störverhalten mit 20% Überschwingen

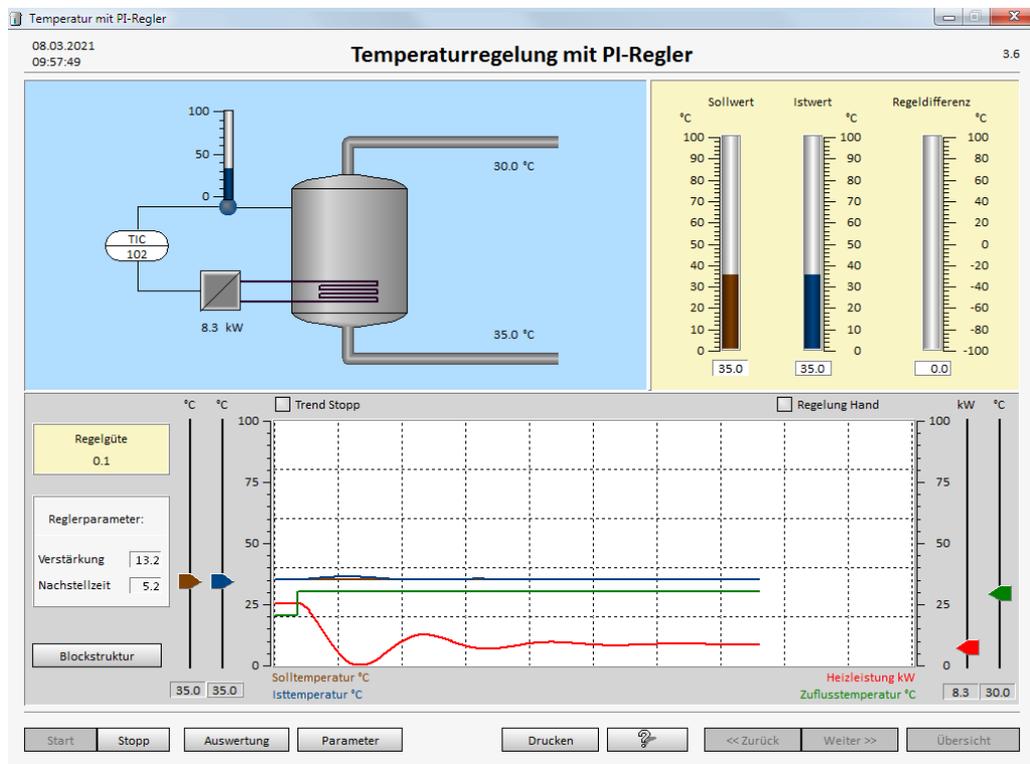


Abbildung 6-7: Störverhalten aperiodisch

Hier war das System auf 35°C eingeschwungen und es wurde ein Sprung der Zuflusstemperatur von 20°C auf 30°C eingegeben.

Für die Strecke mit Messverzögerung ergeben sich aus der Tabelle folgende Reglerparameter für den PI-Regler:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 7,45$$

$$T_n = T_b \quad 17,14$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 4,35$$

$$T_n = 1,2 \cdot T_b \quad 20,57$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 8,69$$

$$T_n = 2,3 \cdot T_e \quad 5,29$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 7,45$$

$$T_n = 4 \cdot T_e \quad 9,20$$

Um nicht in die Begrenzung zu kommen, wurde ein Sprung von 25°C auf 30°C vorgegeben, nachdem die Regelgröße auf 25°C eingeschwungen war.

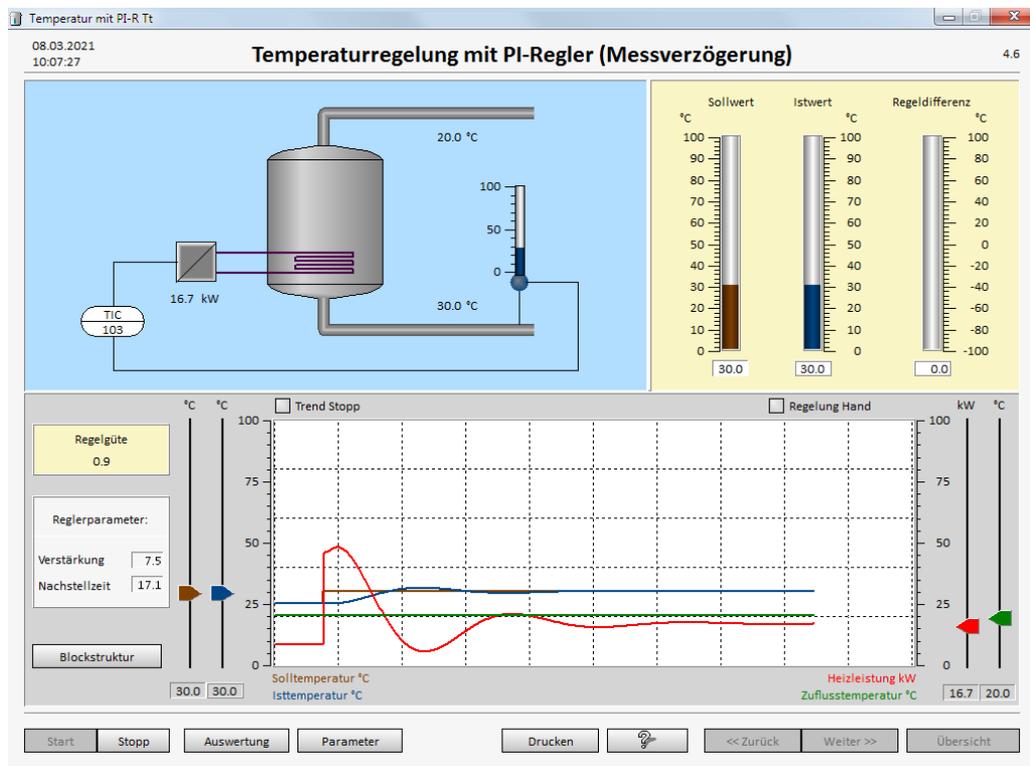


Abbildung 6-8: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

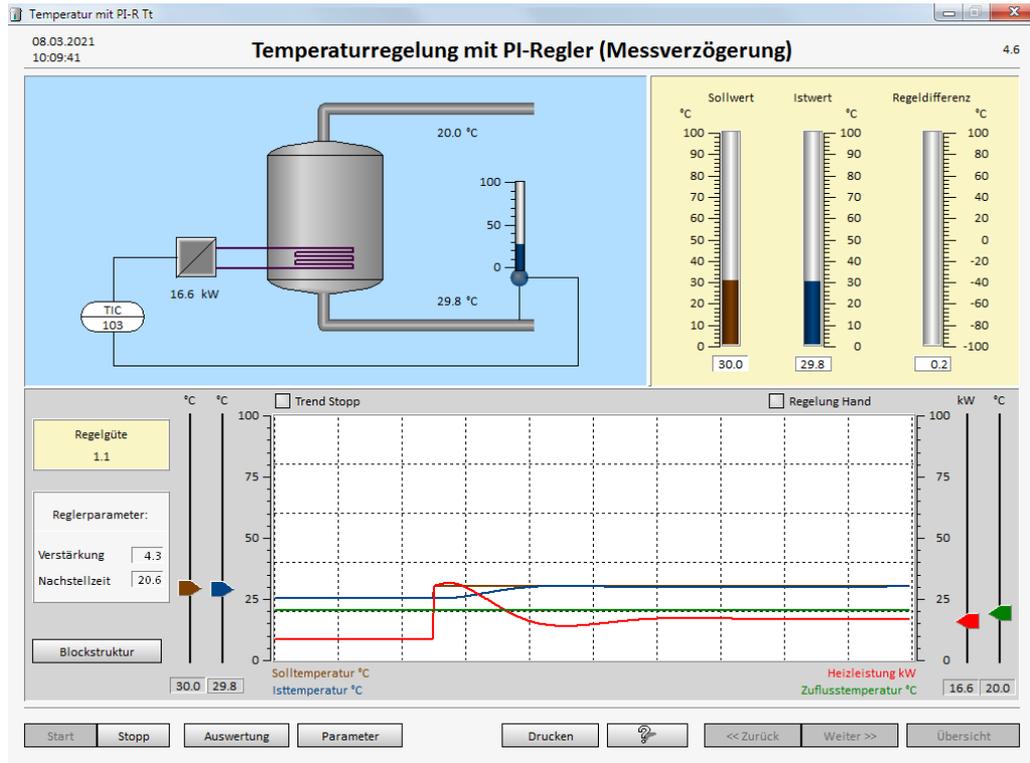


Abbildung 6-9: Führungsverhalten aperiodisch

Um nicht in die Begrenzung zu kommen, wurde eine Störung von 20°C auf 25°C für die Zuflusstemperatur vorgegeben.

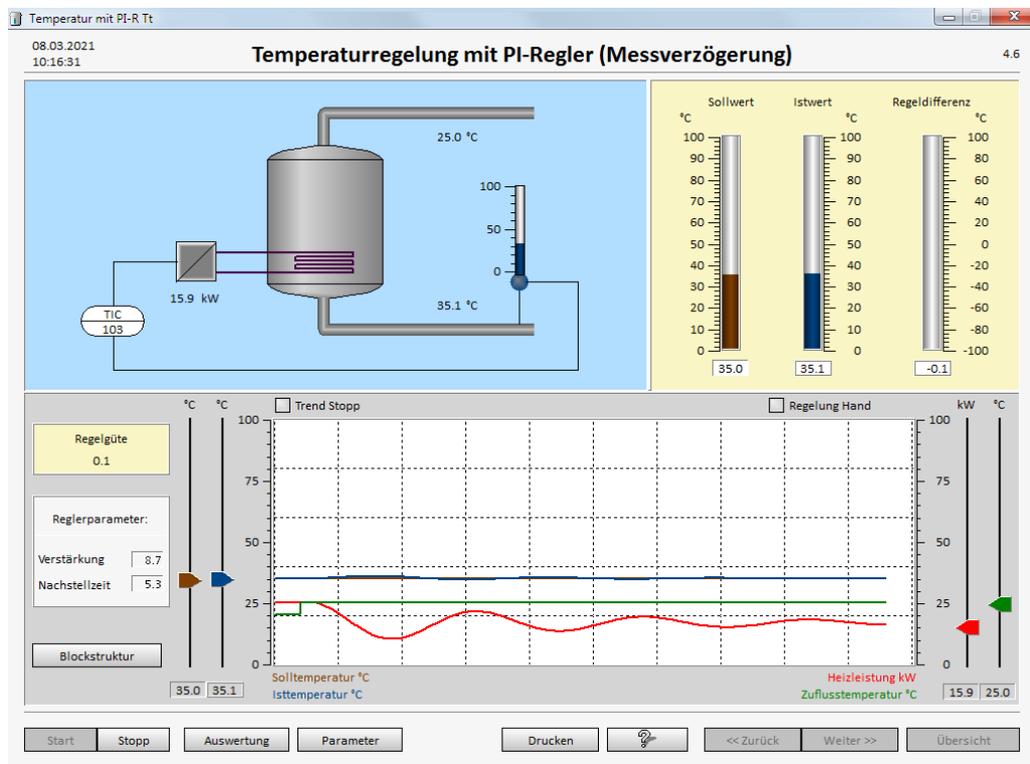


Abbildung 6-10: Störverhalten mit 20% Überschwingen

Hier war das System auf 35°C eingeschwungen und es wurde ein Sprung der Zuflusstemperatur von 25°C auf 30°C eingegeben.

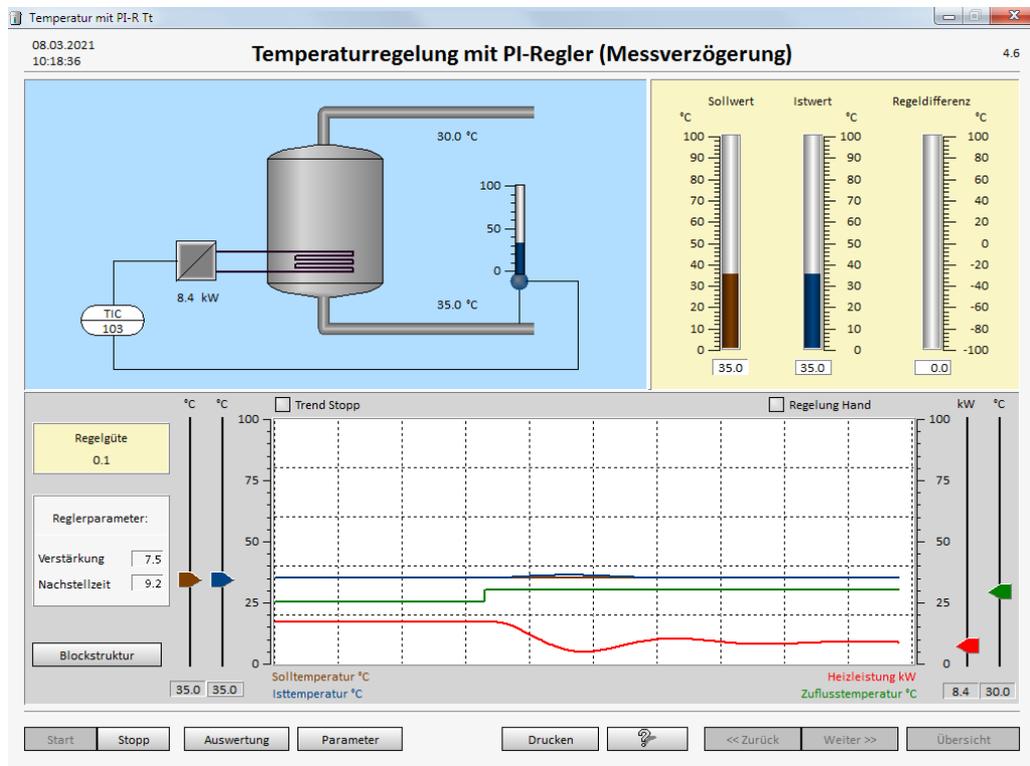


Abbildung 6-11: Störverhalten aperiodisch

Für die Strecke mit Messverzögerung ergeben sich für den PID-Regler laut Tabelle folgende Parameter:

PID-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	11,80
$T_n = 1,35 \cdot T_b$	23,14
$T_d = 0,47 \cdot T_e$	1,08

Führungsverhalten aperiodisch

$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	7,45
$T_n = T_b$	17,14
$T_d = 0,5 \cdot T_e$	1,15

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$K = 1,2 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	14,90
$T_n = 2 \cdot T_e$	4,60
$T_d = 0,42 \cdot T_e$	0,97

Störverhalten aperiodisch

$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	11,80
$T_n = 2,4 \cdot T_e$	5,52
$T_d = 0,42 \cdot T_e$	0,97

Um nicht in die Begrenzung zu kommen, wurde ein Sprung von 25°C auf 30°C vorgegeben, nachdem die Regelgröße auf 25°C eingeschwungen war.

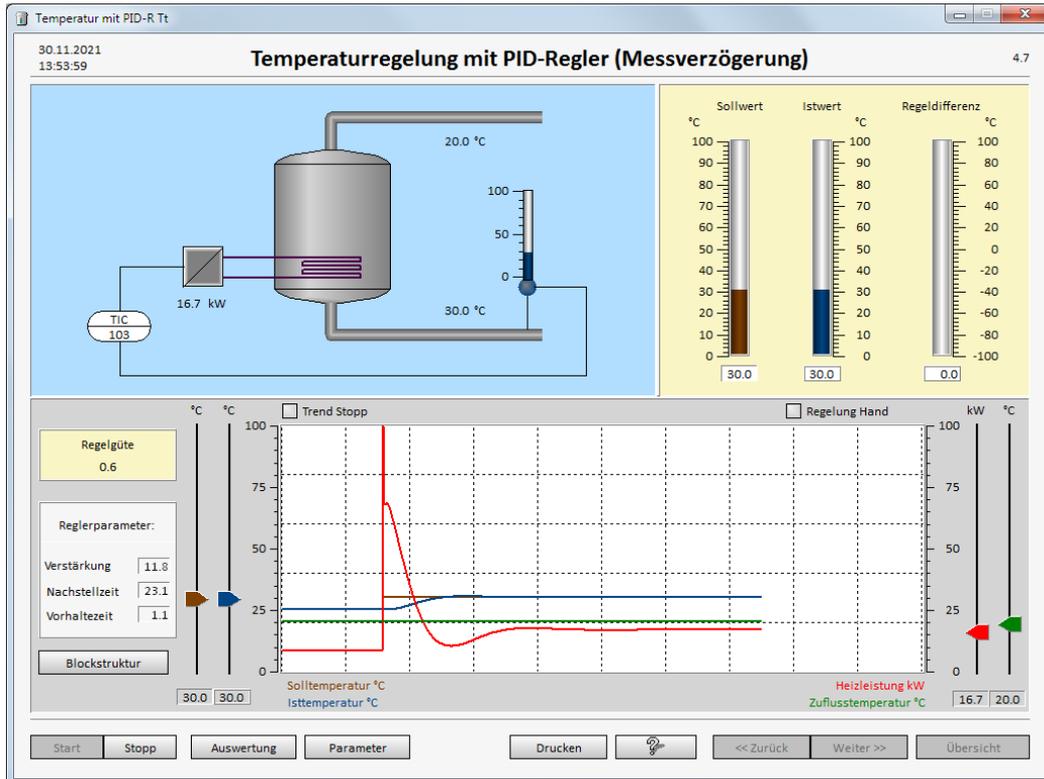


Abbildung 6-12: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

Um nicht in die Begrenzung zu kommen, wurde ein Sprung von 30°C auf 35°C vorgegeben, nachdem die Regelgröße auf 30°C eingeschwungen war.

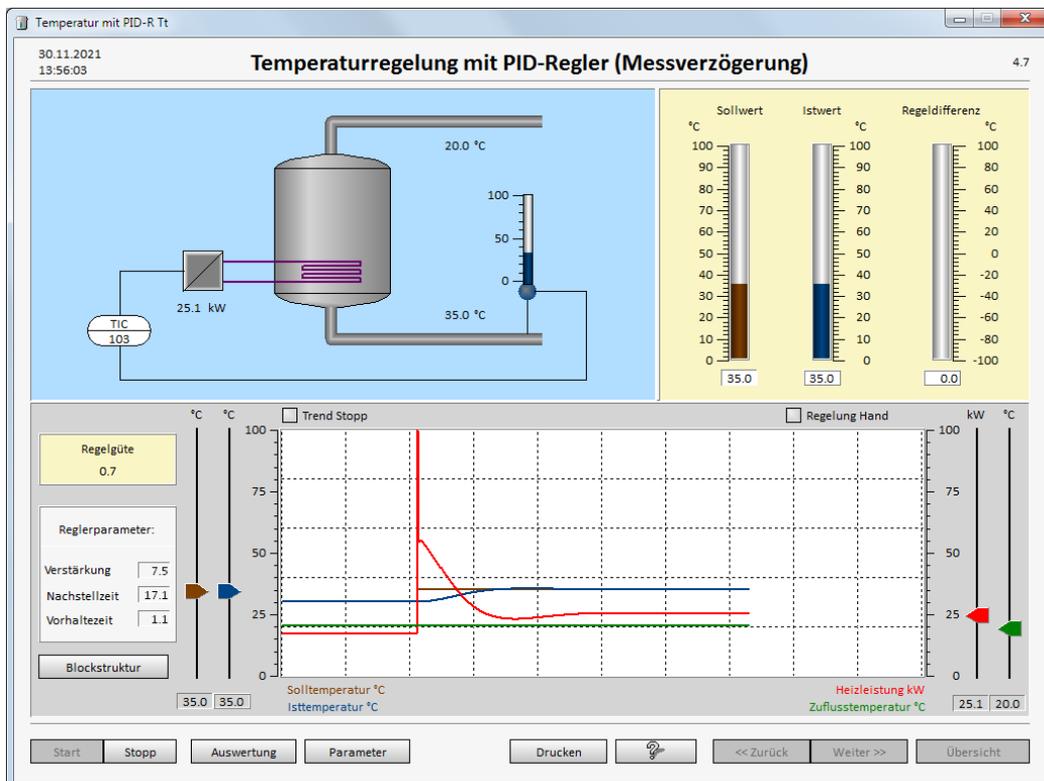


Abbildung 6-13: Führungsverhalten aperiodisch

Da sich die Parameter deutlich je nach Anwendungsfall unterscheiden, muss der Anwender entscheiden, welche Art von Regelung für seinen Regelkreis wichtig ist (Stör- oder Führungsverhalten, mit oder ohne Überschwingen).

Eventuell muss der Anwender einen Kompromiss zwischen den Reglerparametern eingehen.

6.5 Beurteilung Reglereinstellverfahren

Reglereinstellverfahren sind empirisch bestimmte Verfahren, die geeignet sind, um Daumenwerte für gute Reglerparameter zu berechnen.

Die Einstellungen für die Reglerparameter unterscheiden zwischen Stör- und Führungsverhalten. Es werden unterschiedliche Reglerparameter berechnet.

Will man mit seinen Reglerparametern beide Fälle (Stör- und Führungsverhalten) abdecken, muss man einen Kompromiss zwischen den berechneten Parametern des Störverhaltens und des Führungsverhaltens eingehen.

Die obigen Beispiele zeigen, dass man mit den berechneten Reglerparametern ein vernünftiges Regelkreisverhalten erhält. Allerdings entspricht das Verhalten nicht genau dem Einschwingverhalten, wie es in der Tabelle gewählt wurde.

Dass das System nicht genau aperiodisch bzw. mit 20% Überschwingen eingeschungen ist, liegt auch daran, dass das Stellsignal teilweise in die Begrenzung gegangen ist und die Zeitkonstanten nicht exakt bestimmt werden können.

Aber bei den gezeigten Beispielen und Aufgaben waren die von Chien/Hrones/Reswick vorgeschlagenen Reglerparameter geeignet für eine vernünftige Regelung.

7 Rührkesselkaskade, Regelungstechnisches Praktikum I

Der Anlagenaufbau besteht im Wesentlichen 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 Eingangsgröße (Stellgröße) angesehen, die Salzkonzentration der aus dem dritten Kessel fließenden Flüssigkeit ist die Ausgangsgröße (Regelgröße) des Systems.

Schwankungen in der Durchflussmenge des zufließenden Wasserstroms sowie Änderungen der Salzkonzentration der Salzlösung stellen Störgrößen dar.

7.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum I den Punkt 5.1 „Ungeregelte Anlage“.

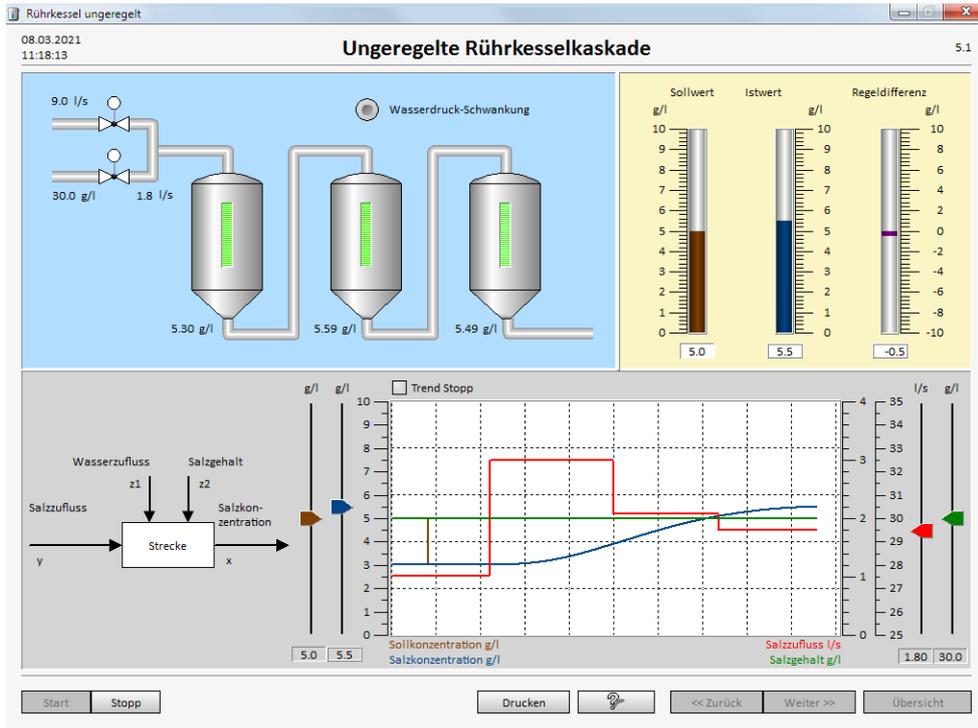
Drücken Sie auf „Start“.

Sie können die Werte für den Sollwert (Sollkonzentration g/l), den Stellwert (Salzzufluss l/s) und die Störung (Salzgehalt g/l) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

Aufgabe 1:

Verstellen Sie die Sollkonzentration (Führungsgröße) auf 5g/l und versuchen Sie dann durch Verstellen des Salzzuflusses (Stellgröße) die Salzkonzentration (Regelgröße) im dritten Behälter auf die Sollkonzentration zu bringen.

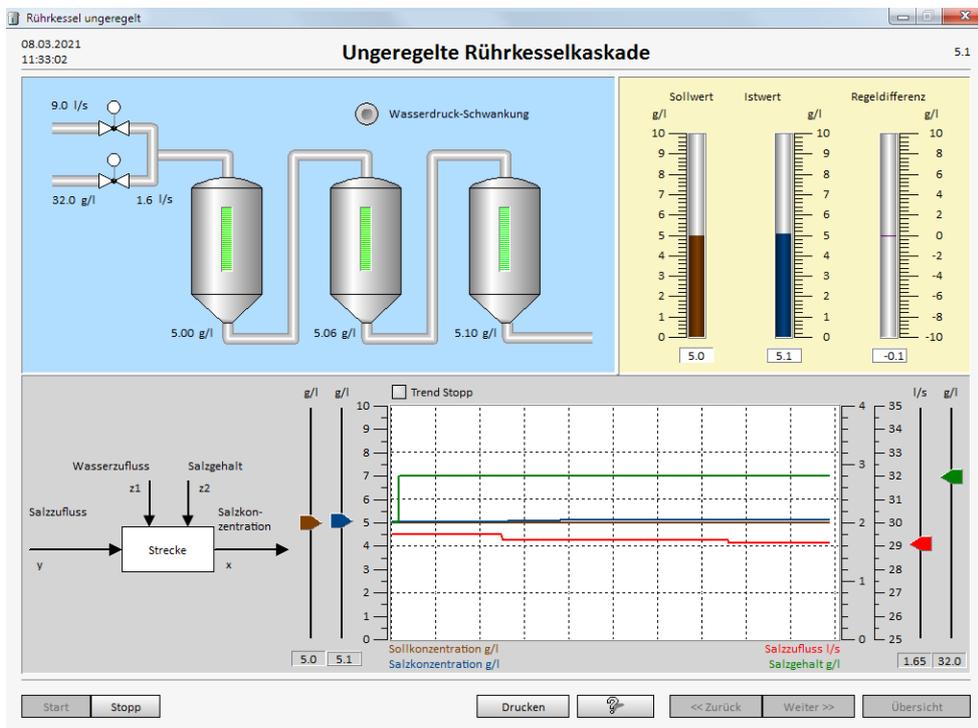
In diesem Fall spricht man vom Führungsverhalten. Der Sollwert wird verstellt, und es wird versucht den Istwert (Regelgröße Salzkonzentration) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße Sollkonzentration) zu bringen.



Da es sich bei dem System um einen sehr langsamen Prozess handelt, ist es sehr schwer den Regelkreis auf den neuen Sollwert zu bringen.

Aufgabe 2:

Geben Sie eine Störung vor. Verändern Sie den Salzgehalt auf 32g/l. Beschreiben Sie das Verhalten und versuchen Sie die Störung auszuregeln.



Durch den vergrößerten Salzgehalt steigt die Salzkonzentration. Der Salzzufluss muss deshalb reduziert werden. In diesem Fall spricht man vom Störverhalten, da versucht wird, eine Störung auszuregeln.

7.2 Regelkreisuntersuchung

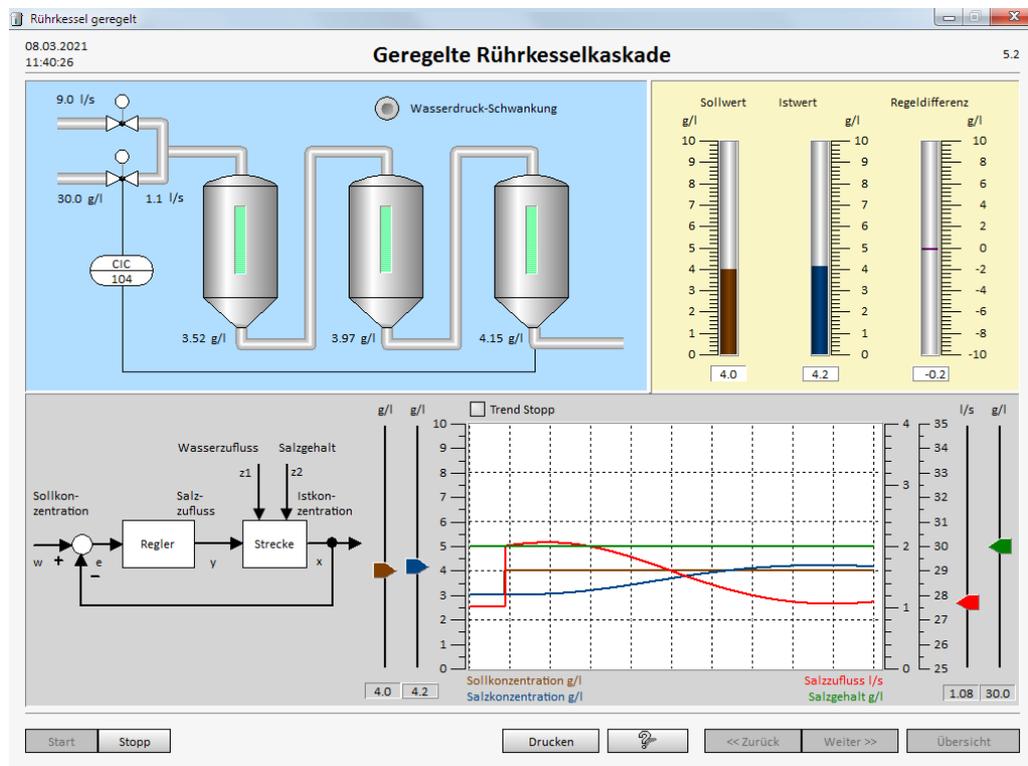
7.2.1 Geregelte Anlage

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 3:

Drücken Sie „Start“ und stellen Sie den Sollwert auf 4g/l.



Mit einem kleinen Überschwingen geht der Istwert nach einer langen Zeitspanne auf den Sollwert.

Man spricht hier vom Führungsverhalten, da die Regelung auf eine Änderung des Sollwertes (Führungsgröße) reagiert.

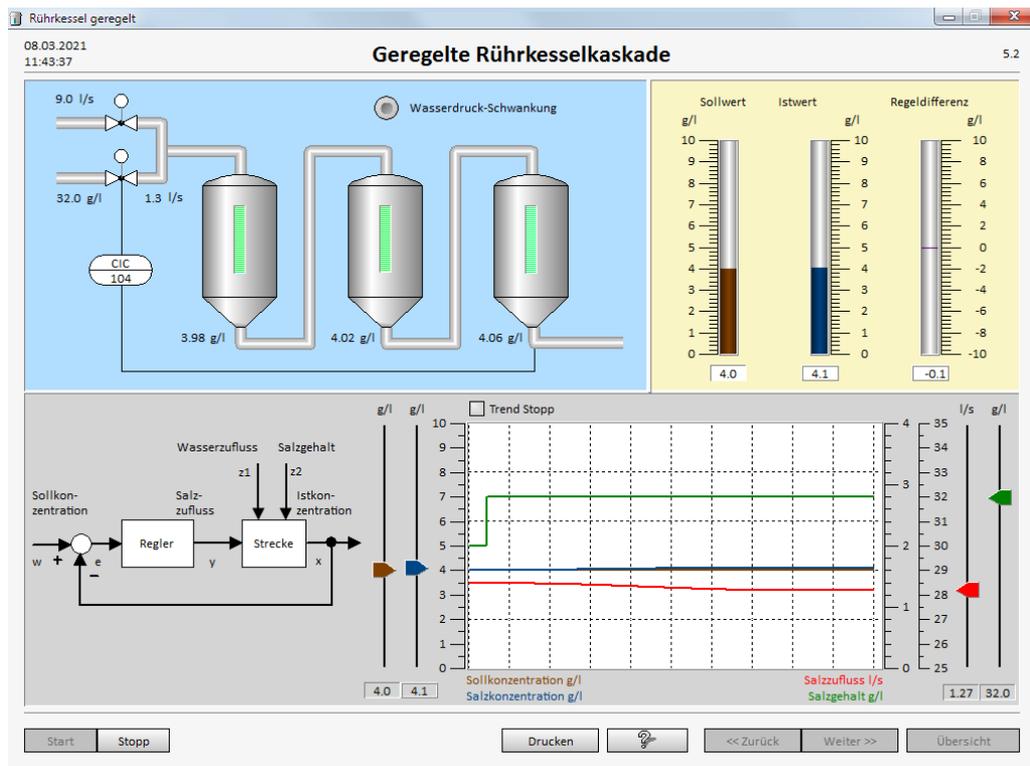
Aufgabe 4:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Setzen Sie den Sollwert auf 4g/l und warten Sie bis das System eingeschwungen ist (Die Salzkonzentration hat 4g/l erreicht und sie ändert sich nicht mehr).

Verändern Sie den Salzgehalt im Zufluss auf 32g/l.

Beobachten Sie das Systemverhalten.



Die Salzkonzentration fängt an zu steigen.

Deshalb reduziert der Regler den Salzzufluss.

Auch hier ist zu sehen, dass der Prozess sehr langsam reagiert und die Änderung der Salzkonzentration sehr langsam eintritt.

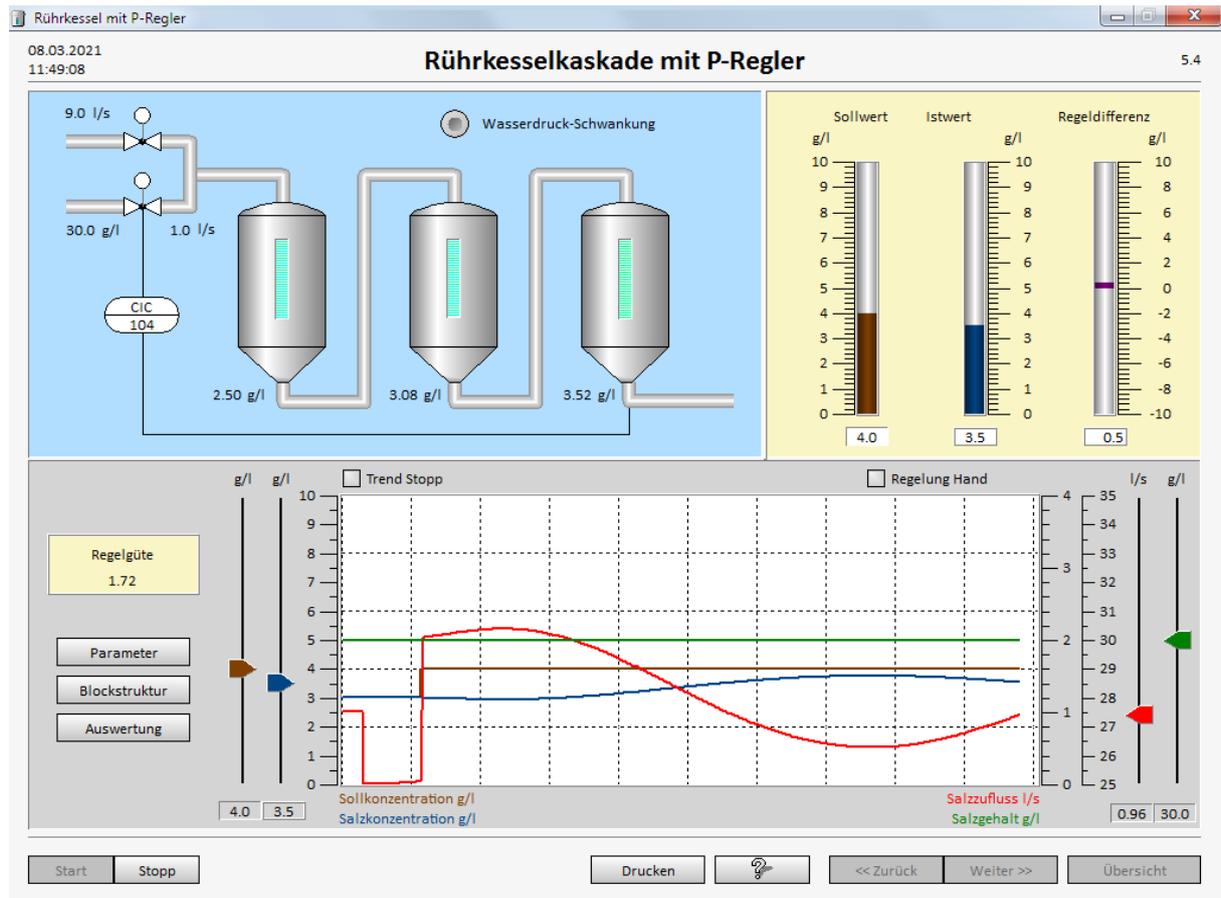
7.2.2 Regelung mit P-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.4 „Regelung mit P-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 5:

Verändern Sie die Sollkonzentration (Führungsgröße) auf 4g/l und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis sich der Istwert nicht mehr ändert.

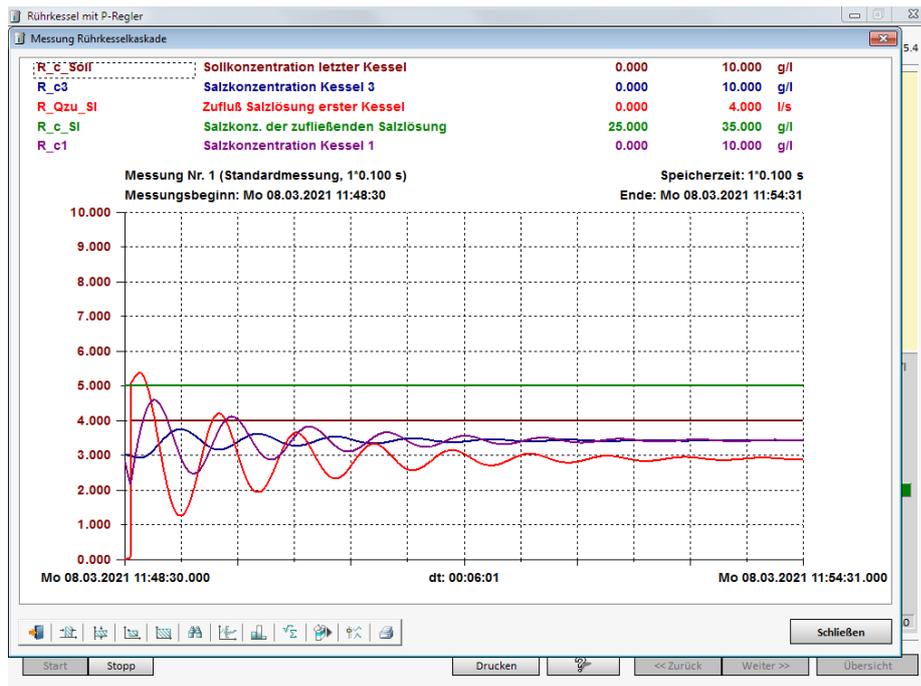


Der Regelkreis fängt an zu schwingen. Nach einer langen Einschwingphase ist er eingeschwungen und der Istwert (Regelgröße Salzkonzentration) ändert sich nicht mehr. Der Istwert (Regelgröße) erreicht nicht den Sollwert (Führungsgröße). Wir erhalten eine bleibende Regeldifferenz.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

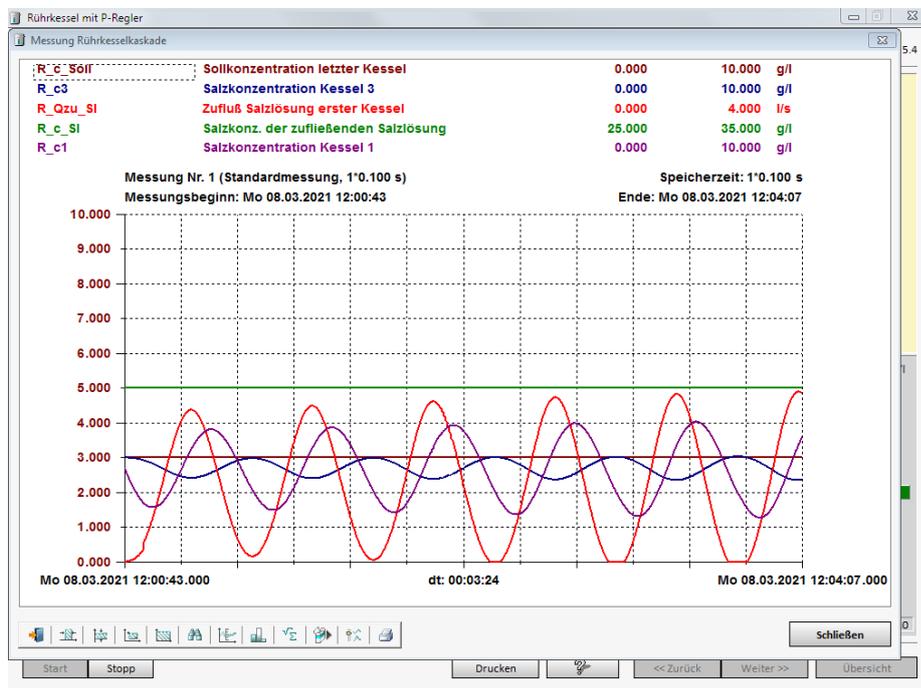
w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$



Wird die Verstärkung des P-Reglers auf 1 gesetzt fängt der Regelkreis bei einer Sollwertänderung weniger an zu schwingen, behält aber auch eine bleibende Regeldifferenz.

Ändert man die Verstärkung auf 3 wird der Regelkreis instabil und fängt an aufzuschwingen.



Info:

Damit der P-Regler ein Stellsignal (eine Heizleistung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

Begründung:

Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $w - x$ (Sollwert - Istwert) wird mit dem vorgegebenen Verstärkungsfaktor (in unserem Fall 2) verstärkt. Damit der P-Regler ein Stellsignal ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz.

7.2.3 Regelung mit I-Regler

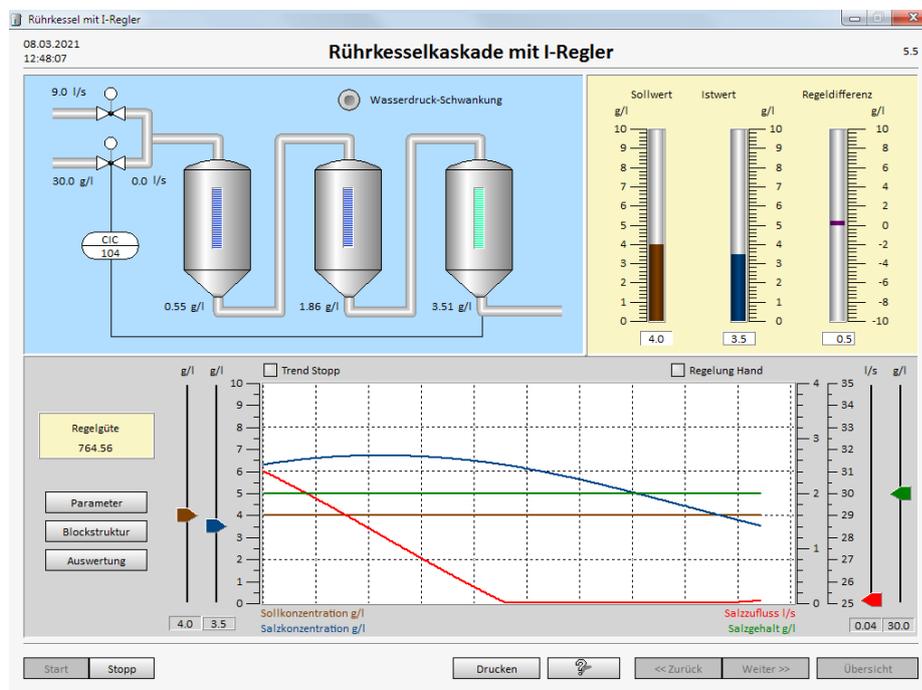
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.5 „Regelung mit I-Regler“.

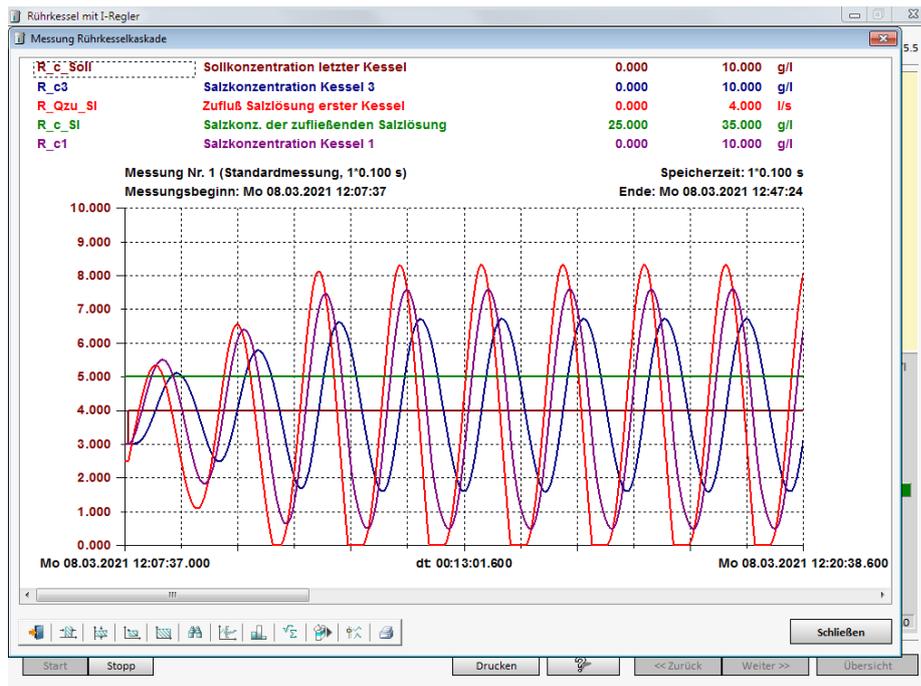
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 6:

Lassen Sie die eingestellte Integrationszeit T_i auf 20. Untersuchen Sie das Führungsverhalten.

Verändern Sie die Sollkonzentration (Führungsgröße) auf 4g/l und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.





Der Regelkreis reagiert sehr langsam und fängt an zu schwingen. Er wird instabil und führt eine Dauerschwingung durch.

Durch Klick auf „Auswertung“ erhalten Sie die aufgezeichneten Signalverläufe. Hier ist deutlich das Aufschwingen zu sehen.

Auch beim Störverhalten lässt sich der I-Regler nicht einsetzen.

7.2.4 Regelung mit PI-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.6 „Regelung mit PI-Regler“.

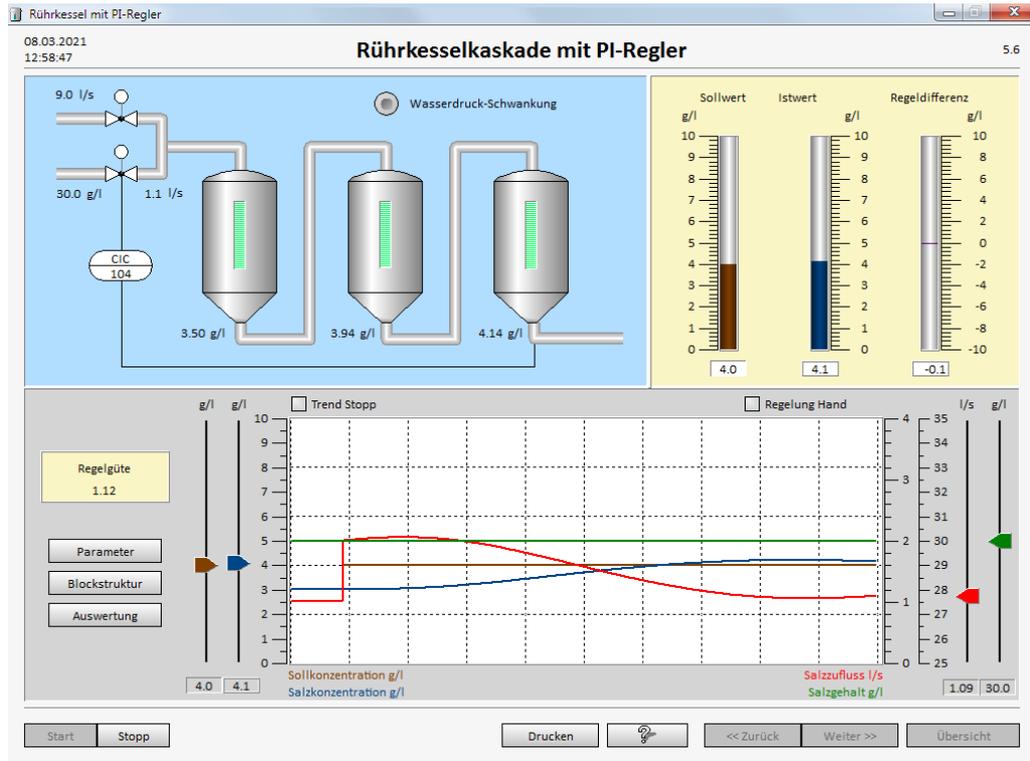
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 7:

Behalten Sie die eingestellten Parameter bei: $K = 1$, $T_i = 50$

Untersuchen Sie das Führungsverhalten.

Verändern Sie den Sollwert (Führungsgröße Sollkonzentration) von 3g/l auf 4g/l.



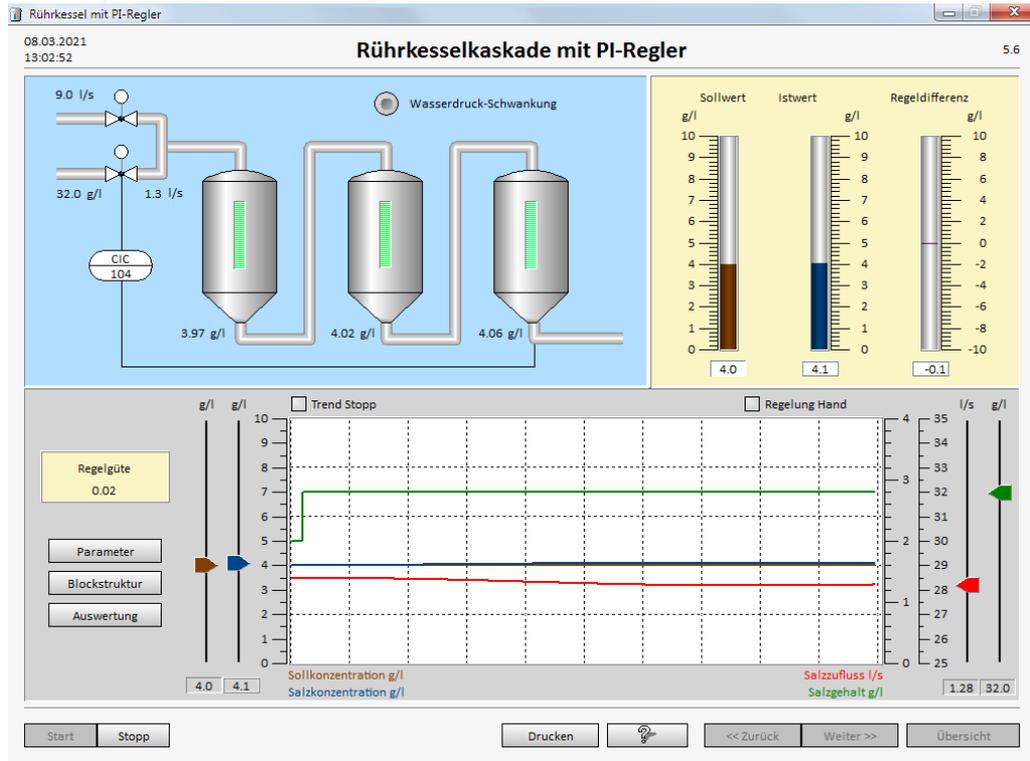
Der Regelkreis mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern schwingt mit einem kleinen Überschwinger auf den Sollwert ein. Der Istwert (Regelgröße Salzkonzentration) erreicht den Sollwert (Führungsgröße Sollkonzentration).

Aufgabe 8:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Lassen Sie den Regelkreis mit den Parametern $K = 1$ und $T_i = 50$ auf den Sollwert 4g/l einschwingen.

Wenn der Regelkreis eingeschwungen ist, verändern Sie den Salzgehalt von 30g/l auf 32g/l und beobachten Sie das Verhalten.



Der höhere Salzgehalt bewirkt ein Ansteigen der Salzkonzentration. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und reduziert den Salzzufluss. Nach einer Einschwingphase schafft es der PI-Regler auch die Störung auszuregeln und den Istwert wieder auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 9:

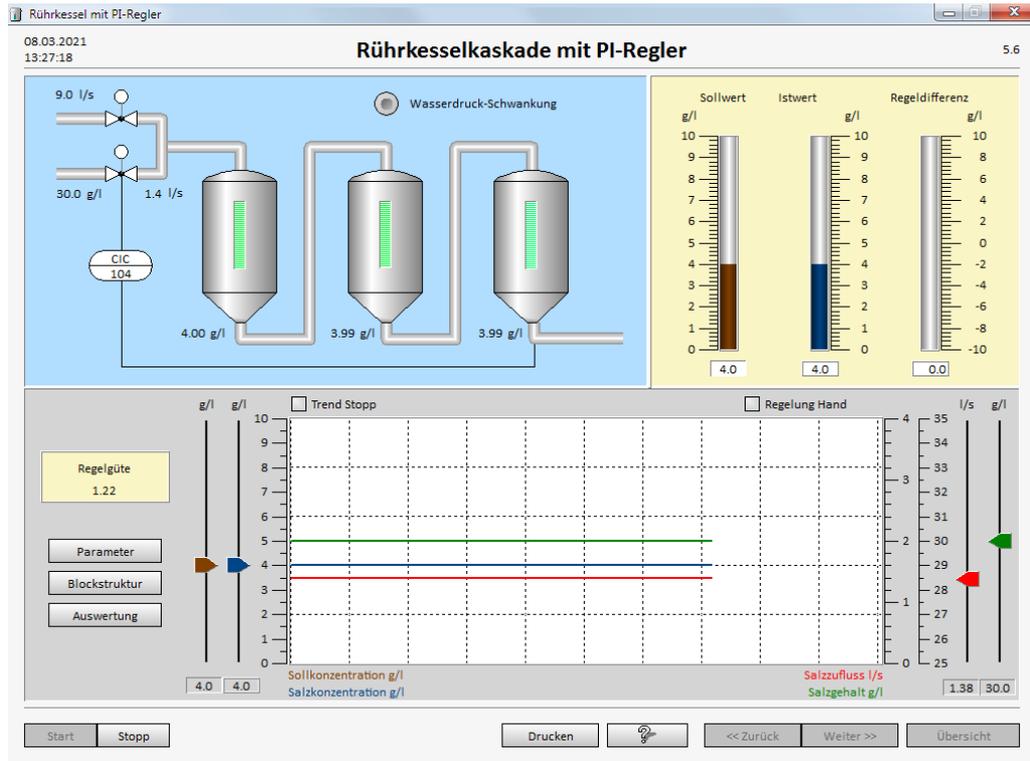
Die mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwingenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl wird, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwingen und der Istwert hat den Sollwert erreicht.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Damit die Regelgüte vergleichbar ist, müssen alle Versuche mit den gleichen Anfangszuständen gestartet werden. Hierfür drücken Sie am besten „Stopp“ und wieder „Start“. Sollkonzentration (Führungsgröße), Salzgehalt (Störgröße) und Salzkonzentration (Regelgröße) erhalten wieder ihre Anfangswerte.

Verändern Sie jetzt die Reglerparameter und verstellen Sie dann den Sollwert auf 4g/l. Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwingen ist.

Mit den Reglerparametern $K = 1$ und $T_i = 50$ wurde eine Regelgüte von 1,23 erreicht.



Mit den Parametern Verstärkung $K = 1,1$ und Nachstellzeit $T_i = 60$ erhält man zum Beispiel eine Regelgüte von 1,22

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- „Stopp“ und „Start“ drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 4g/l stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Info:

Wenn ein I-Anteil (Integrator) im Regler vorhanden ist, schafft es der Regler entweder den Istwert nach einer Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen oder der Regelkreis wird instabil.

Dies erklärt sich durch das Verhalten des Integrators:

Wenn der Wert des Eingangssignals in einen Integrator positiv ist, steigt der Wert des Ausgangssignals (Stellsignal). Ist das Eingangssignal gleich Null, behält der Integrator seinen Ausgangswert (der Wert bleibt konstant). Ist der Eingangswert negativ, nimmt der Ausgangswert des Integrators ab.

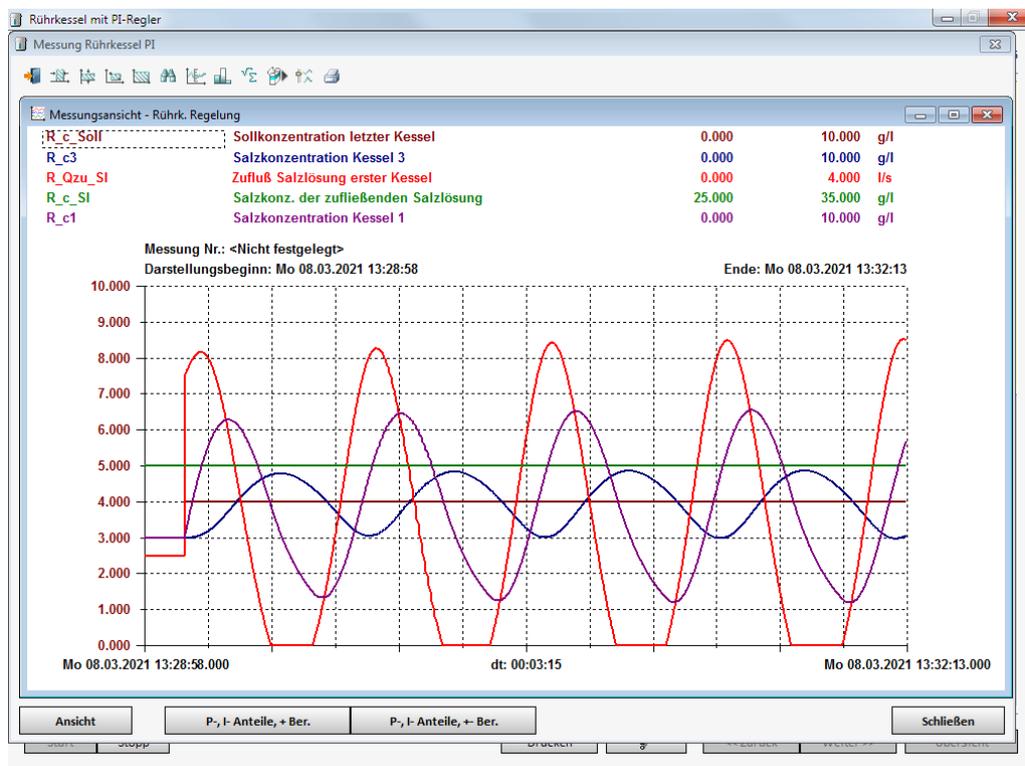
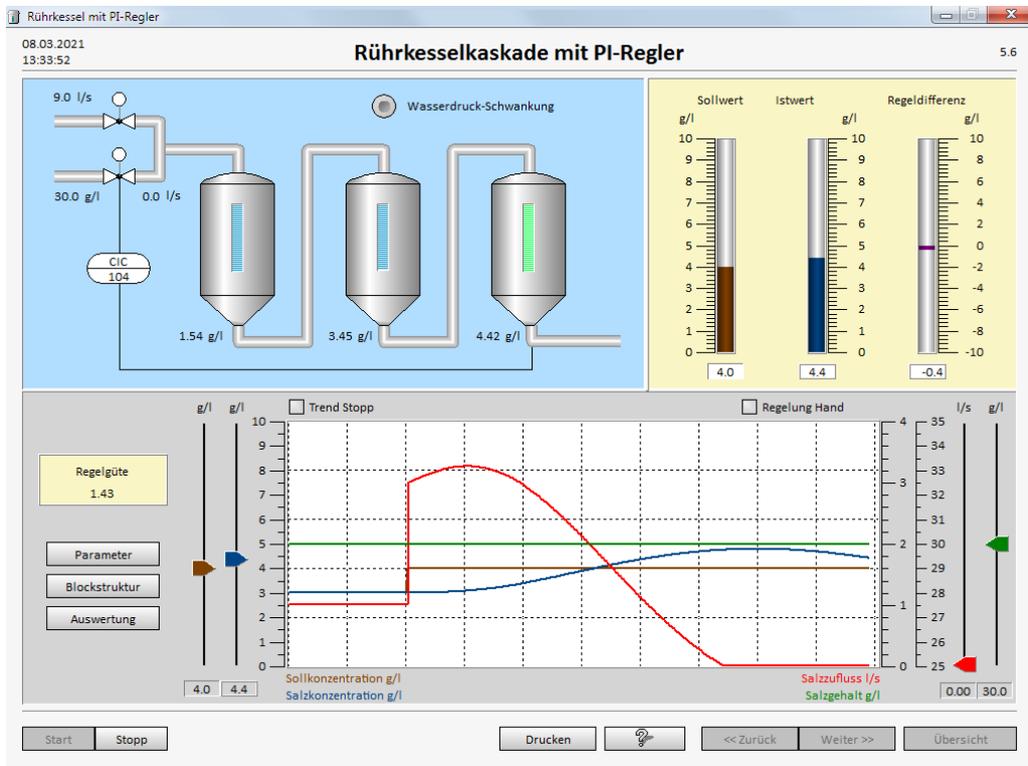
Damit ein Regelkreis auf einen Wert einschwingt, muss das Stellsignal konstant sein (Ausgang des Reglers). Der Ausgangswert eines Integrators ist nur dann konstant, wenn der Eingangswert des Integrators gleich Null ist, also wenn Sollwert und Istwert gleich sind.

Aufgabe 10:

Starten Sie die Rührkesselkaskade mit PI-Regler neu.

Versuchen Sie, die Reglerparameter so einzustellen, dass der Regelkreis instabil wird.

Geben Sie jeweils einen Sollwertsprung von 3g/l auf 4g/l vor.



Dies erreichen Sie z.B. mit den Reglerparametern:

Verstärkung $K_p = 2$ und Nachstellzeit $T_i = 20\text{s}$.

Auch für das Störverhalten wird der Regelkreis mit diesen Parametern instabil.

Als Fazit lässt sich sagen:

- mit dem PI-Regler und entsprechend gut eingestellten Reglerparametern lässt sich der Regelkreis ausregeln, der Istwert erreicht den Sollwert und bleibt auf dem Sollwert.
- Das gilt für das Führungsverhalten wie für das Störverhalten.
- Mit schlecht eingestellten Parametern wird der Regelkreis instabil.

7.2.5 Regelung mit PID-Regler

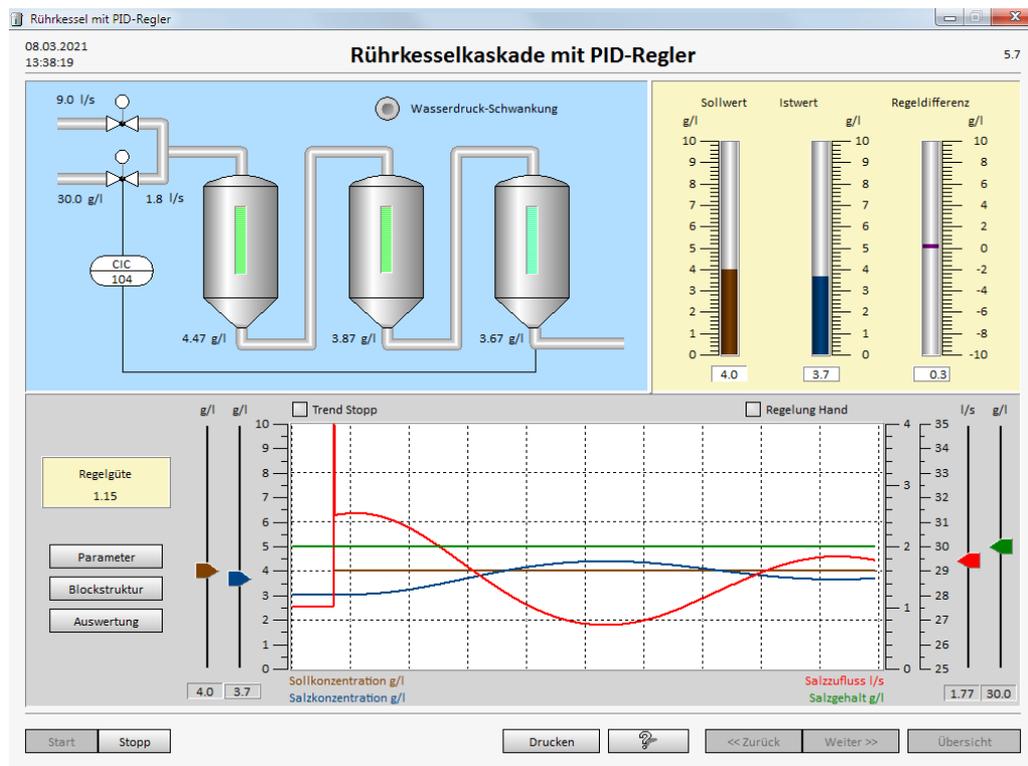
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.7 „Regelung mit PID-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 11:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern: Verstärkung $K = 1,5$, Nachstellzeit $T_i = 50$, Vorhaltezeit $T_d = 1$

Ändern Sie den Sollwert auf 4g/l.



Der Regelkreis fängt leicht an zu schwingen und geht nach einer langen Zeitspanne in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals (Salzzufluss). Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Die Regelgüte geht auf 1,27 und ist damit größer als beim PI-Regler mit den Parametern $K = 1$ und $T_i = 50$.

Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

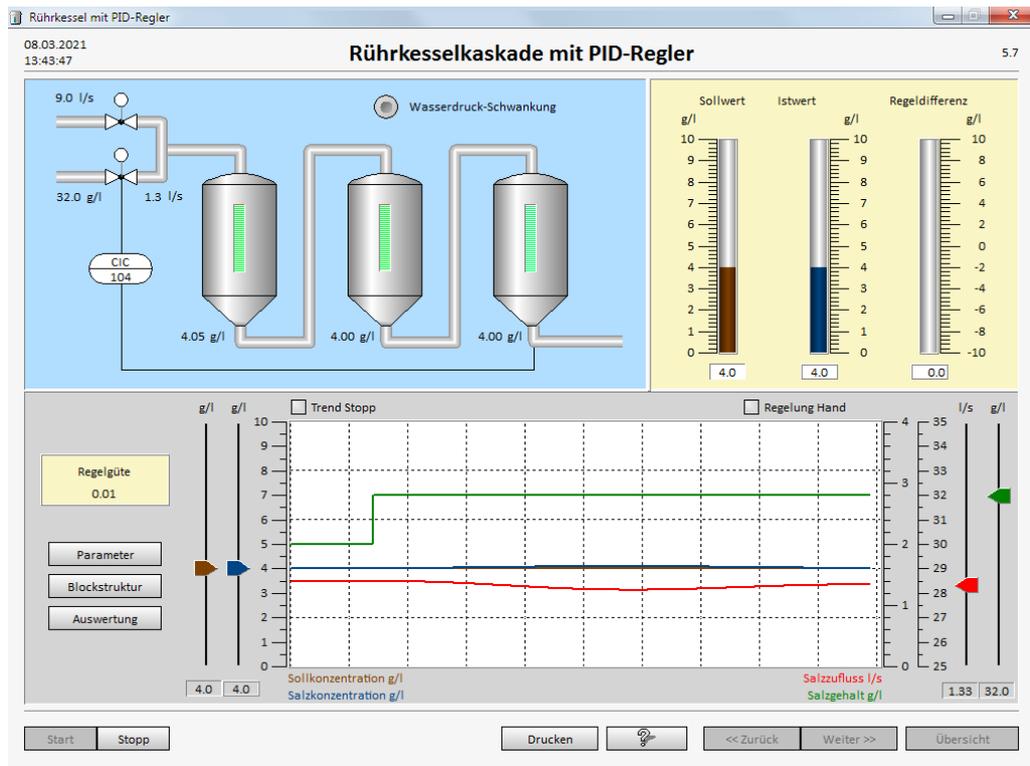
In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

Aufgabe 12:

Untersuchen Sie das Störverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 1,5$, Nachstellzeit $T_i = 50$, Vorhaltezeit $T_d = 1$

Lassen Sie das System auf die Sollkonzentration 4g/l einschwingen (die Salzkonzentration erreicht 4g/l und verändert sich nicht mehr). Ändern Sie den Salzgehalt im Zufluss von 30g/l auf 32g/l. Beobachten Sie das Verhalten.



Das Störverhalten wird mit den vorgegebenen Reglerparametern gut ausgegelt. Die Salzkonzentration (Regelgröße) erreicht nach einer Zeitspanne wieder die Sollkonzentration (Führungsgröße).

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

7.3 Strecke untersuchen

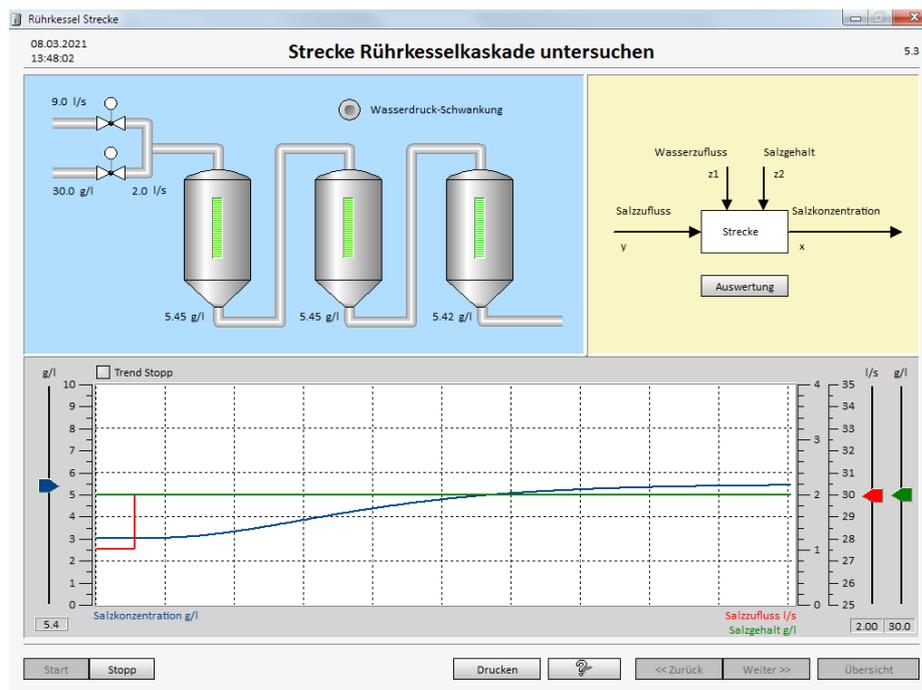
Wählen Sie den Punkt 5.3 „Strecke untersuchen“.

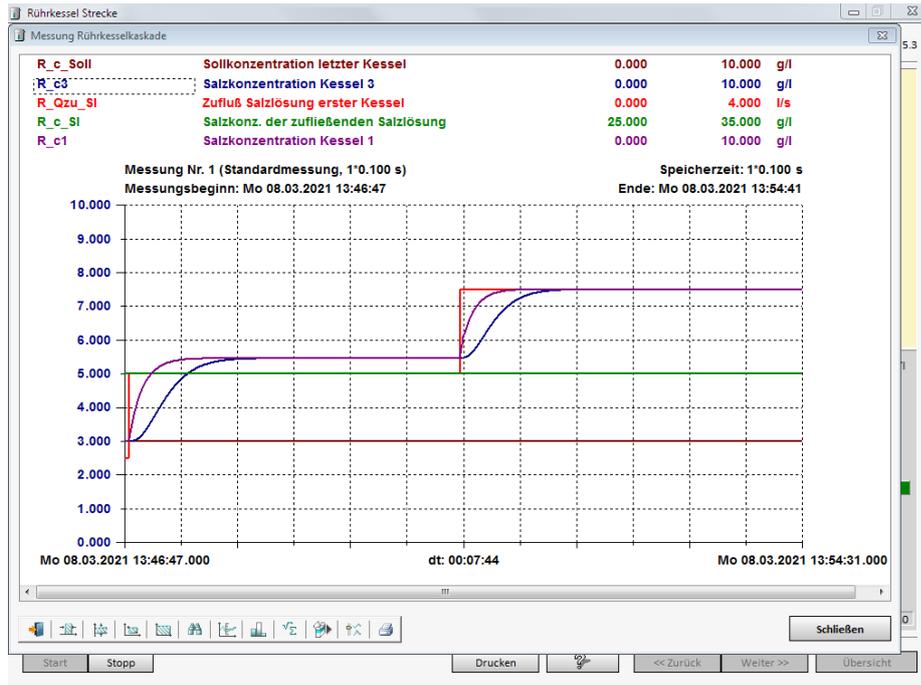
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 13:

Erhöhen Sie den Salzzufluss auf 2l/s und warten Sie bis die Salzkonzentration sich nicht mehr ändert. Verändern Sie dann den Salzzufluss auf 3l/s.

Beobachten Sie das Verhalten der Konzentration.



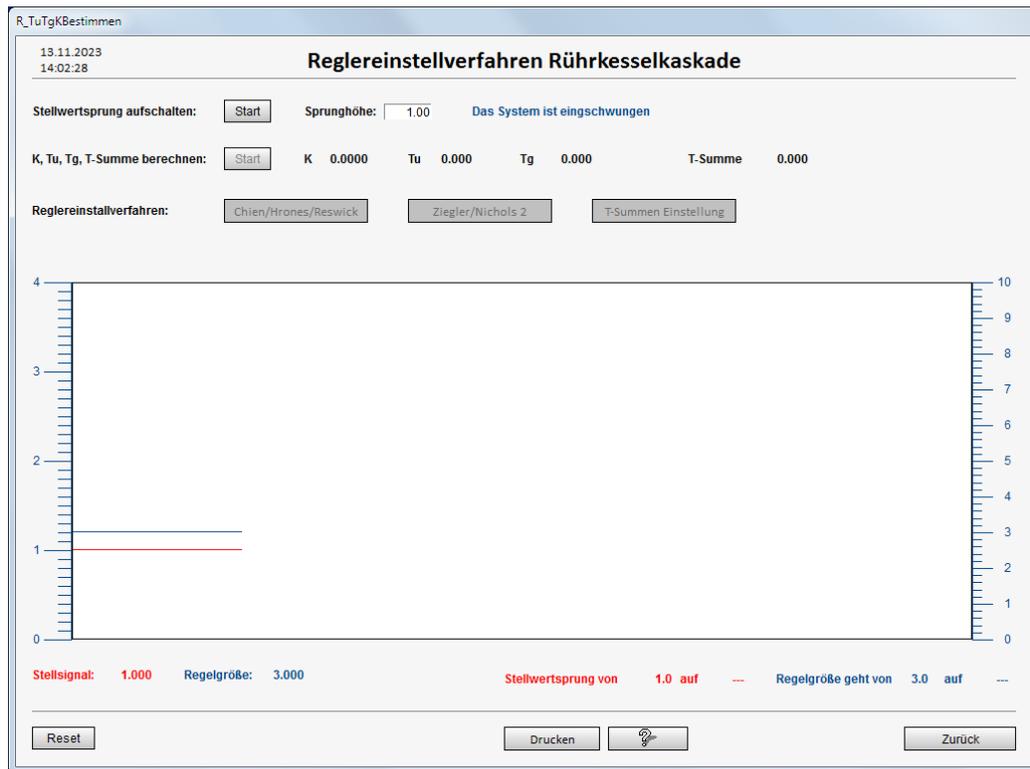


Wie aus den aufgezeichneten Daten zu ersehen ist, ist das Streckenverhalten bei den Sprüngen unterschiedlich. Die Salzkonzentration verändert sich beim Sprung des Salzzufusses von 1l/s auf 2l/s von 3g/l auf 5,5g/l (Differenz ist 2,5g/l). Beim Sprung des Salzzufusses von 2l/s auf 3l/s ändert sich die Salzkonzentration von 5,5g/l auf 7,5g/l (Differenz ist 2g/l).

Bei dieser Regelstrecke ist das Verhalten abhängig vom Arbeitspunkt. Das bedeutet, die Regelungen werden sich bei gleichem Regler und gleichen Reglerparametern in verschiedenen Arbeitspunkten (z.B. Salzzufuss = 2l/s oder = 3l/s) unterschiedlich verhalten.

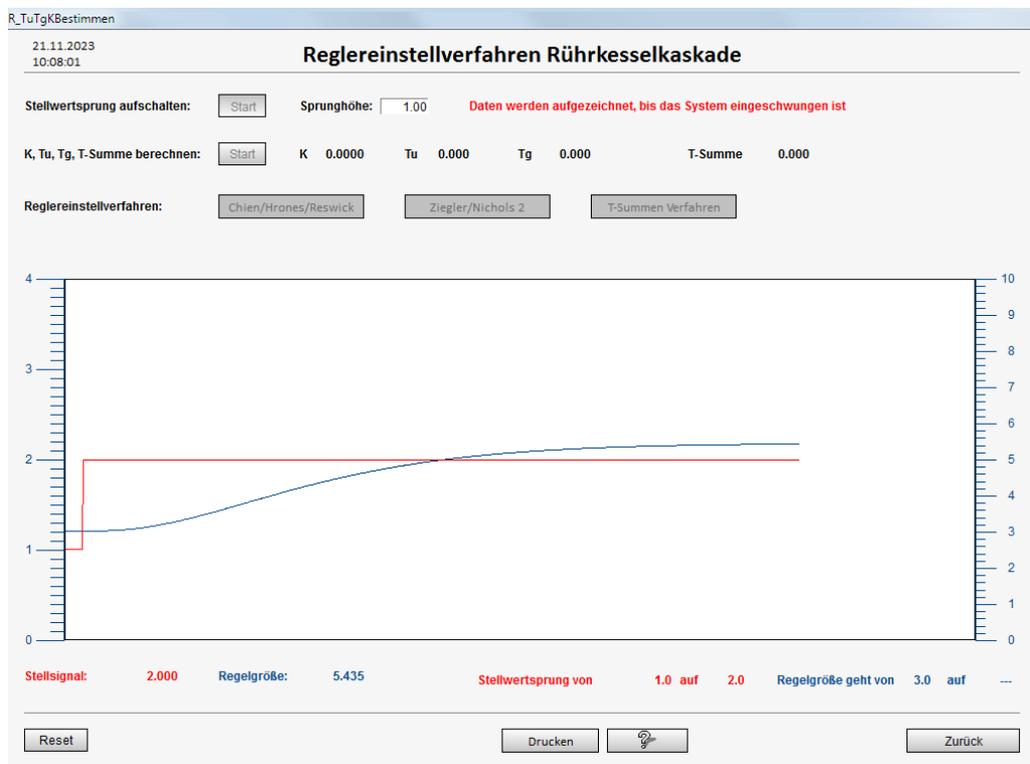
7.3.1 Reglereinstellverfahren, Erstellen der Tabellen von Reglereinstellverfahren

Hier haben Sie die Möglichkeit, einen Stellwertsprung aufzuschalten, automatisch die Parameter K (Verstärkung), T_u (Verzugszeit), T_g (Ausgleichszeit) und T-Summe (Summenzeitkonstante) zu berechnen und mithilfe dieser Parameter automatisch die Tabellen für die Reglereinstellverfahren nach „Chien/Hrones/Reswick“, „Ziegler Nichols 2“ und „T-Summen-Verfahren“ zu generieren.



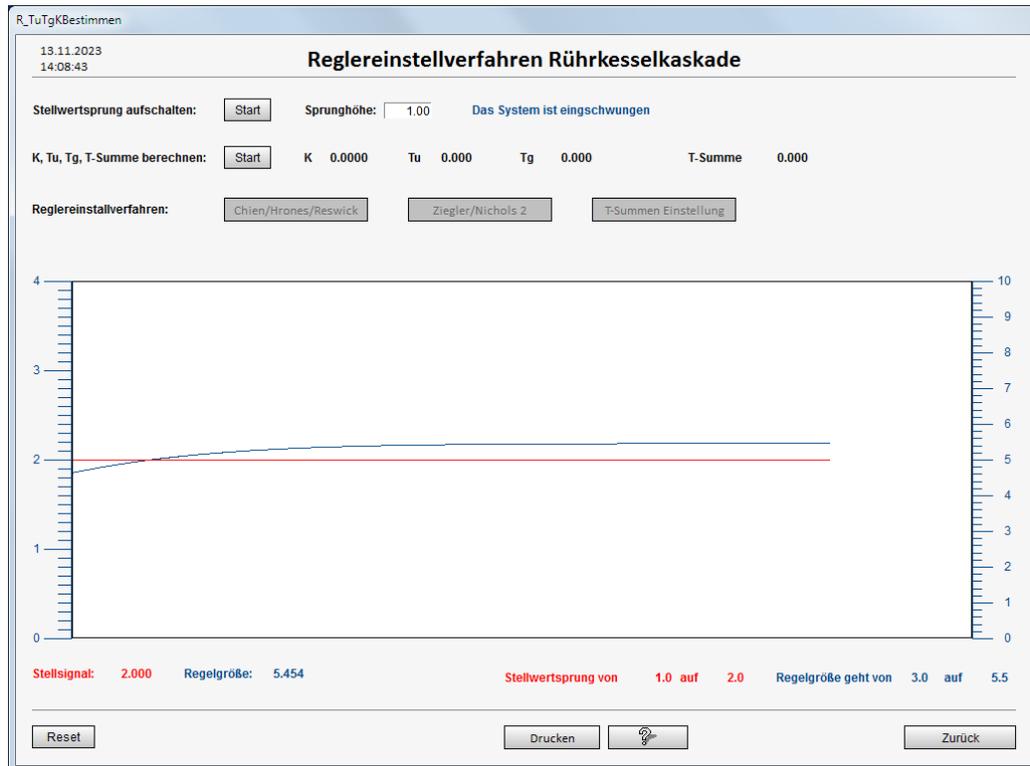
Aufgabe 28:

Tragen Sie bei „Sprunghöhe“ den Wert 1 ein und drücken Sie auf „Start“ bei „Stellwertsprung aufschalten“.



Es wird ein Stellwertsprung mit der bei „Sprunghöhe“ eingestellten Sprunghöhe von 1 aufgeschaltet, d.h. der Salzzufluss wird auf 2 l/s erhöht.

Warten Sie bis das System eingeschwungen ist. Die Meldung „Das System ist eingeschwungen“ wird angezeigt.



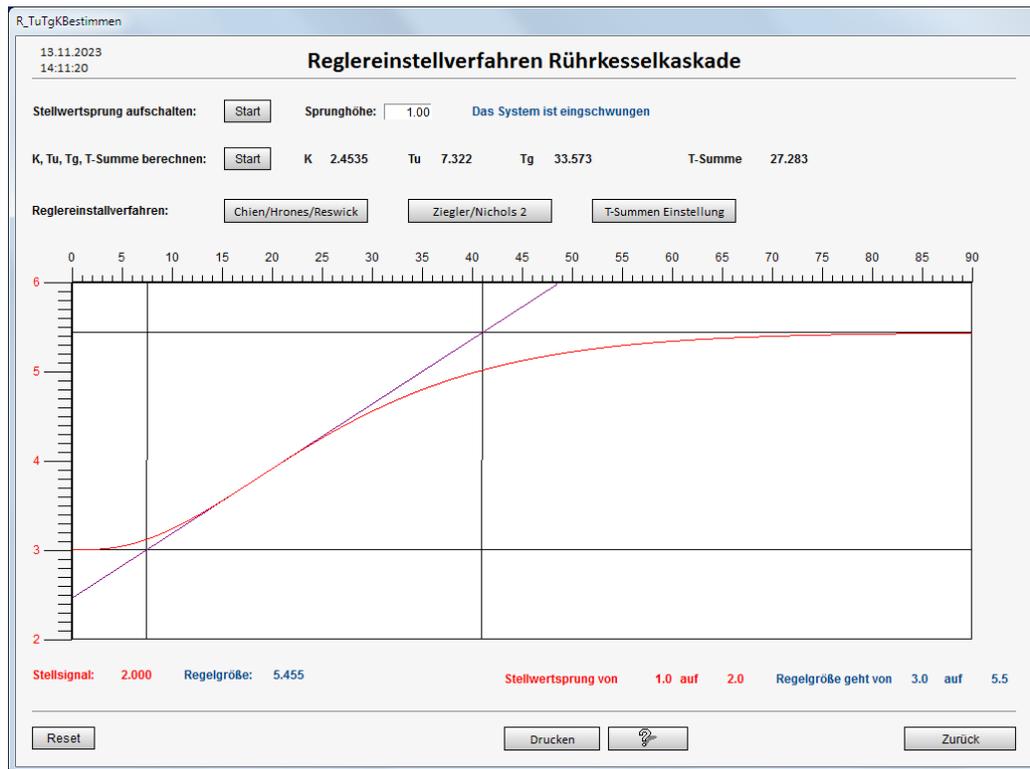
Sie haben jetzt die Möglichkeit, die Parameter K, Tu, Tg und T-Summe berechnen zu lassen durch Drücken des Buttons neben „K, Tu, Tg, T-Summe berechnen“.

Aufgabe 29:

Lassen Sie sich die Parameter berechnen durch Drücken auf „Start“ bei „K, Tu, Tg, T-Summe berechnen“.

Es wird eine Seite ausgegeben, in der die berechneten Werte angezeigt werden.

Zusätzlich werden in einer Grafik die Tangente der Sprungantwort im Wendepunkt, die unteren und oberen Werte der Sprungantwort sowie die Schnittpunkte der Tangente mit den unteren und oberen Werten der Sprungantwort dargestellt. Aus dieser Grafik werden die Parameter automatisch berechnet.



Sie haben jetzt die Möglichkeit, die Tabellen für die drei Reglereinstellverfahren auszugeben.

Aufgabe 30:

Schauen Sie sich die Tabellen für die einzelnen Reglereinstellverfahren an und speichern Sie diese oder Drucken Sie sie aus.

In dem folgenden Kapitel „7.4 Reglereinstellverfahren“ wird das Reglereinstellverfahren von Chien/Hrones/Reswick beschrieben. Die Vorgehensweise zur Berechnung der Parameter K , T_u und T_g per Hand aus den aufgezeichneten Messdaten wird beschrieben.

TabelleCHR

Reglereinstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick

K = 2.45 Tu = 7.3 Tg = 33.6

Regler	aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20% Überschwingen	
	Störung	Führung	Störung	Führung
P-Regler	$K_p = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 0.56$	$K_p = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 0.56$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.31$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.31$
PI-Regler	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.12$ $T_n = 4,0 \cdot T_u = 29.29$	$K_p = \frac{0,35 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 0.65$ $T_n = 1,2 \cdot T_g = 40.29$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.31$ $T_n = 2,3 \cdot T_u = 16.84$	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.12$ $T_n = 1,0 \cdot T_g = 33.57$
PID-Regler	$K_p = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.78$ $T_n = 2,4 \cdot T_u = 17.57$ $T_v = 0,42 \cdot T_u = 3.08$	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.12$ $T_n = 1,0 \cdot T_g = 33.57$ $T_v = 0,5 \cdot T_u = 3.66$	$K_p = \frac{1,2 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 2.24$ $T_n = 2,0 \cdot T_u = 14.64$ $T_v = 0,42 \cdot T_u = 3.08$	$K_p = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.78$ $T_n = 1,35 \cdot T_g = 45.32$ $T_v = 0,47 \cdot T_u = 3.44$

Stellwertsprung 1.0 auf 2.0 Regelgröße geht von 3.0 auf 5.5 Drucken Schließen

TabelleZN2

Reglereinstellregeln nach Ziegler/Nichols 2

K = 0.59 Tu = 1.4 Tg = 16.6

P-Regler	PI-Regler	PID-Regler
$K_p = \frac{1,0 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 19.94$	$K_p = \frac{0,9 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 11.97$ $T_n = 0,33 \cdot T_u = 0.46$	$K_p = \frac{1,2 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 23.93$ $T_n = 2,0 \cdot T_u = 2.81$ $T_v = 0,5 \cdot T_u = 0.70$

Stellwertsprung 0.0 auf 10.0 Regelgröße geht von 20.0 auf 25.9 Drucken Schließen

TabelleTSumme

Reglereinstellregeln nach T-Summenregel

Ks = 0.59 T-Summe = 12.7

Regler	normales Einschwingen	schnelles Einschwingen
PI-Regler	$K_p = \frac{0,5}{K_s} = 0.84$ $T_n = 0,5 \cdot T_{summe} = 6.33$	$K_p = \frac{1,0}{K_s} = 1.69$ $T_n = 0,7 \cdot T_{summe} = 8.86$
PID-Regler	$K_p = \frac{1,0}{K_s} = 1.69$ $T_n = 0,66 \cdot T_{summe} = 8.36$ $T_v = 0,167 \cdot T_{summe} = 2.11$	$K_p = \frac{2,0}{K_s} = 3.38$ $T_n = 0,8 \cdot T_{summe} = 10.13$ $T_v = 0,194 \cdot T_{summe} = 2.46$

Stellwertsprung 0.0 auf 10.0 Regelgröße geht von 20.0 auf 25.9 Drucken Schließen

Aufgabe 31:

Nehmen Sie die Reglerparameter aus den Tabellen und vergleichen Sie sie mit den im Kapitel 6.4 per Hand bestimmten Reglerparametern für das Verfahren von Chien/Hrones/Reswick.

Die per Hand aus den aufgezeichneten Messdaten bestimmten Parameter entsprechen den automatisch bestimmten Parametern aus der Tabelle.

Aufgabe 32:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten und das Störverhalten mit den in den Tabellen vorgeschlagenen Reglerparametern.

Auch hier zeigt sich, dass das Führungsverhalten mit den Parameter von Ziegler/Nichols 2 nicht geeignet ist.

Auch sind die Parameter von Ziegler/Nichols 2 nicht geeignet zum Ausregeln von Störungen. Das System kann mit den Parametern instabil werden.

Da bei der Strecke „Rührkesselkaskade“ das Verhalten des Systems abhängig vom Arbeitspunkt ist, erhält man unterschiedliche Reglerparameter, abhängig vom gewählten Arbeitspunkt.

Die oben dargestellten Tabellen wurden bestimmt durch einen Sprung des Salzzuflusses von 1l/s auf 2l/s (Stellwertsprung).

Gibt man einen Stellwertsprung von 2l/s auf 3l/s vor, so ergibt sich folgende Tabelle:

Reglereinstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick				
K = 2.04 Tu = 6.7 Tg = 30.8				
Regler	aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20% Überschwingen	
	Störung	Führung	Störung	Führung
P-Regler	$K_p = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 0.67$	$K_p = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 0.67$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.57$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.57$
PI-Regler	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.35$ $T_n = 4,0 \cdot T_u = 26.84$	$K_p = \frac{0,35 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 0.79$ $T_n = 1,2 \cdot T_g = 36.93$	$K_p = \frac{0,7 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.57$ $T_n = 2,3 \cdot T_u = 15.43$	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.35$ $T_n = 1,0 \cdot T_g = 30.77$
PID-Regler	$K_p = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 2.13$ $T_n = 2,4 \cdot T_u = 16.11$ $T_v = 0,42 \cdot T_u = 2.82$	$K_p = \frac{0,6 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 1.35$ $T_n = 1,0 \cdot T_g = 30.77$ $T_v = 0,5 \cdot T_u = 3.36$	$K_p = \frac{1,2 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 2.69$ $T_n = 2,0 \cdot T_u = 13.42$ $T_v = 0,42 \cdot T_u = 2.82$	$K_p = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_s \cdot T_u} = 2.13$ $T_n = 1,35 \cdot T_g = 41.55$ $T_v = 0,47 \cdot T_u = 3.15$

Stellwertsprung 2.0 auf 3.0 Regelgröße geht von 5.5 auf 7.5 Drucken Schließen

Die vorgeschlagenen Reglerparameter unterscheiden sich von den Reglerparametern beim Stellwertsprung von 1l/s auf 2l/s.

Dies verdeutlicht, dass das Verhalten von Regelkreisen vielfach vom Arbeitspunkt anhängig ist und dass abhängig vom Arbeitspunkt unterschiedliche Parameter sinnvoll sein können.

7.4 Reglereinstellverfahren

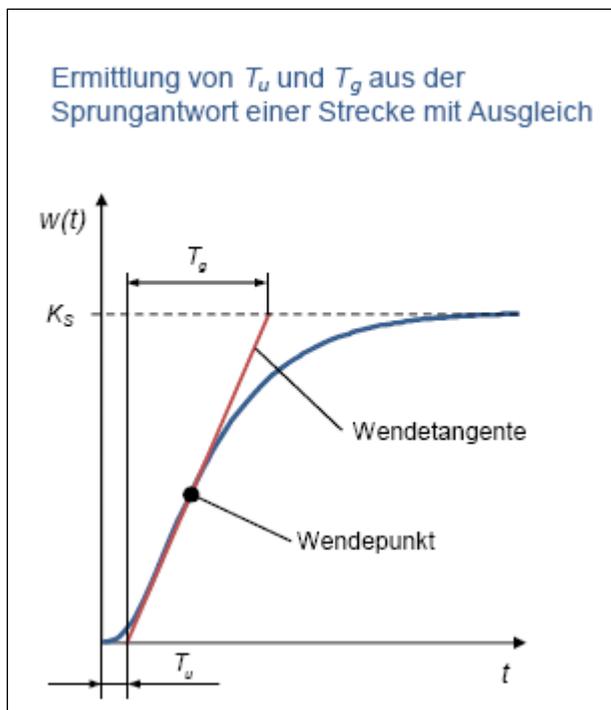
Die Rührkesselkaskadenstrecke ist eine Strecke mit Ausgleich.

Eine Strecke mit Ausgleich schwingt nach einer endlichen Zeit bei einer sprungartigen Änderung des Eingangswertes des Systems (Stellwert) auf einen konstanten Ausgangswert (Regelgröße) ein, während bei einer Strecke ohne Ausgleich die Regelgröße (Istwert) immer weiter steigt.

Das Verhalten des Salzgehalts im dritten Behälter ist eine Strecke mit Ausgleich, da bei einer sprungartigen Veränderung des Salzzuflusses die Salzkonzentration nach einer Zeitspanne wieder einen festen Wert annimmt (konstante Salzkonzentration), wie unter Punkt 7.3 zu sehen war.

Als Reglereinstellverfahren soll das Verfahren nach Chien/Hrones/Reswick für Strecken mit Ausgleich genutzt werden.

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



Aus dieser Sprungantwort müssen die Parameter K_S , T_g und T_u bestimmt werden. 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.

Es bedeuten:

$T_e = T_u =$ Verzugszeit

$T_b = T_g =$ Ausgleichszeit

K_S = Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich

Mithilfe dieser drei Parameter lassen sich dann die Reglerparameter aus der Einstelltabelle nach Chien/Hrones/Reswick bestimmen:

Tabelle 5: Gleichungen zur Berechnung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick

Reglerverhalten	Gütekriterium			
	Mit 20 % Überschwingung		Aperiodischer Regelvorgang	
	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.

Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg

Aufgabe 14:

Wählen Sie bei der Rührkesselkaskade den Punkt 5.3 „Strecke untersuchen“.

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

Alle Signalverläufe werden gespeichert und können über „Auswertung“ ausgewertet und ausgemessen werden.

Bestimmen Sie die Parameter K_S , T_e (T_U) und T_b (T_g) aus den gespeicherten Signalverläufen.

Hierfür müssen Sie die aufgezeichneten Signalverläufe auswerten. Durch Klick auf die Schaltfläche „Auswertung“ erhalten Sie die Messkurven.

Mithilfe der unten angezeigten Buttonleiste im Fenster lassen sich Zeit- und Wertausschnitte wählen (Zoomen).



Versuchen Sie den für die Auswertung interessanten Bereich mit dem Sprung des Salzzuflusses und dem Einschwingen der Salzkonzentration einzustellen.

Sie können auch das Diagramm ausdrucken und die Kurven mithilfe eines Lineals ausmessen, um T_e und T_b zu bestimmen.

Es ist auch möglich, die Werte aus dem Diagramm zu bestimmen.

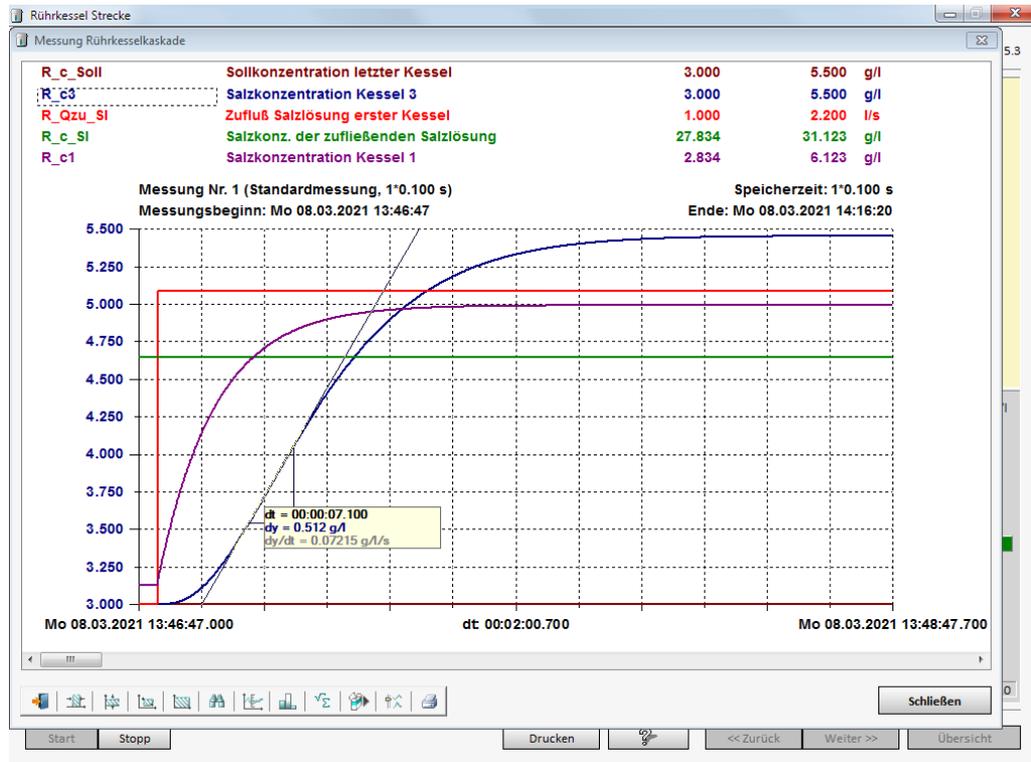


Abbildung 7-1: Signalverlauf für die Salzkonzentration

Klicken Sie auf das blaue Signal „R_c3“ (Salzkonzentration im 3. Behälter). Durch Klicken auf die blaue Kurve werden der zugehörige Messwert und der Zeitpunkt angezeigt. Durch Festhalten und Ziehen erhalten Sie die Zeit- und Wertedifferenz sowie die Steigung. Versuchen Sie, die Steigung der blauen Kurve im Wendepunkt zu bestimmen.

Aus dem oben dargestellten Kurvenverlauf lässt sich die Steigung der Tangente im Wendepunkt ungefähr ablesen $dx/dt = 0,072g/l/s$

Nach der sprunghaftigen Änderung des Salzzuflusses von 1g/l auf 2g/l geht die Salzkonzentration nach der Einschwingphase von 3g/l auf 5,5g/l.

Damit kann die Ausgleichszeit T_g berechnet werden:

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

$$T_g = (\text{Endwert} - \text{Anfangswert}) / (dx/dt) = (5,5g/l - 3g/l) / 0,072g/l/s = 34,7s$$

K_s ergibt sich aus:

$$K_s = (\text{Endwert} - \text{Anfangswert}) / \text{Sprunghöhe} = (5,5 - 3) / 1 = 2,5$$

Die Verzugszeit T_u für die Strecke lässt sich aus dem ersten Diagramm ausmessen und ist ungefähr 7,3s.

Also: $T_e = T_u = 7,3s$ $T_b = T_g = 34,7s$ $K_s = 2,5$

Damit ergeben sich für die Strecke aus der Tabelle folgende Reglerparameter für den PI-Regler:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 1,14$$

$$T_n = T_b \quad 34,70$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 0,67$$

$$T_n = 1,2 \cdot T_b \quad 41,64$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 1,33$$

$$T_n = 2,3 \cdot T_e \quad 16,79$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 1,14$$

$$T_n = 4 \cdot T_e \quad 29,20$$

Für den PID-Regler ergeben sich laut Tabelle folgende Parameter:

PID-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 1,81$$

$$T_n = 1,35 \cdot T_b \quad 46,85$$

$$T_d = 0,47 \cdot T_e \quad 3,43$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 1,14$$

$$T_n = T_b \quad 34,70$$

$$T_d = 0,5 \cdot T_e \quad 3,65$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 1,2 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 2,28$$

$$T_n = 2 \cdot T_e \quad 14,60$$

$$T_d = 0,42 \cdot T_e \quad 3,07$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e) \quad 1,81$$

$$T_n = 2,4 \cdot T_e \quad 17,52$$

$$T_d = 0,42 \cdot T_e \quad 3,07$$

Aufgabe 15:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten und das Störverhalten für die Rührkesselkaskade mit den nach Chien/Hrones/Reswick bestimmten Parametern für den PI-Regler und den PID-Regler.

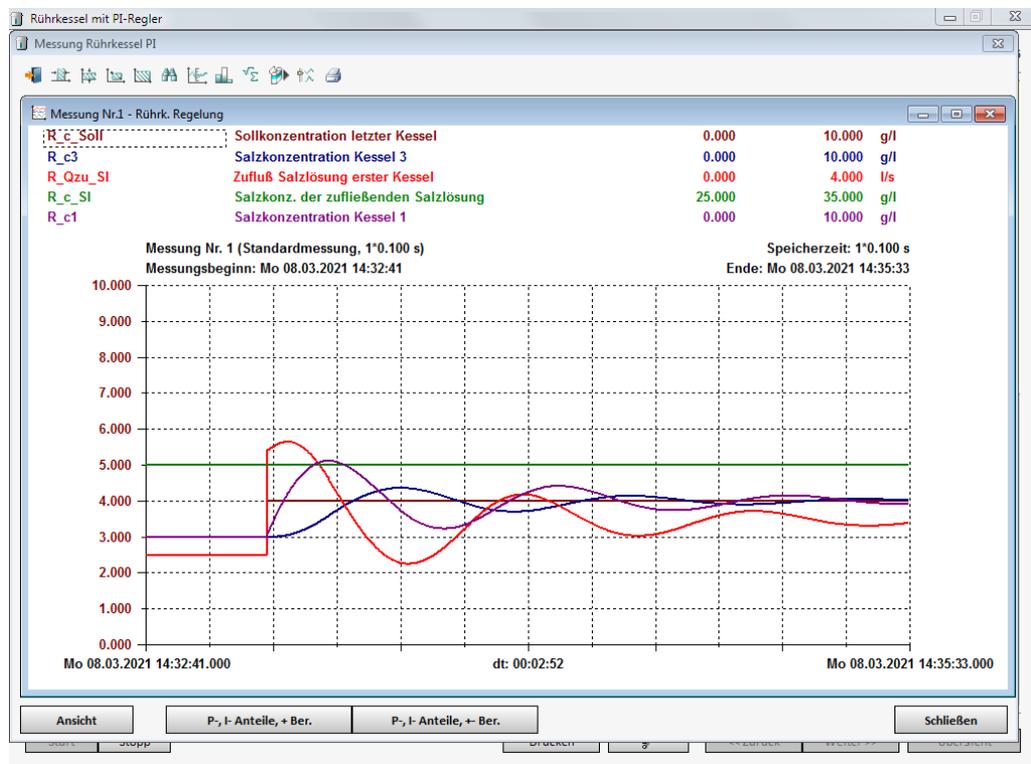
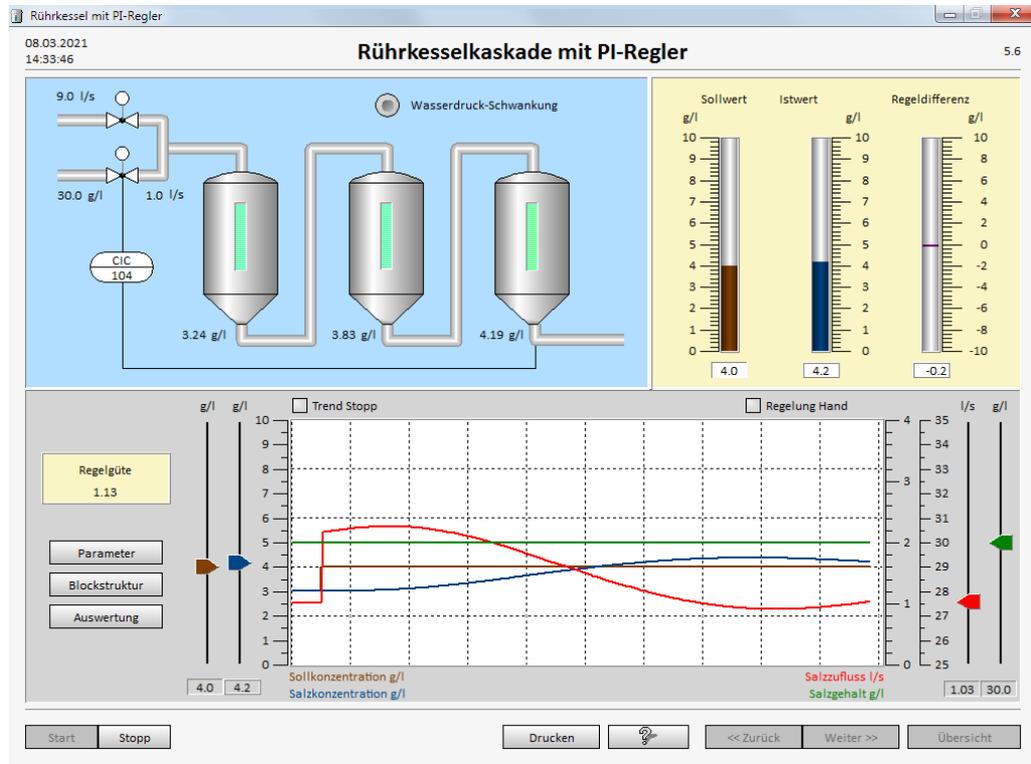


Abbildung 7-2: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen / Führungssprung Sollkonzentration von 3g/l auf 4g/l.

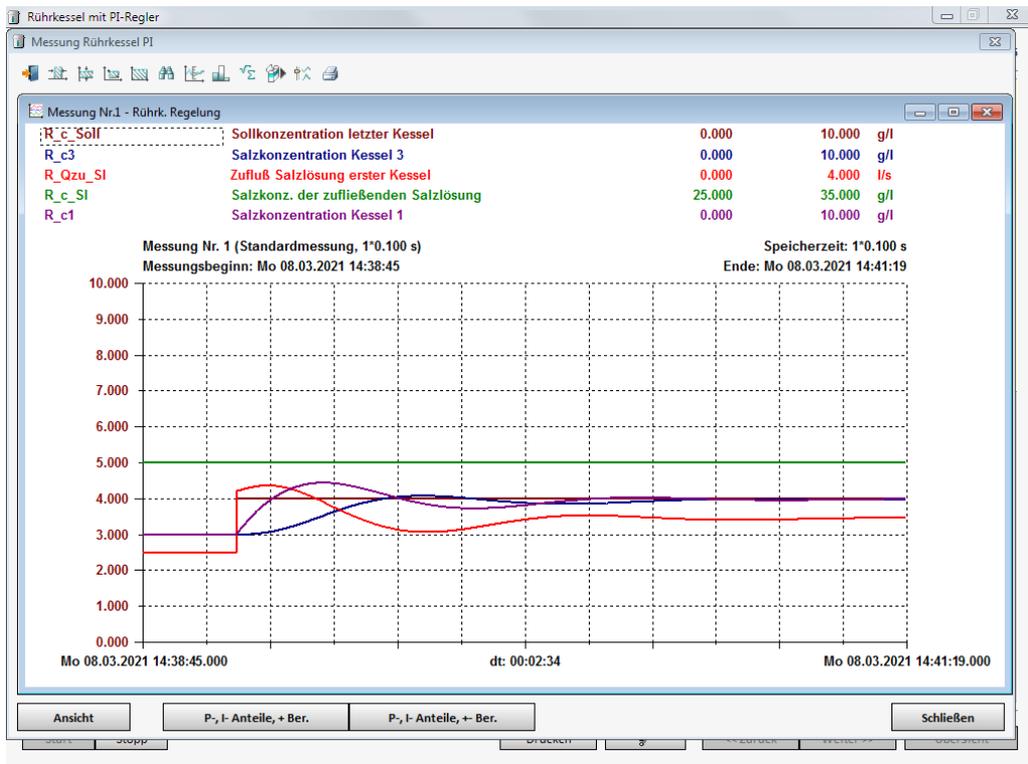
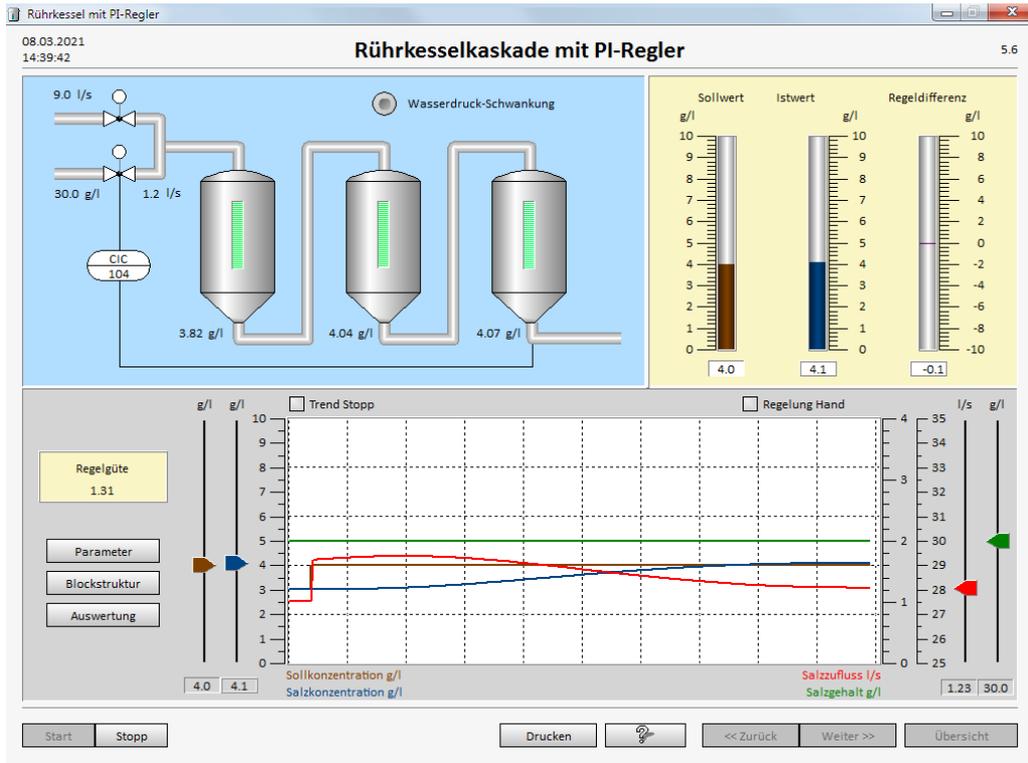


Abbildung 7-3: Führungsverhalten aperiodisch / Führungssprung der Salzkonzentration von 3g/l auf 4g/l.

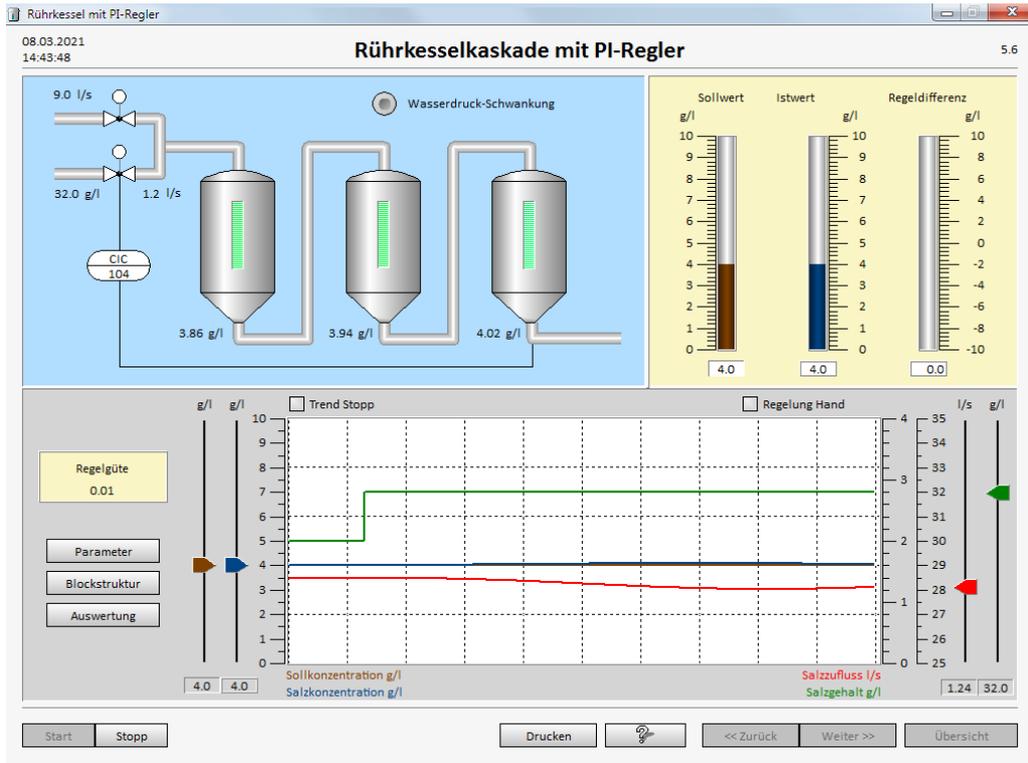
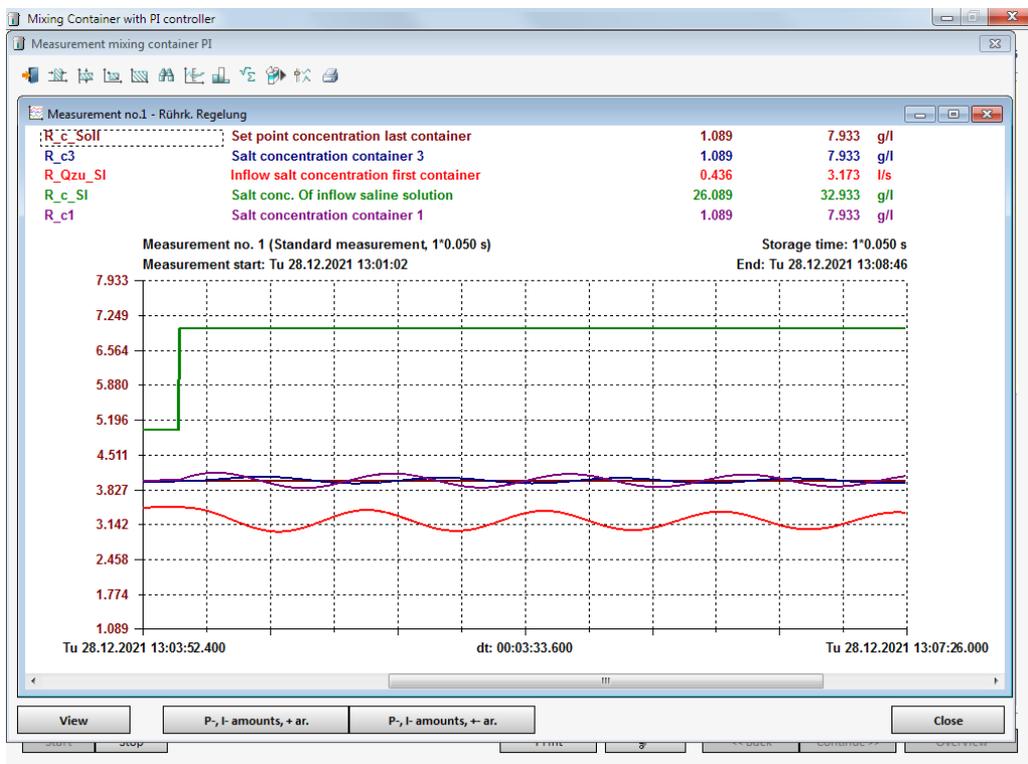


Abbildung 7-4: Störverhalten mit 20% Überschwingen / Sprung des Salzgehalts im Zufluss von 30l/s auf 32l/s.



Die Störung wird mit diesen Parametern nicht ausgegelt.

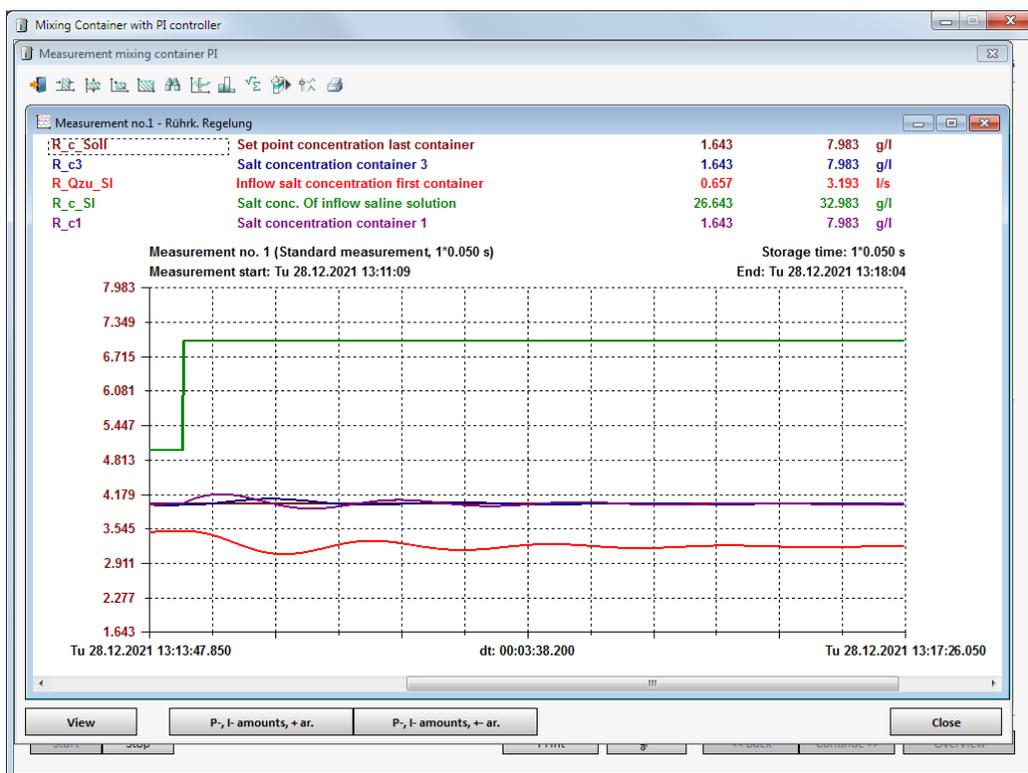
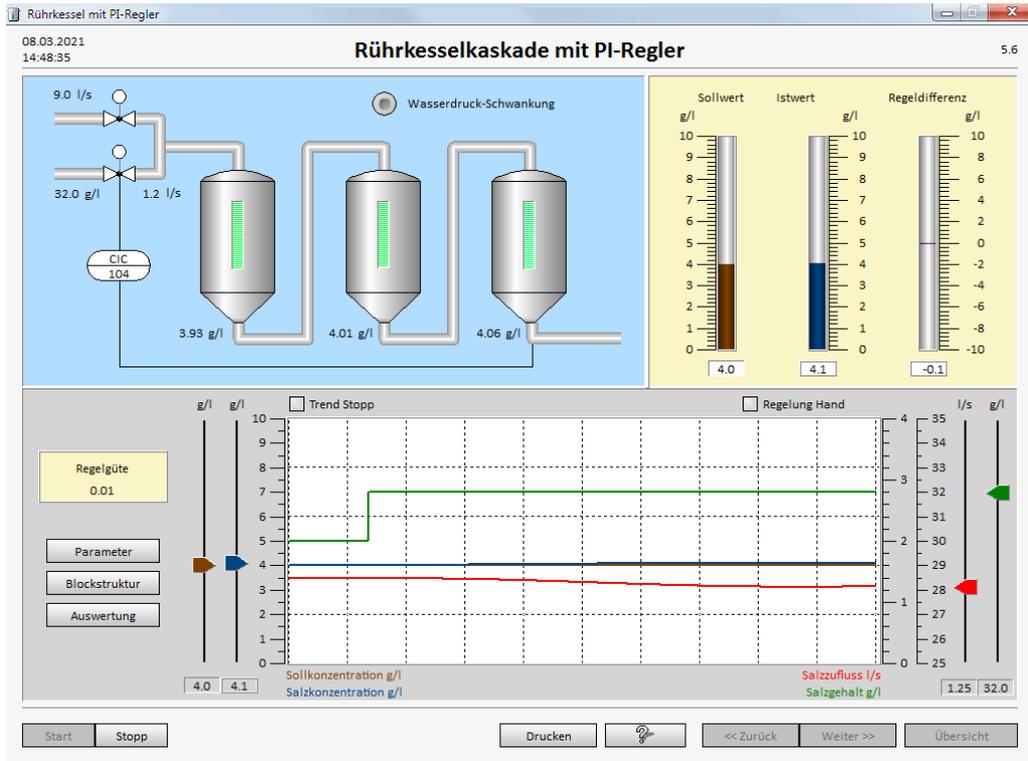


Abbildung 7-5: Störverhalten aperiodisch / Sprung des Salzgehalts im Zufluss von 30l/s auf 32l/s.

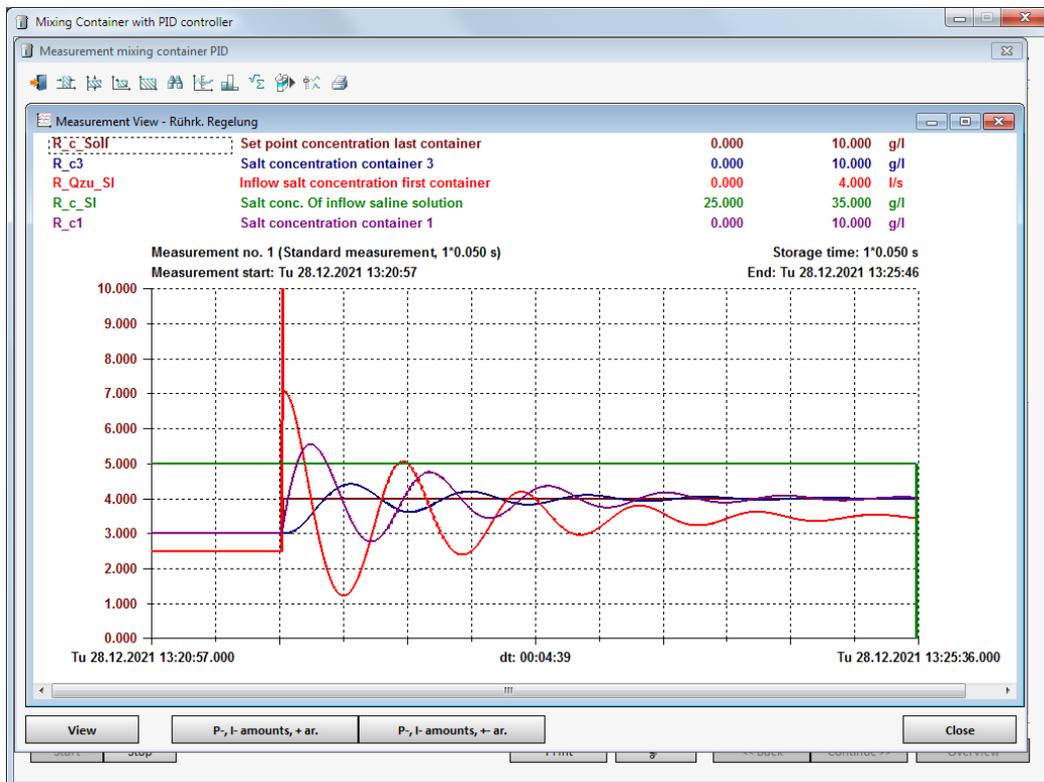
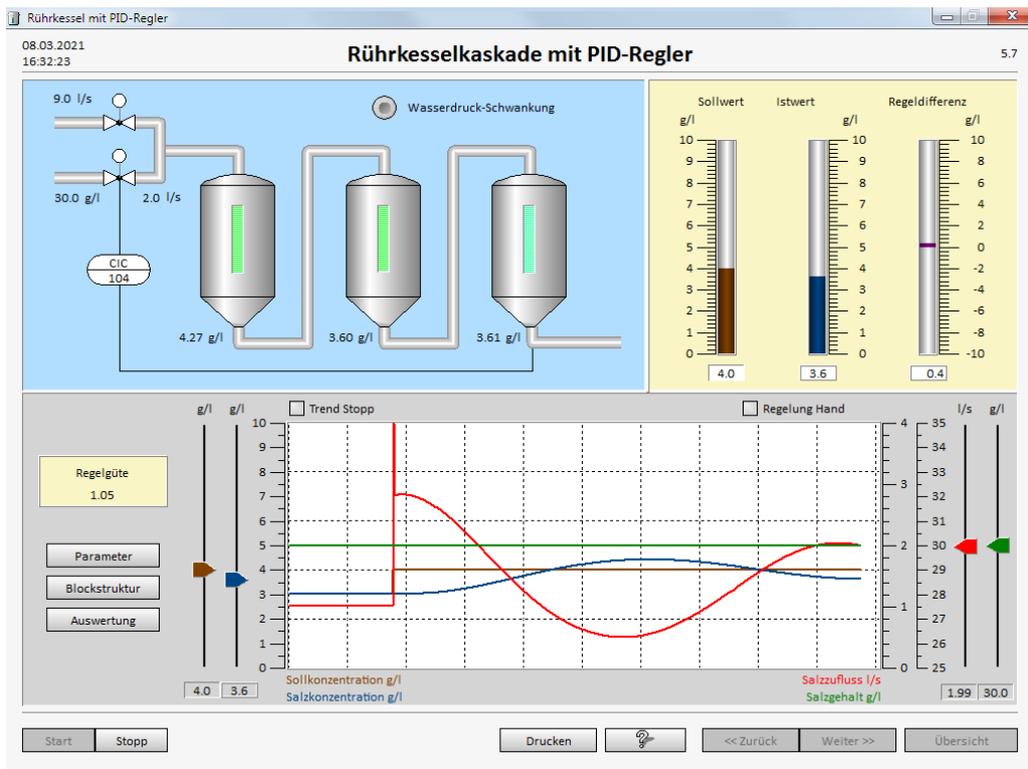


Abbildung 7-6: Führungsverhalten mit 20% Überschwngen / Führungssprung der Sollkonzentration von 3g/l auf 4g/l.

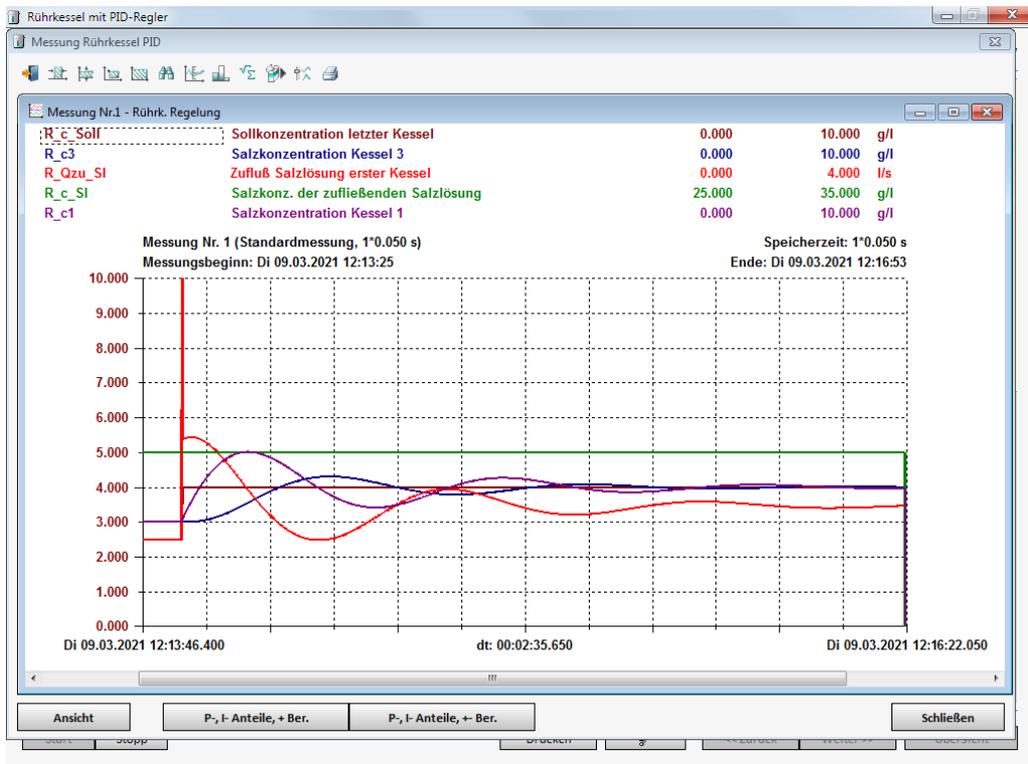
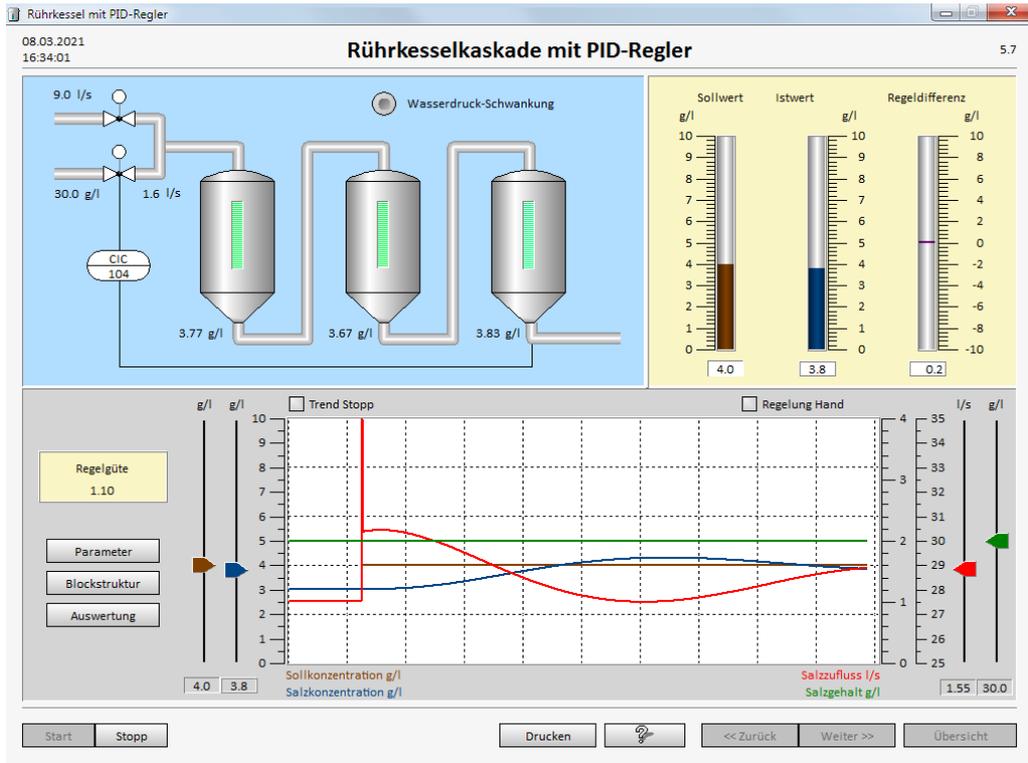


Abbildung 7-7: Führungsverhalten aperiodisch

Hier ist das Reglereinstellverfahren von Chien/Hrones/Reswick nicht gut geeignet, da die berechneten Parameter kein aperiodisches Einschwingen bewirken.

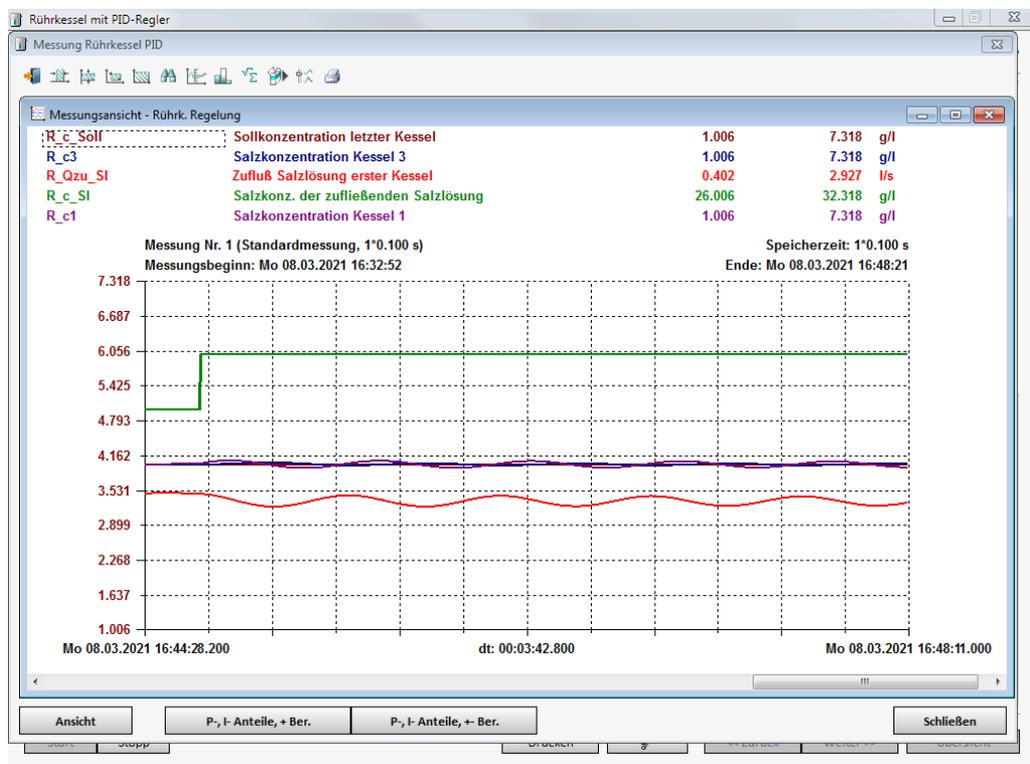
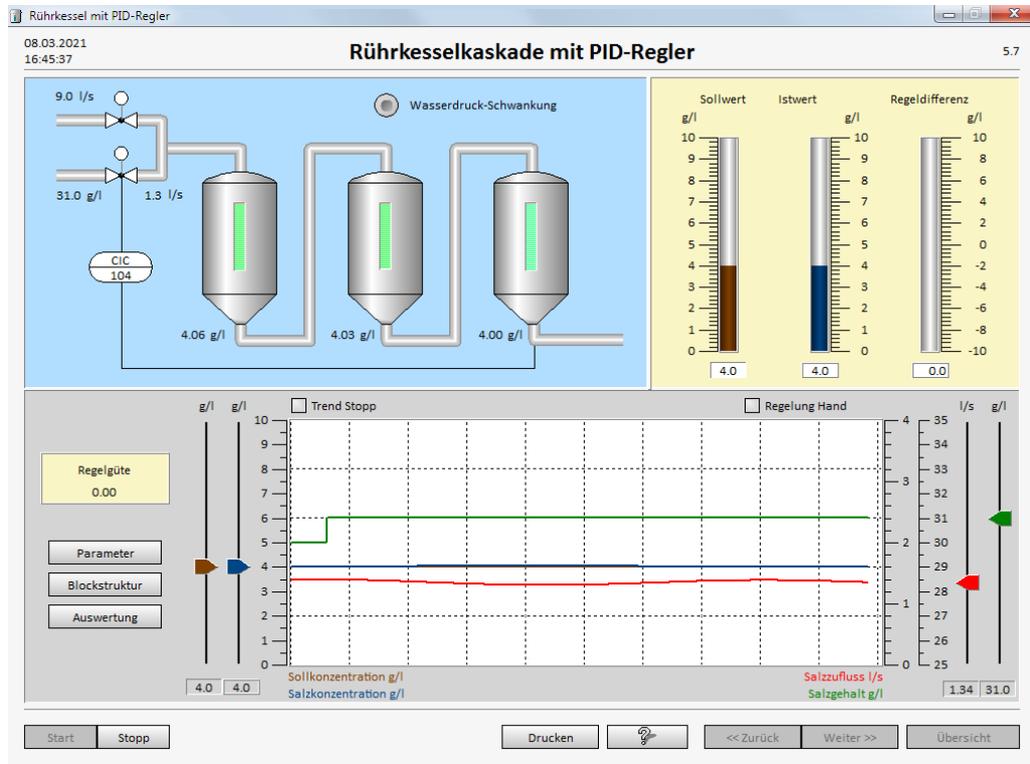


Abbildung 7-8: Störverhalten aperiodisch

Hier ist das Reglereinstellverfahren von Chien/Hrones/Reswick nicht geeignet, da die berechneten Parameter den Regelkreis instabil werden lassen

7.5 Beurteilung Reglereinstellverfahren

Für diesen Prozess war das Reglereinstellverfahren von Chien/Hrones/Reswick nicht geeignet.

Da die Reglereinstellverfahren empirische Verfahren sind und keine die auf mathematischen Grundlagen basieren, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sie für jede Strecke vernünftige Ergebnisse liefern.

7.6 Kaskadenregelung

Bei der Kaskadenregelung wird versucht mithilfe von weiteren Messgrößen, die Regelung zu verbessern und zu beschleunigen.

Die Kaskadenregelung besteht aus zwei Regelkreisen. Dem äußeren Hauptregelkreis mit einem PID-Regler ist ein innerer Kreis mit einem PI-Regler unterlagert. Da die Strecke eine relativ große Zeitkonstante besitzt, dauert es lange, bis sich Änderungen der Eingangsgröße am Ausgang bemerkbar machen. Dies wirkt sich bei einem einschleifigen Regelkreis nachteilig auf die Schnelligkeit der Regelung aus.

Bei der Kaskadenregelung der Rührkesselkaskade wird auf die Salzkonzentration (Ausgangsgröße) des ersten Kessels zugegriffen. Änderungen (Störungen) in der Zulaufkonzentration werden im ersten Kessel deutlich früher als im dritten Kessel gemessen. Der innere Regelkreis reagiert daher wesentlich schneller auf Regelabweichungen, so dass die Regelung insgesamt beschleunigt wird. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass in dem ersten Kessel durch den inneren Kreis große Regelabweichungen, wie sie in einem einschleifigen Regelkreis auftreten, vermieden werden.

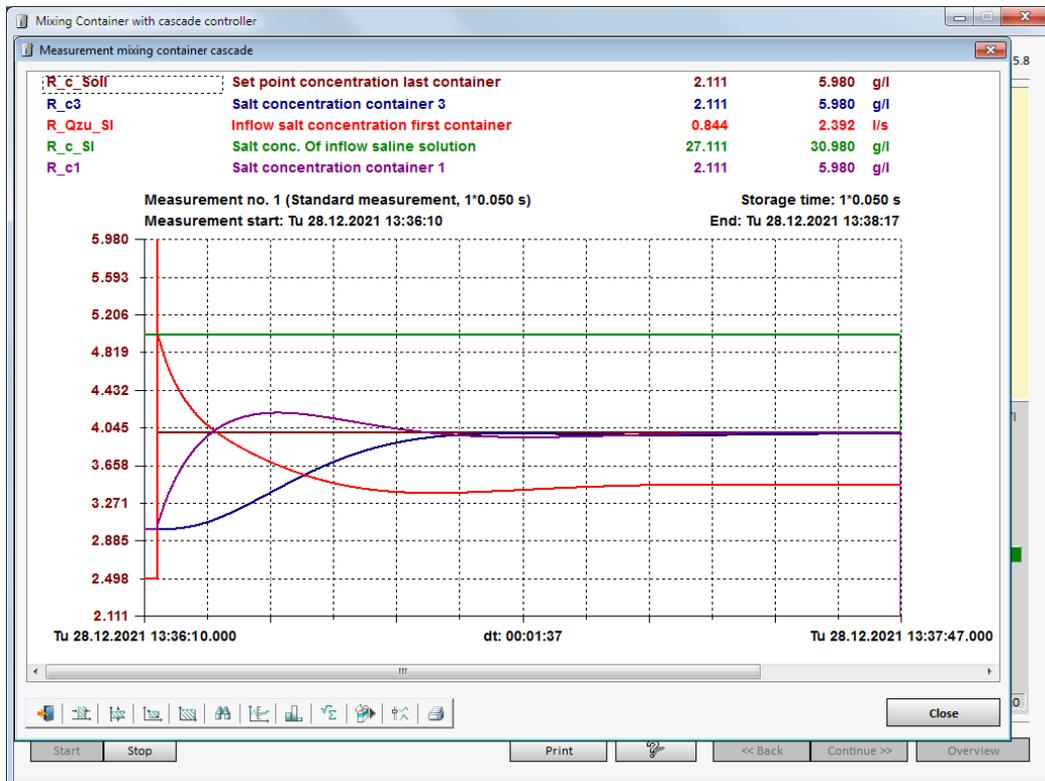
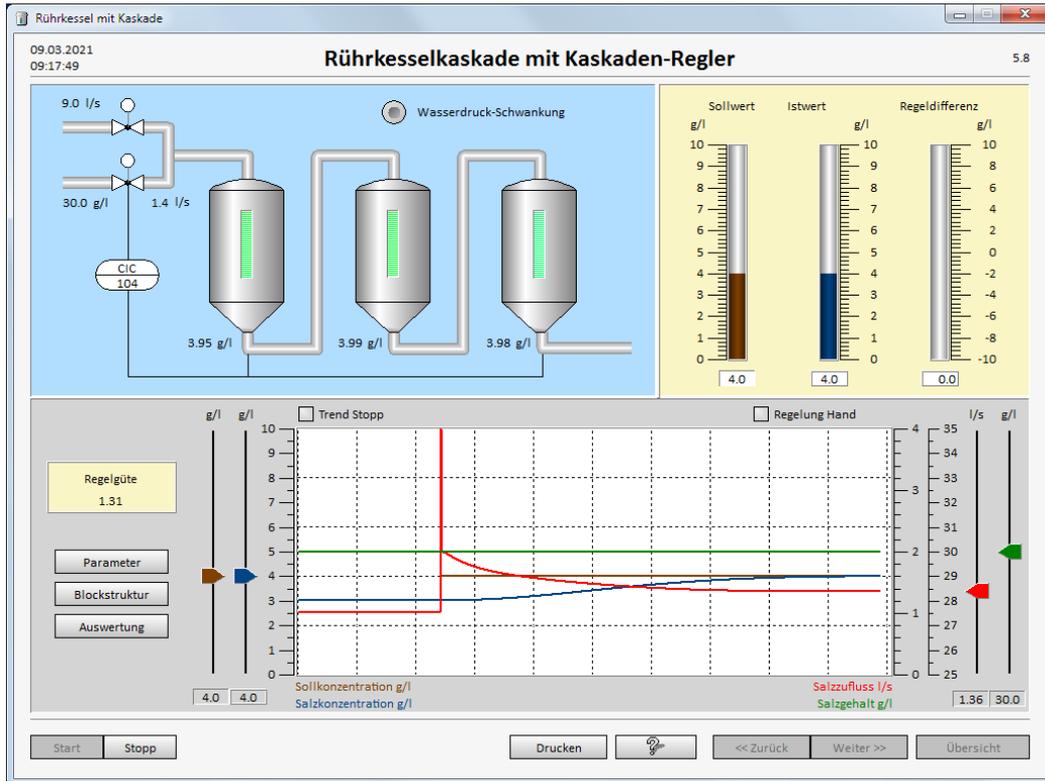
Aufgabe 16:

Wählen Sie bei der Rührkesselkaskade den Punkt 5.8 „Kaskadenregelung“ und drücken Sie „Start“.

Geben Sie einen Sprung der Sollkonzentration von 3g/l auf 4g/l vor.

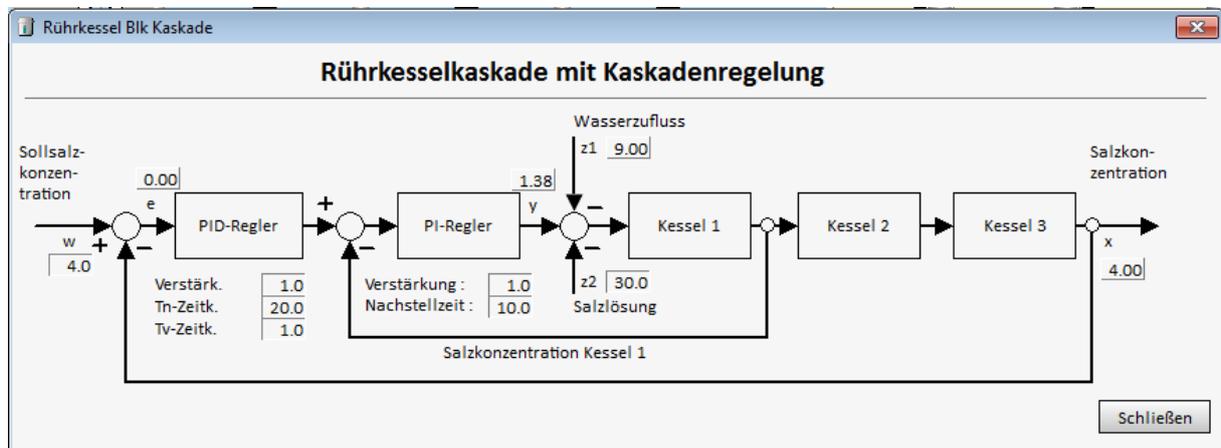
Beobachten Sie das Verhalten.

Mit den eingestellten Werten der beiden Regler ist das Verhalten der Regelung sehr gut. Der Istwert (Salzkonzentration im 3. Behälter) geht schnell und ohne Überschwingen auf den Sollwert (Sollkonzentration).



Der innere Regelkreis (mit PI-Regler) versucht durch Verstellen des Salzzufusses die Salzkonzentration des 1. Behälters auf die Stellgröße des äußeren Reglers (PID-Reglers) zu bringen. Der Ausgang des PID-Reglers ist die Führungsgröße für den inneren Regelkreis. Da sich die Salzkonzentration vom 1. bis zum 3. Behälter fortsetzt, müssen die Salzkonzentrationen vom 1. bis zum 3. Behälter gleich sein, wenn die Sollkonzentration erreicht ist. Im eingeschwungenen Fall gibt der Ausgang des äußeren Reglers also den eingestellten Sollwert (Sollkonzentration) aus. Der äußere Regler gibt einen Führungswert für den inneren Regelkreis vor, der sich der eingestellten Sollkonzentration nähert. Dieser Führungswert wird mit der gemessenen Konzentration im 1. Behälter verglichen und der innere Regler versucht durch Verstellen des Salzzufusses diese Konzentration zu erreichen.

Dadurch, dass das Verstellen des Salzzufusses abhängig von der gemessenen Konzentration im 1. Behälter ist und das Stellsignal des äußeren Reglers als Führungsgröße auf die eingestellte Sollkonzentration geht, ist es möglich, ein gutes und schnelles Regelkreisverhalten zu erreichen.



8 Füllstandregelung mit 3Pkt-Stellglied, Regelungstechnisches Praktikum II

Als Regelstrecke wird ein Behälter mit Zu- und Abfluss simuliert. Die Größe des Abflusses wird durch die Ventilstellung beeinflusst. Die regelungstechnische Aufgabe besteht darin, den Füllstand durch Öffnen oder Schließen des Ventils so zu regeln, dass dieser einem bestimmten Sollwert entspricht. Die Ventilstellung stellt die Eingangsgröße des Systems dar, der Füllstand die Ausgangsgröße. Als Störgröße wirkt der Zufluss. Das Ventil wird über einen Motor angesteuert, der über einen Dreipunktregler gefahren wird. Durch Ansteuern des Motors kann das Ventil auffahren, zufahren oder in der eingestellten Position verharren. Der Dreipunktregler gibt die Befehle "auf" und "zu" aus. Die Ventil-Sollstellung ist der Sollwert für den Dreipunktregler. Der Ventil-Istwert folgt dem Sollwert zeitverzögert, weil der Motor das Ventil durch Auf- bzw. Zufahren in die gewünschte Position bringt.

Die Führungsgröße ist der Sollfüllstand, die Regelgröße ist der Istfüllstand, die Störgröße ist der Zulauf und das Stellsignal ist die „Ventilstellung.Soll“. Da das Ventil über einen Motor auf- und zugefahren wird, kann es dauern, bevor das Ventil die vom Regler als Stellsignal ausgegebene Ventilstellung „Ventilstellung.Soll“ erreicht. Deshalb werden die Signale „Ventilst.Soll“ und „Ventilst.Ist“ unterschieden.

Als Anfangszustand der Simulation ist das Ventil geschlossen und der Zulauf gleich Null. Damit sich der Füllstand ändert, muss der Zulauf auf Werte größer Null gesetzt werden.

Zu beachten ist bei dieser Regelung noch, dass der Reglerausgang mit 0,4 multipliziert wurde, damit das Stellsignal y auf 0 bis 100% normiert ist, denn die Differenz zwischen Soll- und Istwert kann maximal den Wert 250l/s annehmen.

8.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum II den Punkt 5.1 „Ungeregelte Anlage“.

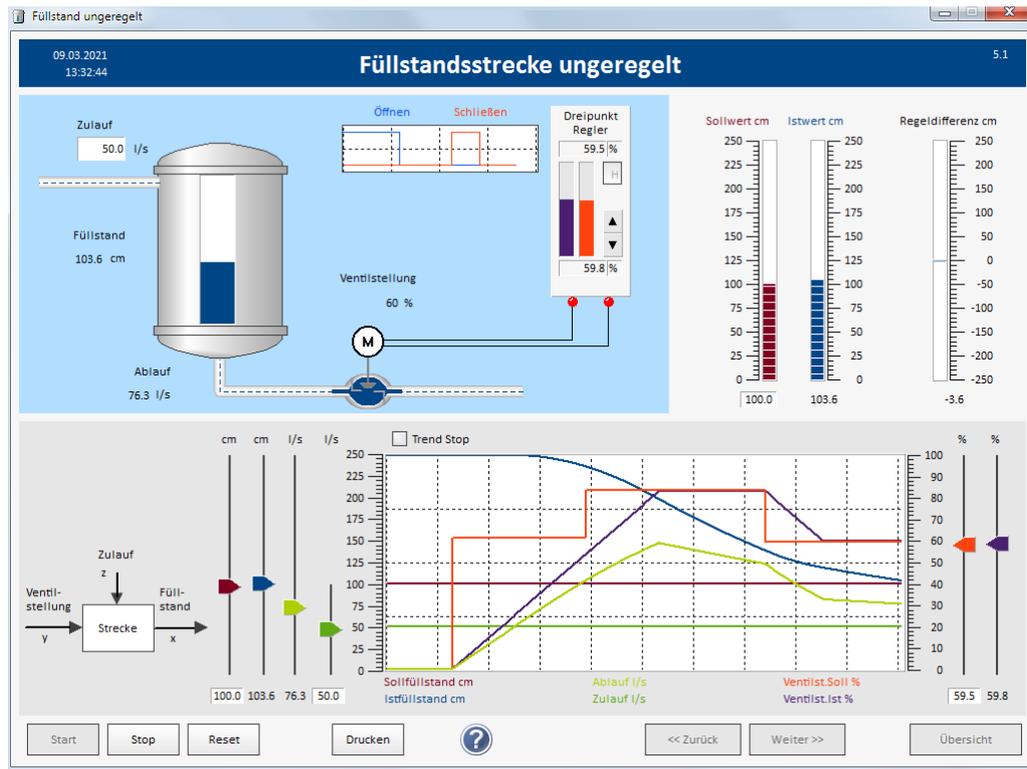
Drücken Sie auf „Start“. Sie können jetzt die Werte für den Sollwert (Führungsgröße Sollfüllstand %), das Stellsignal (Ventilst.Soll) sowie das Störsignal (Zulauf l/s) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

Aufgabe 1:

Stellen Sie den Zulauf auf 50l/s und lassen Sie den Behälter volllaufen. Setzen Sie den Sollfüllstand (Führungsgröße) auf 100cm. Durch Verstellen des Stellsignals (Ventilst.Soll) können Sie nun versuchen, den Istwert (Regelgröße Istfüllstand) auf den Sollwert (Führungsgröße Sollfüllstand) zu bringen.

Die tatsächliche Ventilstellung läuft der gewünschten Ventilstellung hinterher (vergleiche rotes und violettes Signal in der Trenddarstellung).

Die Regelung lässt sich natürlich nur realisieren, wenn ein Zulauf > 0 eingestellt ist.

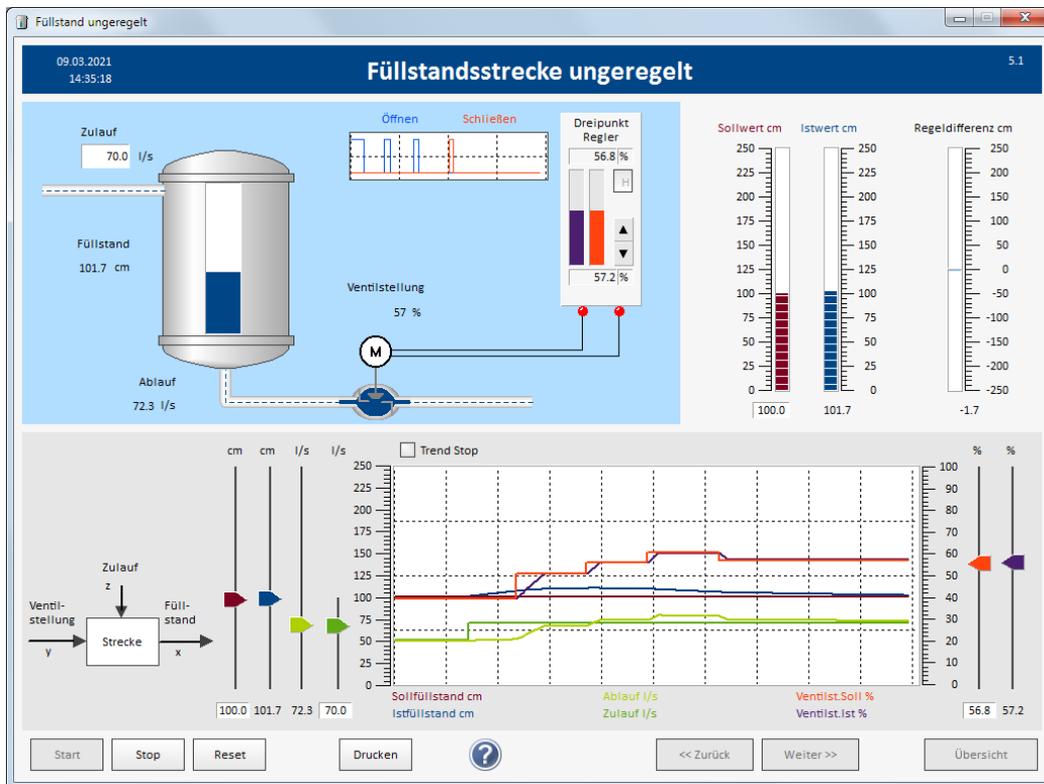


Bei dieser Regelung spricht man vom Führungsverhalten. Der Sollwert wird verstellt, und es wird versucht, den Istwert (Regelgröße) durch Verstellen des Stellsignals wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen.

Zu beobachten ist bei dieser Strecke, dass die tatsächliche Ventilstellung dem Stellsignal hinterherläuft. Wenn das Stellsignal geändert wird (rotes Signal) dauert es, bis die Ventilstellung den vom Stellsignal vorgegebenen Wert annimmt. Das Ventil braucht durch das Ansteuern mit dem Motor eine gewisse Zeit, bis es auf die gewünschte Ventilstellung gefahren ist.

Aufgabe 2:

Verändern Sie den Zulauf auf 70l/s und versuchen Sie die Störung durch Verstellen des Stellsignals auszuregeln.



Der Füllstand fängt an zu steigen. Das Stellventil muss weiter geöffnet werden, damit mehr aus dem Behälter fließt und der Füllstand wieder sinkt.

Das Verändern des Zulaufs ist eine Störung für das System. Deshalb spricht man hier von der Untersuchung des Störverhaltens.

8.2 Regelkreisuntersuchung

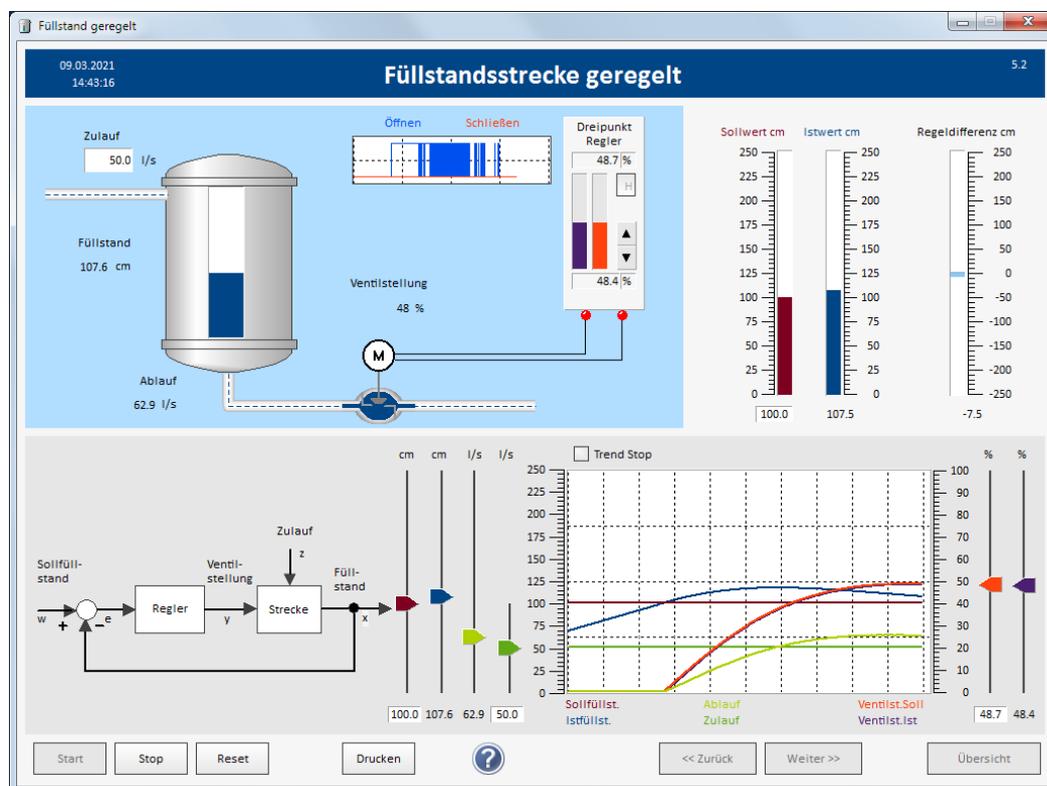
8.2.1 Geregelte Anlage

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Punkt 5.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung durch den Benutzer ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 3:

Drücken Sie „Start“. Stellen Sie zuerst den Sollfüllstand (Führungsgröße) auf 100cm und dann den Zulauf auf 50l/s. Was passiert?



Erst wenn durch den Zulauf die Füllstandhöhe von 100cm erreicht wird, fängt der Regler an ein Stellsignal größer 0 auszugeben. Solange der Füllstand unter dem Sollfüllstand war, blieb das Ventil geschlossen.

Wenn der Istfüllstand den Sollfüllstand überschreitet, wurde das Ventil geöffnet, damit mehr raus als reinfließt und der Füllstand wieder sinkt.

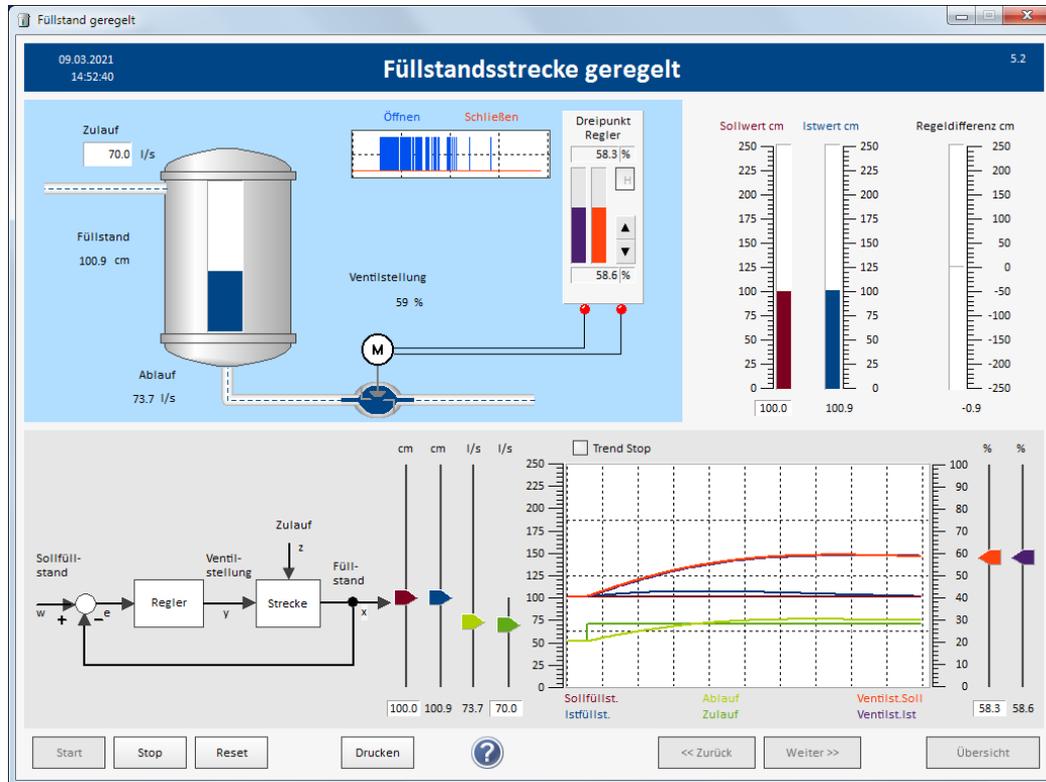
Mit einem Überschwinger schafft es der Regler den Istfüllstand auf den Sollfüllstand zu bringen.

Da der Regelkreis auf eine Sollwertänderung reagiert, spricht man hier vom Führungsverhalten.

Aufgabe 4:

Verändern Sie den Zulauf auf 70l/s.

Was passiert?



Der Füllstand fängt an zu steigen.

Der Regler versucht das Ventil weiter zu öffnen, damit mehr aus dem Behälter herausfließt.

Nach einer gewissen Zeit hat der Regler die Störung ausgeregelt (Störverhalten).

Das Ansteuern des Ventils erfolgt durch den Motor, der das Ventil auffährt, zuführt oder die Stellung beibehält.

8.2.2 Regelung mit P-Regler

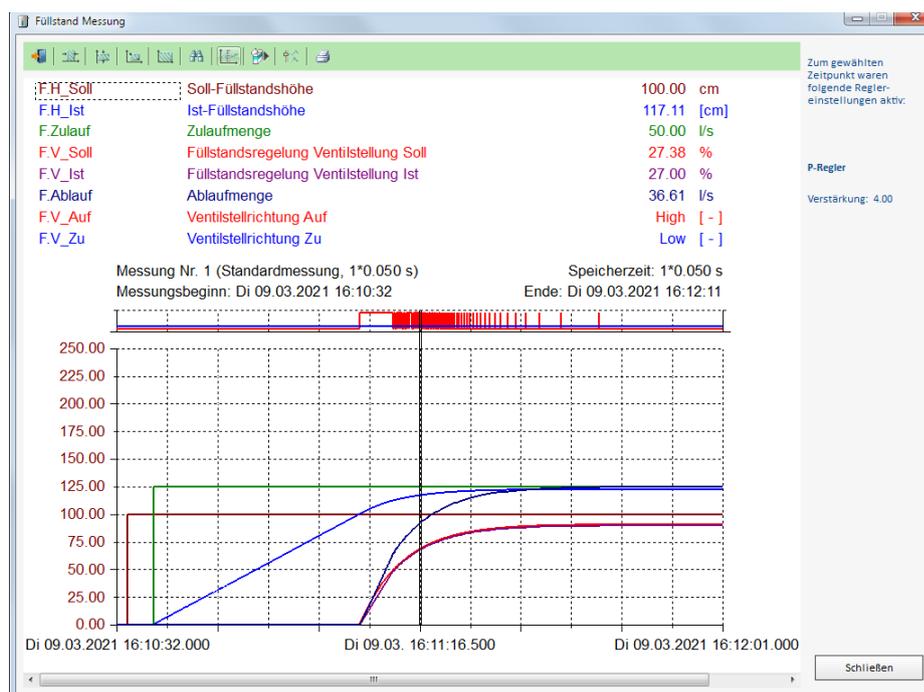
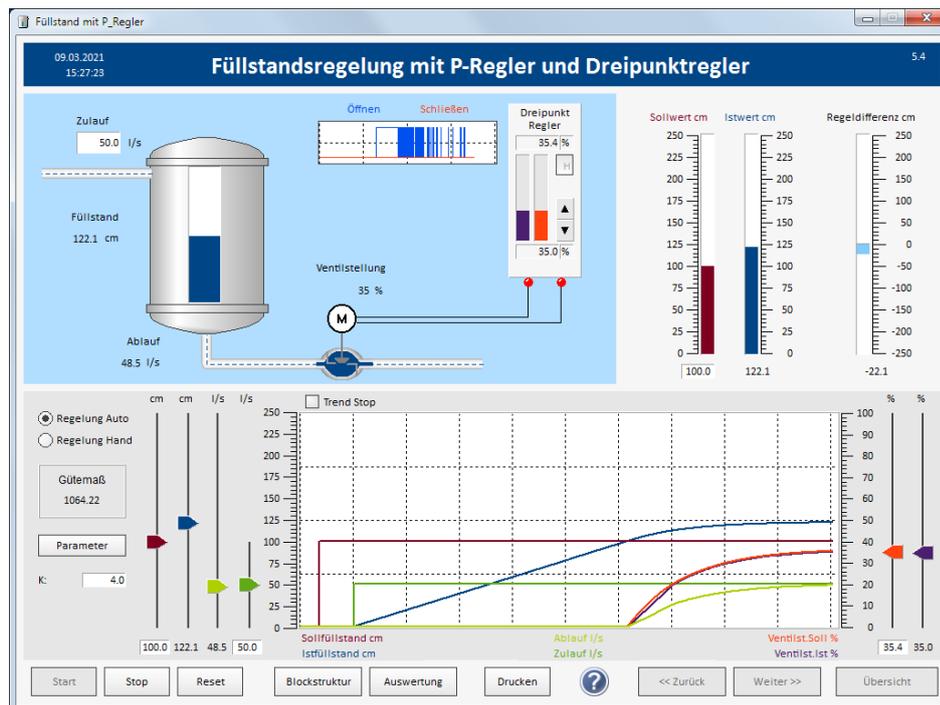
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.4 „Regelung mit P-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 5:

Stellen Sie K auf 4, den Sollwert auf 100cm und den Zulauf auf 50l/s. Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.

Beobachten Sie das Verhalten.



Der Füllstand fängt an zu steigen, nachdem der Zulauf auf 50l/s eingestellt wurde. Überschreitet der Istfüllstand den Sollfüllstand, gibt der Regler ein Stellsignal aus und das Ventil wird geöffnet.

Nach der Einschwingphase ist deutlich zu sehen, dass der Istwert (Regelgröße) den Sollwert (Führungsgröße) nicht erreicht. Wir erhalten eine bleibende Regelabweichung.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$

Begründung:

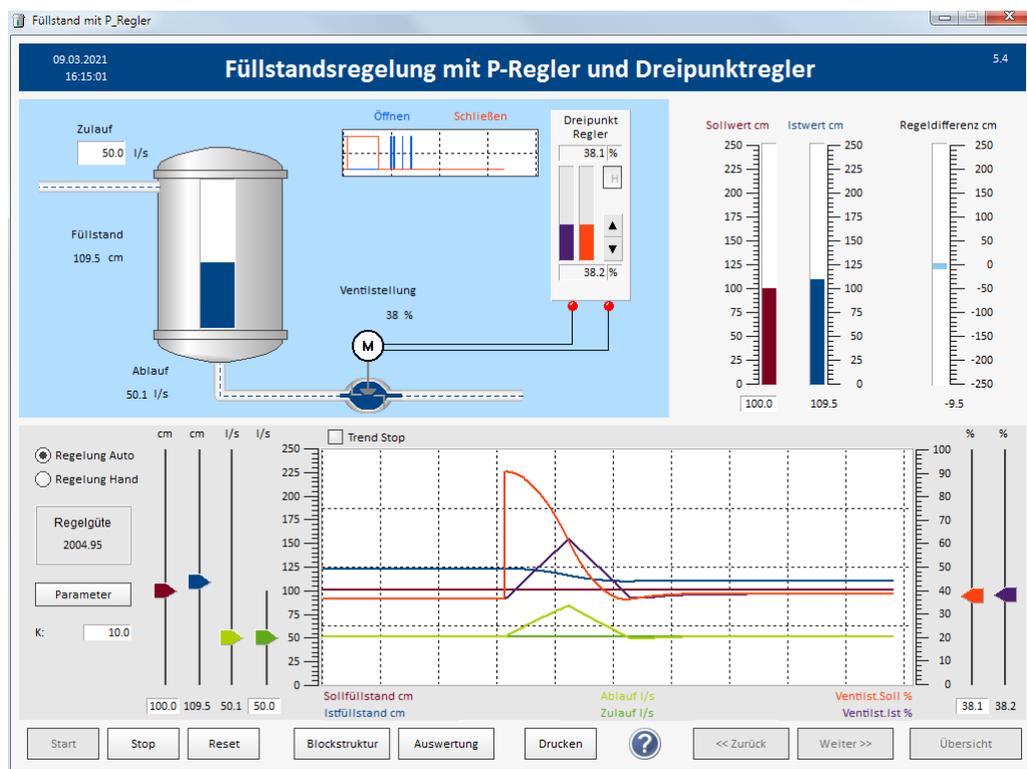
Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $x-w$ (Sollwert-Istwert) wird mit dem vorgegebenen Verstärkungsfaktor (in unserem Fall 4) multipliziert. Damit der P-Regler ein Stellsignal (Ventilstellung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regelabweichung.

Gibt der Regler 0 aus, schließt das Ventil und der Abfluss geht auf 0.

Aufgabe 6:

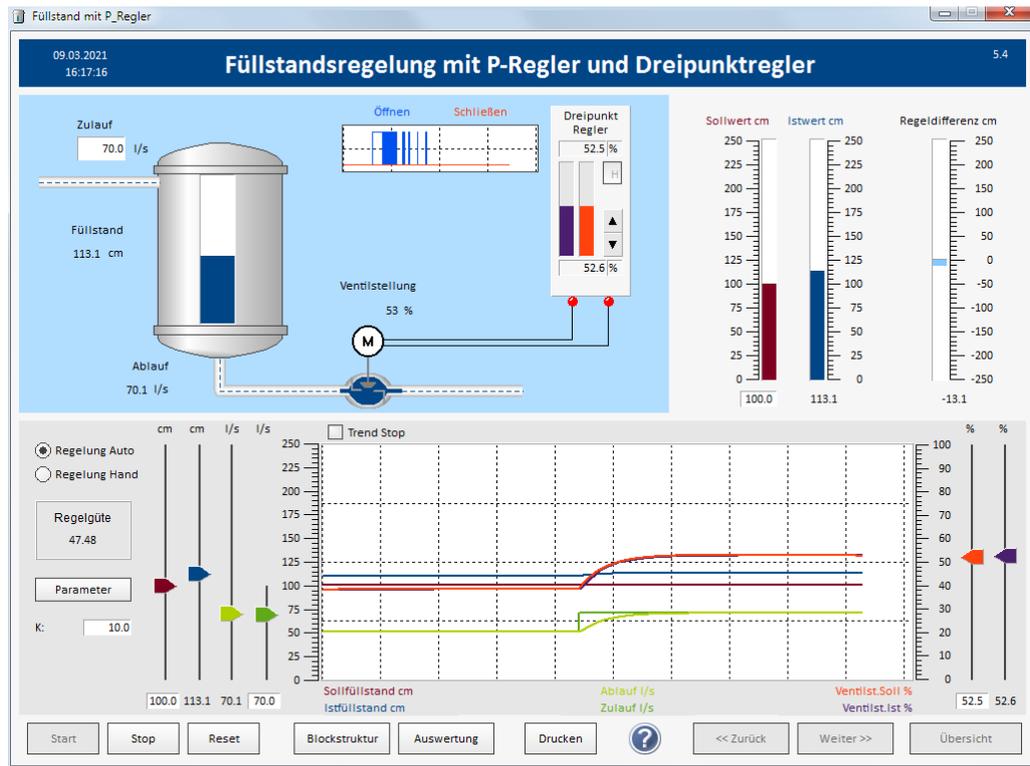
Verändern Sie die Verstärkung des P-Regler von 4 auf 10 und warten Sie bis der Regelkreis wieder eingeschwungen ist.

Was passiert?



Die Regelabweichung zwischen Sollwert und Istwert wird mit der Erhöhung der Verstärkung K von 4 auf 10 wesentlich kleiner. Allerdings schafft es der P-Regler auch hier nicht, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Wir erhalten aus dem oben beschriebenen Grund ebenso eine bleibende, wenn auch wesentlich kleinere Regelabweichung $x - w$.

Auch auf eine Störung (Veränderung des Zulaufs) reagiert der P-Regler. Hierfür erhält man ebenfalls eine bleibende Regelabweichung.



Wie am Einschwingverhalten zu sehen ist, reagiert der P-Regler sofort und schnell auf Sollwert- und Störwertänderungen (Führungs- und Störverhalten).

8.2.3 Regelung mit I-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 4.5 „Regelung mit I-Regler“.

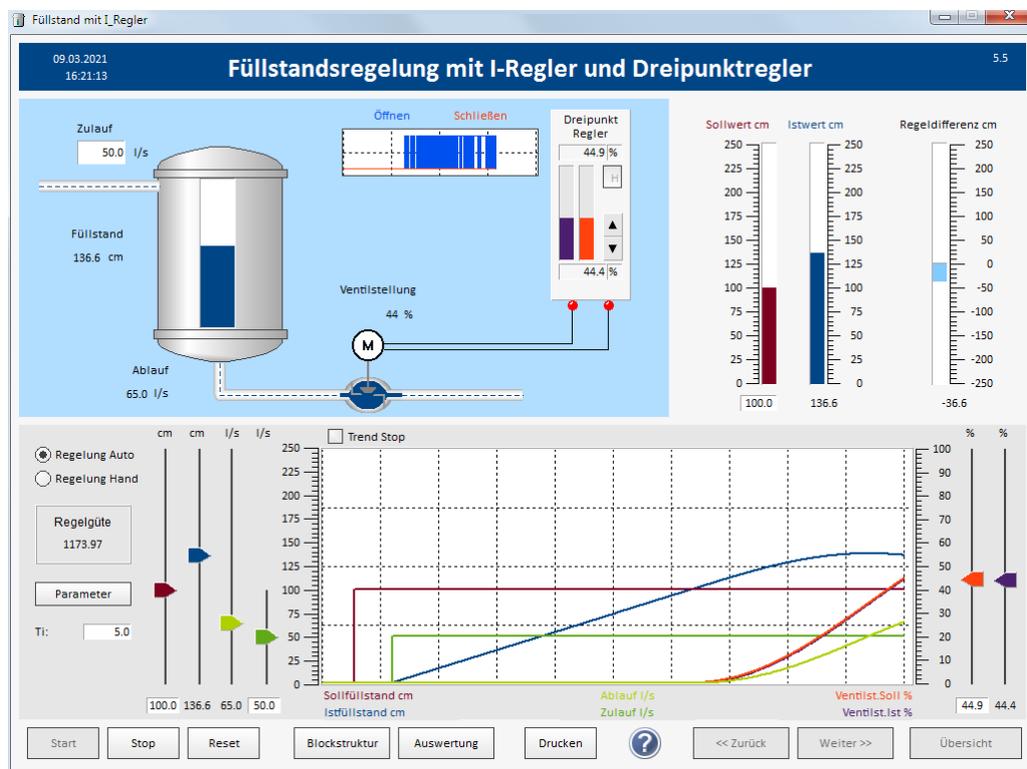
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 7:

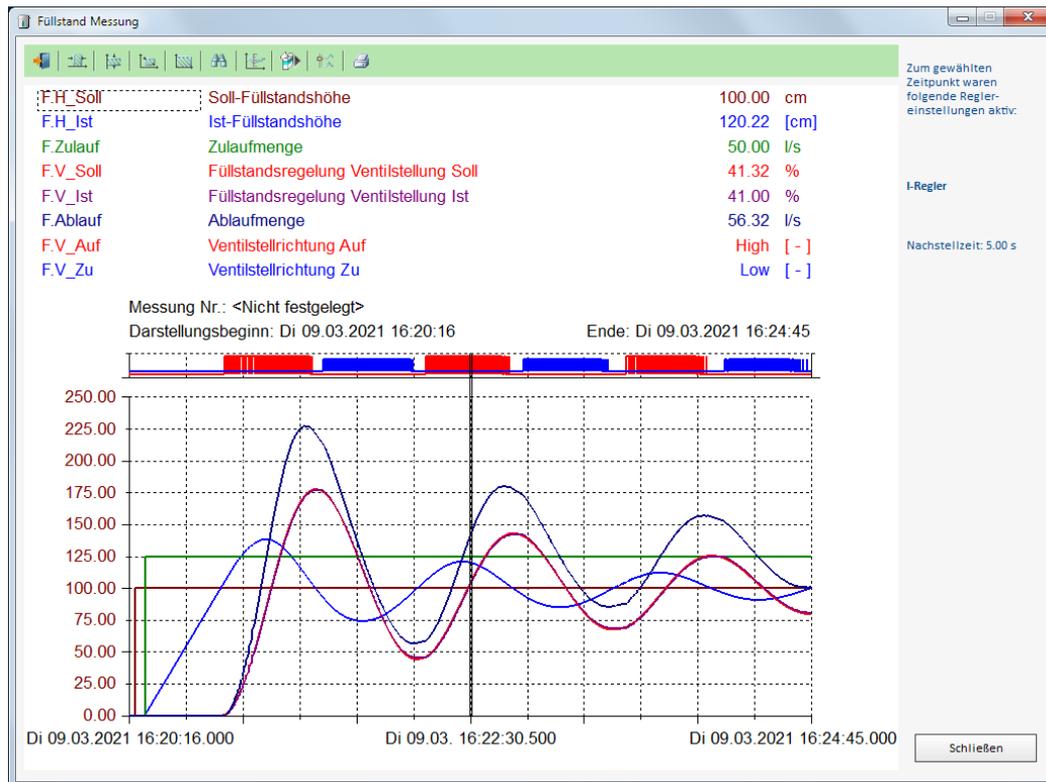
Stellen Sie den Reglerparameter T_i auf 5.

Verändern Sie den Sollwert auf 100cm und den Zulauf auf 50l/s.

Beobachten Sie das Verhalten.



Das Ventil wird langsam durch den I-Regler geöffnet. Nach einer langen Zeitspanne mit vielen Überschwingern erreicht der Istwert den Sollwert.



Der I-Regler ist nicht geeignet für diese Füllstandregelung, da das Einschwingen zu lange dauert.
Auch das Verstellen des Reglerparameters T_i verbessert nicht das Einschwingverhalten.

8.2.4 Regelung mit PI-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.6 „Regelung mit PI-Regler“.

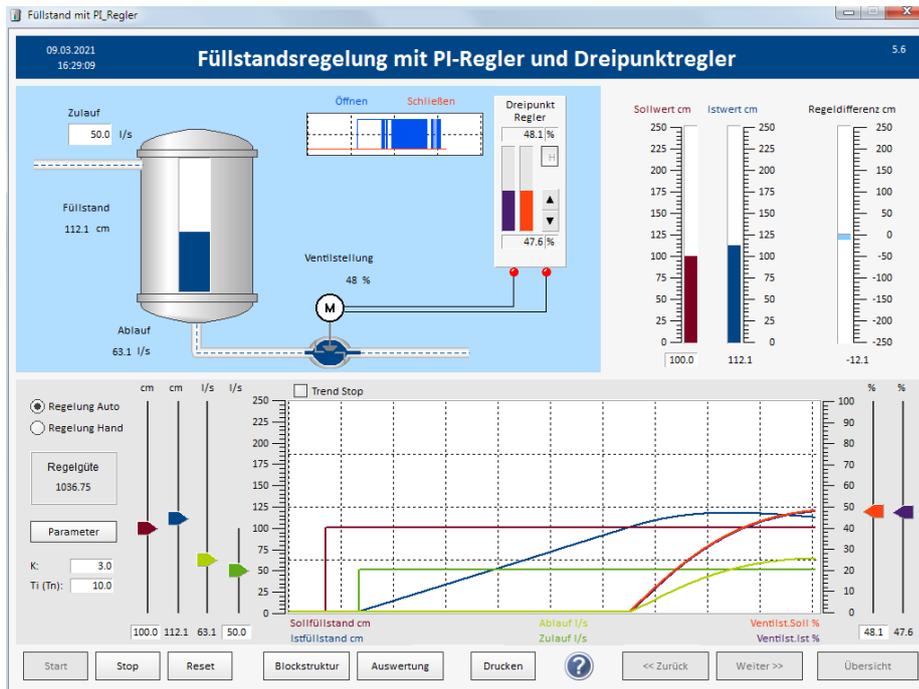
Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 8:

Reglerparameter seien: Verstärkung $K = 3$, Nachstellzeit $T_i = 10$.

Verändern Sie den Sollwert auf 100cm und den Zulauf auf 50l/s.

Beobachten Sie das Einschwingverhalten.



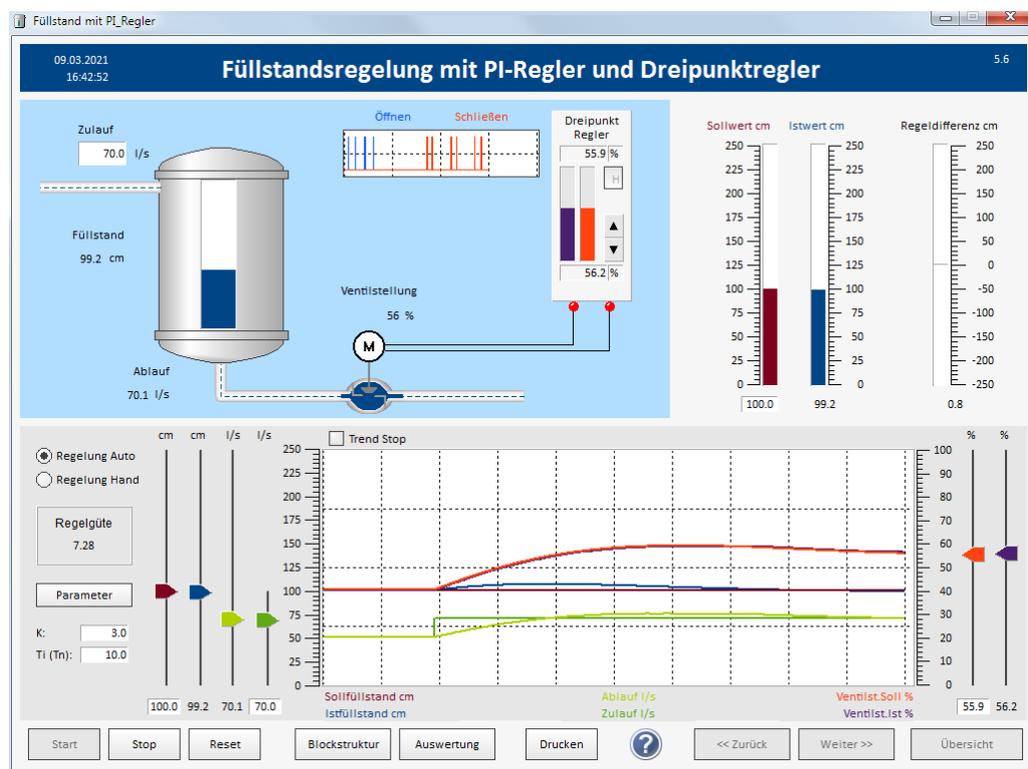
Der Istwert (Regelgröße Istfüllstand) erreicht mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern mit Überschwingen den neuen Sollwert (Führungsgröße Sollfüllstand).

Da der Sollwert geändert wurde, handelt es sich hier um die Untersuchung des Führungsverhaltens.

Aufgabe 9:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Wenn der Regelkreis eingeschwungen ist, verändern Sie den Zulauf auf 70l/s und beobachten Sie das Verhalten.



Der größere Zulauf bewirkt eine Erhöhung des Füllstands. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und vergrößert die Ventilöffnung. Nach einer kurzen Einschwingphase erreicht der Istwert wieder den Sollwert.

Da der Regelkreis auf eine Störwertänderung reagiert spricht man in diesem Fall vom Störverhalten.

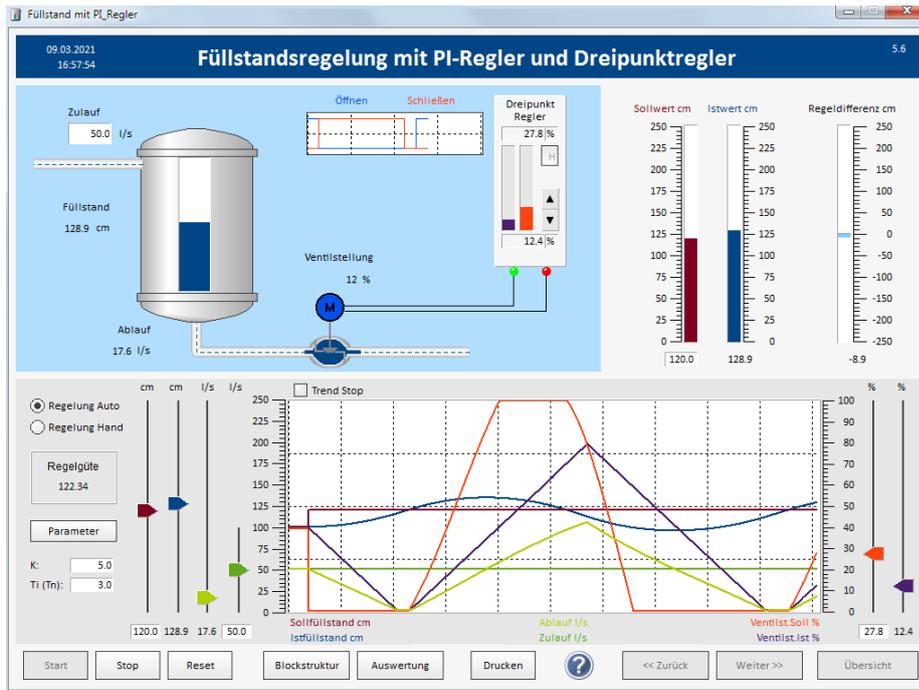
Aufgabe 10:

Lassen Sie das System mit den vorgegebenen Parametern des PI-Reglers auf den Sollwert 100cm mit dem Zulauf 50l/s einschwingen.

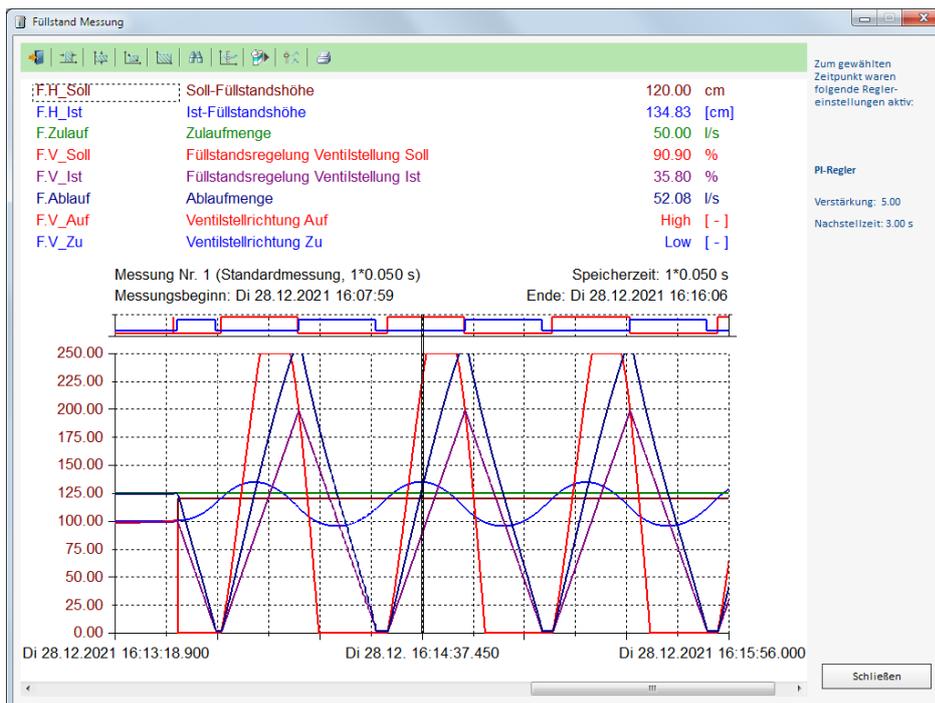
Ändern Sie die Reglerparameter auf $K = 5$ und $T_i = 3$.

Geben Sie einen Sprung des Sollfüllstandes von 100cm auf 120cm vor.

Was passiert?



Mit diesen Reglerparametern wird der Regelkreis instabil, der Istfüllstand schwingt um den Sollfüllstand.

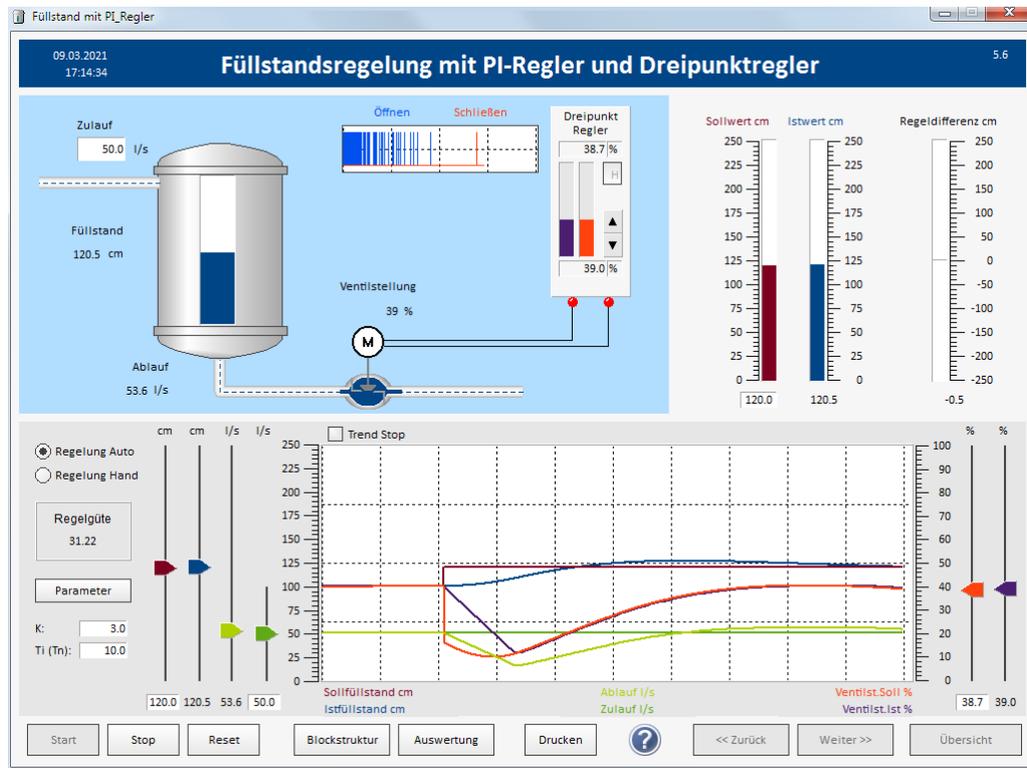


Aufgabe 11:

Lassen Sie das System mit den vorgegebenen Parametern $K = 3$ und $T_i = 10$ des PI-Reglers auf den Sollwert 100cm mit dem Zulauf 50l/s einschwingen.

Geben Sie einen Sprung des Sollfüllstandes von 100cm auf 120cm vor.

Bestimmen Sie die Regelgüte für diesen Sprung.



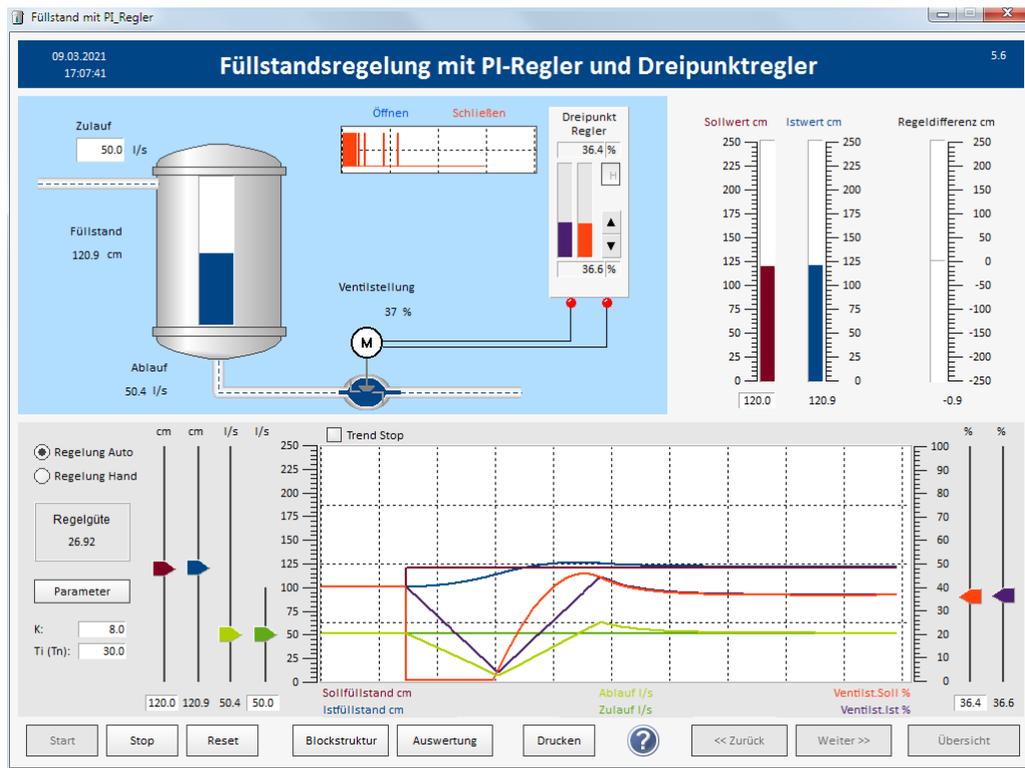
Die Regelgüte beträgt nach dem Einschwingen ca. 31,71.

Aufgabe 12:

Die in dem Kasten mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwungenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl wird, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwungen und der Istwert hat den Sollwert erreicht.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Um die Regelgüte miteinander vergleichen zu können, müssen für alle Versuche die gleichen Anfangsbedingungen eingestellt sein.



Mit den Reglerparametern $K = 8$ und $T_i = 30$ wurde eine Regelgüte von 27,2 erreicht.

Als Anfangsbedingungen wurden eingestellt:

Das System war mit dem Zulauf 50l/s auf dem Sollfüllstand 100cm eingeschwungen.

Der Sollwert wurde auf 120l/s erhöht und es wurde gewartet, bis der Regelkreis wieder eingeschwungen war.

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- Einschwingen lassen mit Zulauf = 50l/s auf Sollfüllstand = 100cm
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 120cm stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Da das Ventil durch Impulse angesteuert wird (Öffnen, Schließen) schwankt der Istwert leicht um den Sollwert.

8.2.5 Regelung mit PID-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 5.7 „Regelung mit PID-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Behalten Sie die eingestellten Parameter $K=3$, $T_i = 10$ und $T_d = 2$ bei. Geben Sie als Sollfüllstand 100cm vor und stellen Sie den Zulauf auf 50l/s.

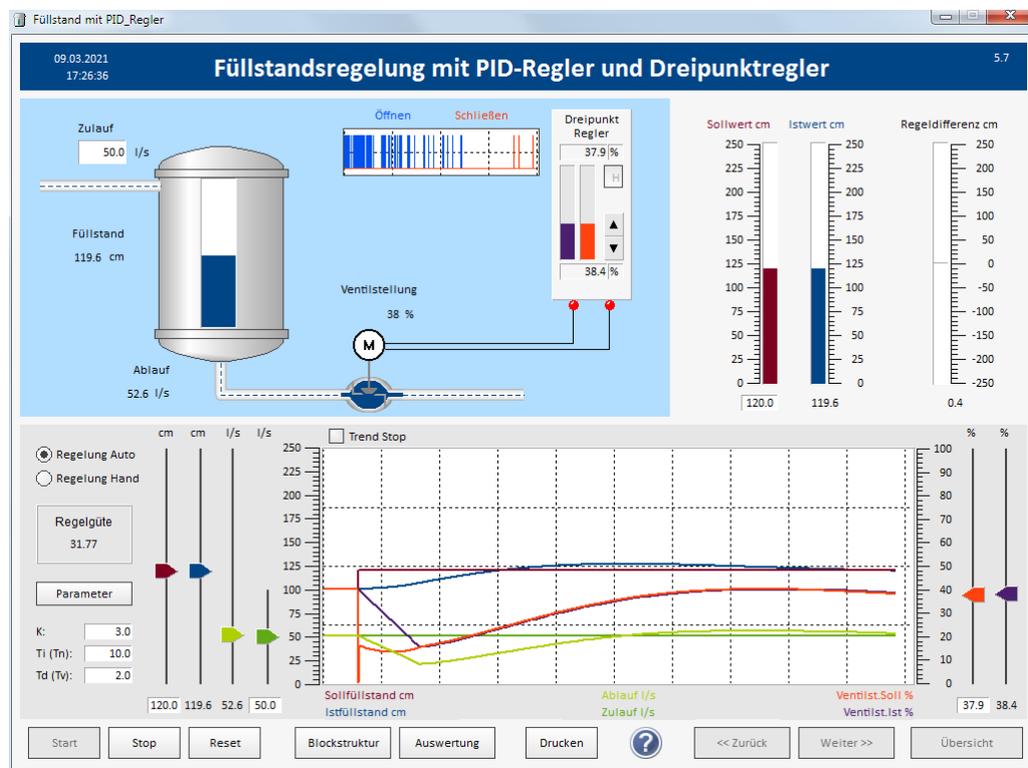
Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Aufgabe 13:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 3$, Nachstellzeit $T_i = 10$, Vorhaltezeit $T_d = 2$

Ändern Sie den Sollfüllstand auf 120cm.



Der Regelkreis geht mit Überschwingen in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals. Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Der Peak geht nach unten, da das Stellsignal kleiner werden muss (Ventil schließt), damit der Füllstand steigt.

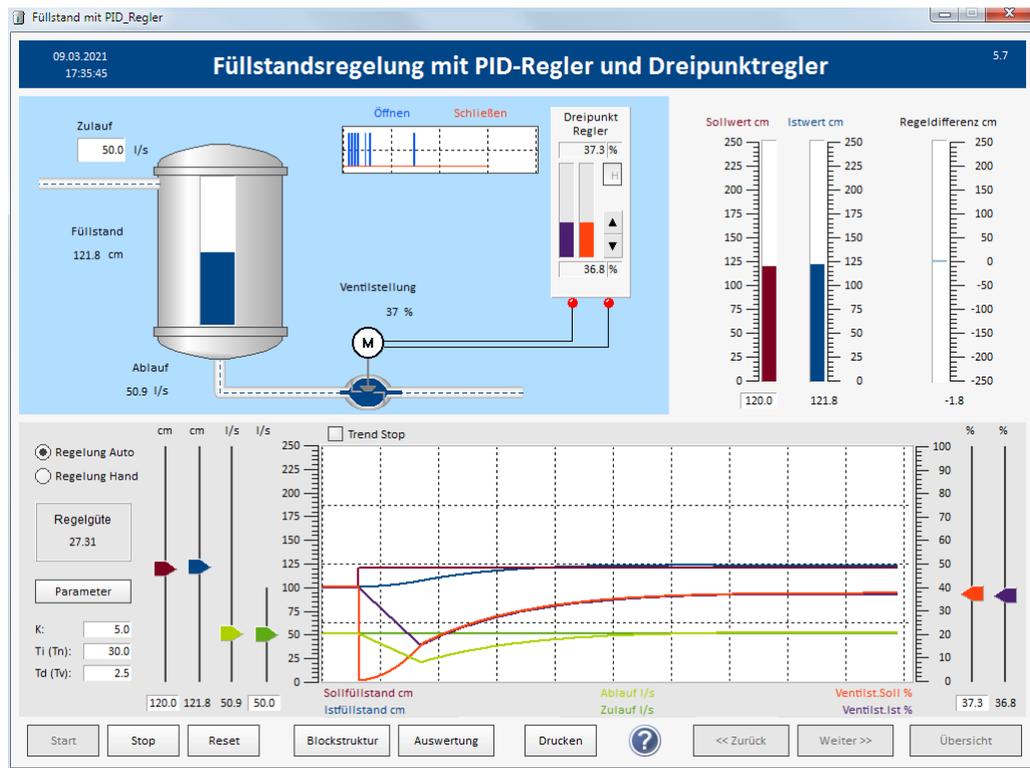
Die Regelgüte geht auf über 32,85.

Da das Ventil durch Impulse angesteuert wird (Öffnen, Schließen) schwankt der Istwert leicht um den Sollwert.

Aufgabe 14:

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch, um die Regelgüte zu verbessern:

- Einschwingen lassen mit Zulauf = 50l/s auf Sollfüllstand = 100cm
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 120cm stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.



Mit den Parametern Verstärkung $K = 5$, Nachstellzeit $T_i = 30$ und Vorhaltezeit $T_d = 2,5$ erhalten Sie z.B. eine Regelgüte von 27,7.

Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

9 Motordrehzahl-Regelung, Regelungstechnisches Praktikum II

Bei dem Prozess handelt es sich um die Simulation eines Motors, dessen Drehzahl durch Veränderung der Eingangsspannung des Motors geregelt werden soll. Die Spannung ist die Eingangsgröße (Stellsignal) und die Drehzahl des Motors die Ausgangsgröße (Regelgröße) des Systems. Das Signal „Last“ wirkt als Störgröße.

Der Prozess Motordrehzahl ist eine Strecke mit Ausgleich.

9.1 Ungeregelte Anlage (Manuelle Regelung)

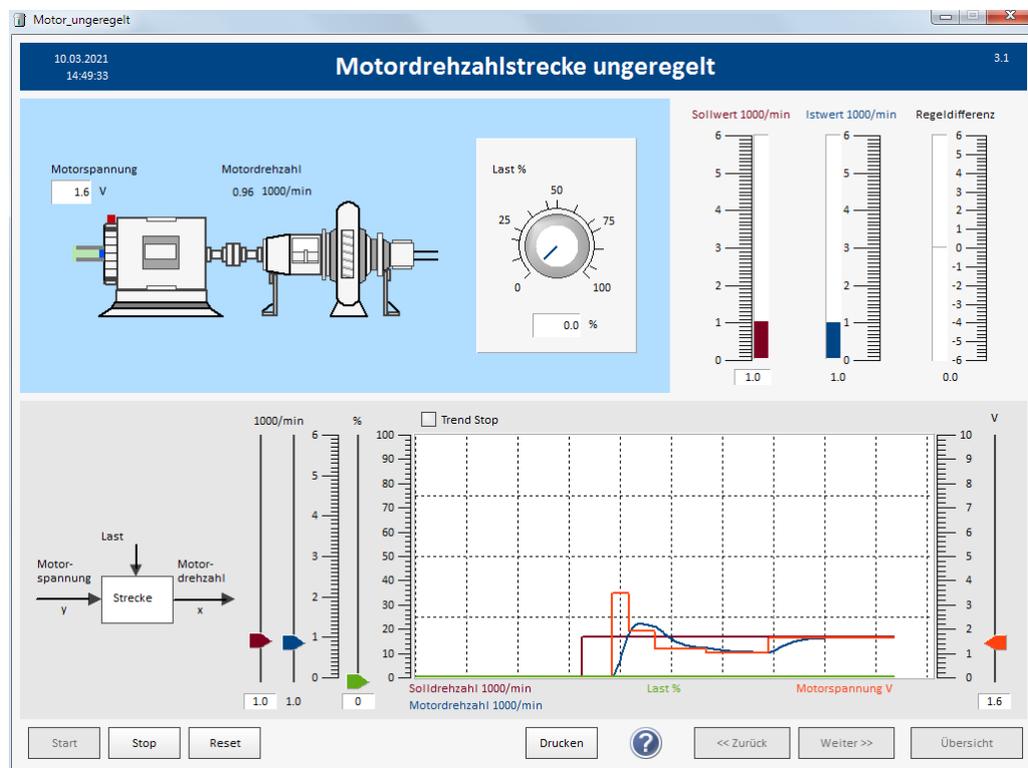
Wählen Sie im Regelungstechnisches Praktikum II den Punkt 3.1 „Ungeregelte Anlage“.

Drücken Sie auf „Start“.

Sie können jetzt die Werte für den Sollwert (Führungsgröße Solldrehzahl 1000/min), das Stellsignal (Motorspannung V) sowie das Störsignal (Last %) durch die Schieberegler oder durch die Eingabe von Werten unterhalb der Schieberegler ändern.

Aufgabe 1:

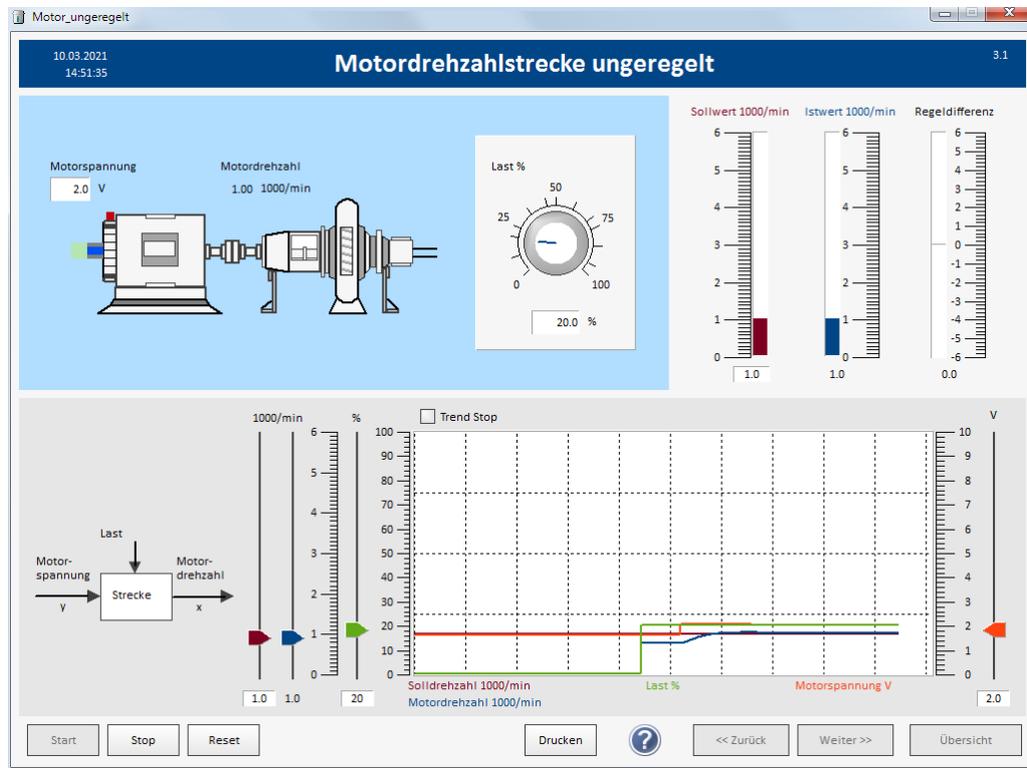
Stellen Sie den Sollwert (Führungsgröße Solldrehzahl) auf 1 (entspricht 1000/min) und versuchen Sie durch Verstellen der Motorspannung (Stellsignal) den Istwert (Regelgröße Motordrehzahl) auf die Solldrehzahl (Führungsgröße) zu bringen.



Bei dieser Regelung spricht man vom Führungsverhalten. Der Sollwert wird verstellt, und es wird versucht, den Istwert (Regelgröße) wieder auf den neuen Sollwert (Führungsgröße) zu bringen.

Aufgabe 2:

Verändern Sie die Last von 0% auf 20% und versuchen Sie die Störung durch Verstellen des Stellsignals auszuregeln.



Durch die Erhöhung der Last verringert sich die Drehzahl.

Um dies auszugleichen, muss das Stellsignal (Motorspannung) erhöht werden.

Das Verändern der Last ist eine Störung für das System. Deshalb spricht man hier von der Untersuchung des Störverhaltens.

9.2 Regelkreisuntersuchung

9.2.1 Geregelte Anlage

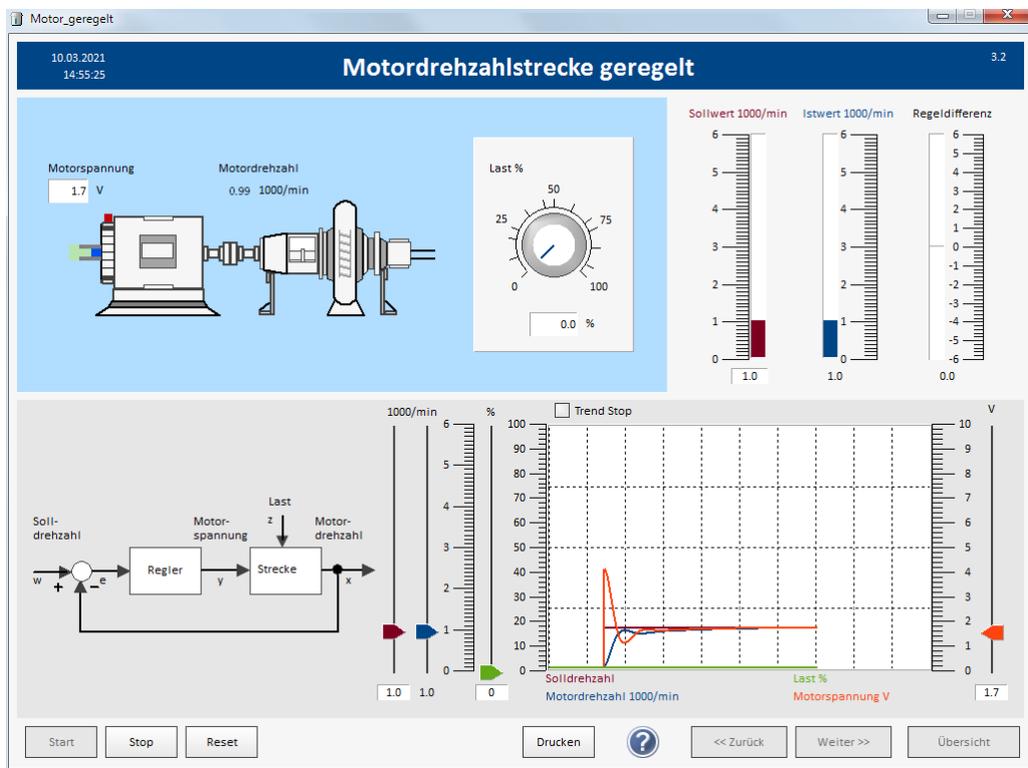
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.2 „Geregelte Anlage“.

Hier können Sie sehen, wie sich das System prinzipiell verhält, wenn statt der Handregelung durch den Benutzer ein Regler die Aufgabe übernimmt, den Istwert auf den Sollwert zu bringen.

Aufgabe 3:

Drücken Sie „Start“ und stellen den Sollwert auf 1 (1000/min).

Was passiert?

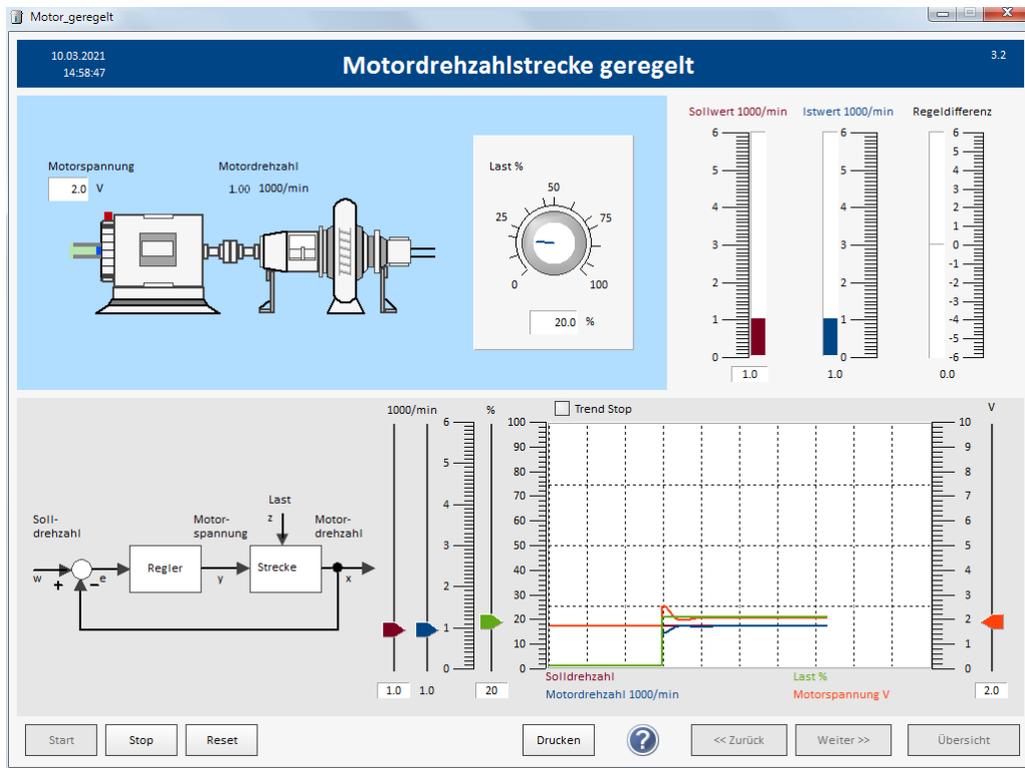


Der Istwert (Motordrehzahl) geht nach kurzer Zeit auf den Sollwert (Führungsverhalten).

Aufgabe 4:

Verändern Sie die Last von 0% auf 20%.

Was passiert?



Die Drehzahl wird kleiner.

Der Regler versucht den Istwert (Motordrehzahl) wieder auf den Sollwert zu bringen, indem er die Motorspannung (Stellsignal) erhöht.

Nach einer kurzen Zeit hat der Regler die Störung ausgeregelt (Störverhalten).

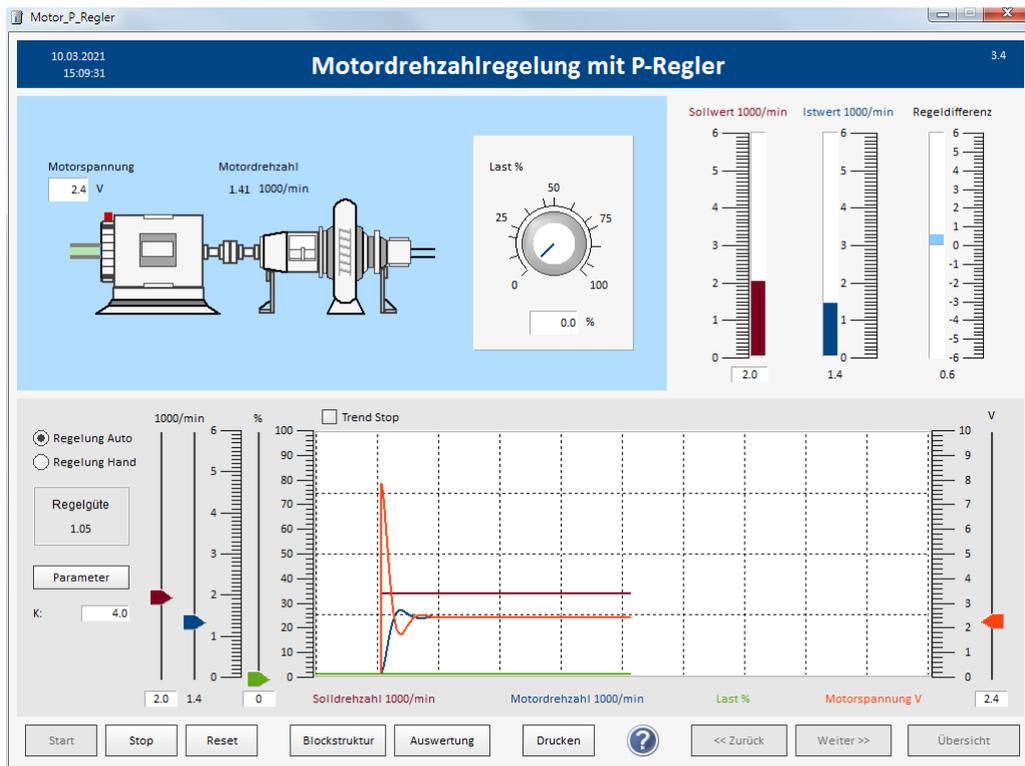
9.2.2 Regelung mit P-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.4 „Regelung mit P-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 5:

Verändern Sie den Sollwert auf 2 (1000/min) und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist, also bis der Istwert sich nicht mehr ändert.



Nach der Einschwingphase ist deutlich zu sehen, dass der Istwert (Regelgröße Motordrehzahl) den Sollwert (Führungsgröße Sollwert) nicht erreicht. Wir erhalten eine bleibende Regeldifferenz.

Die Regeldifferenz e ist definiert als $e = w - x$, mit

w = Führungsgröße (Sollwert) und x = Regelgröße (Istwert).

Laut Norm spricht man von der Regelabweichung, wenn der Istwert x größer als der Sollwert y ist: $x_w = x - w$

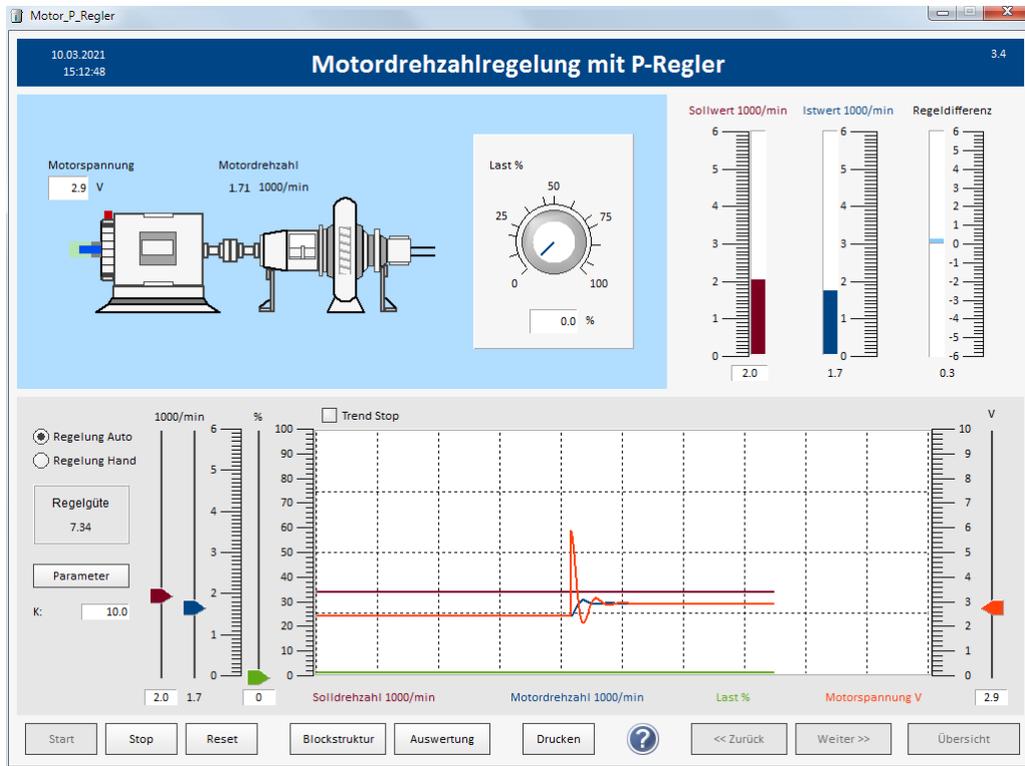
Begründung:

Der P-Regler arbeitet wie ein Verstärker. Das Eingangssignal in den Regler $w - x$ (Sollwert - Istwert) wird mit dem vorgegebenen Verstärkungsfaktor (in unserem Fall 4) verstärkt. Damit der P-Regler ein Stellsignal (eine Motorspannung) ungleich Null ausgibt, müssen Sollwert und Istwert unterschiedlich sein, also bleibende Regeldifferenz. Gibt der Regler 0 aus, geht die Motordrehzahl auch auf 0.

Aufgabe 6:

Verändern Sie die Verstärkung des P-Regler von 4 auf 10 und warten Sie bis der Regelkreis wieder eingeschwungen ist.

Beobachten Sie das Verhalten.



Die Regeldifferenz zwischen Sollwert und Istwert wird mit der Erhöhung der Verstärkung K von 4 auf 10 wesentlich kleiner. Allerdings schafft es der P-Regler auch hier nicht, den Istwert auf den Sollwert zu bringen. Wir erhalten aus dem oben beschriebenen Grund ebenso eine bleibende, wenn auch wesentlich kleinere Regeldifferenz ($e = w - x$).

Die Größe des Stellsignals y im eingeschwungenen Zustand lässt sich aus der Regeldifferenz ($w-x$) bzw. dem erreichten Istwert x und dem Verstärkungsfaktor K berechnen:

$$\text{Stellsignal } y = K * (w - x) = 10 * (2 - 1,71) = 2,9$$

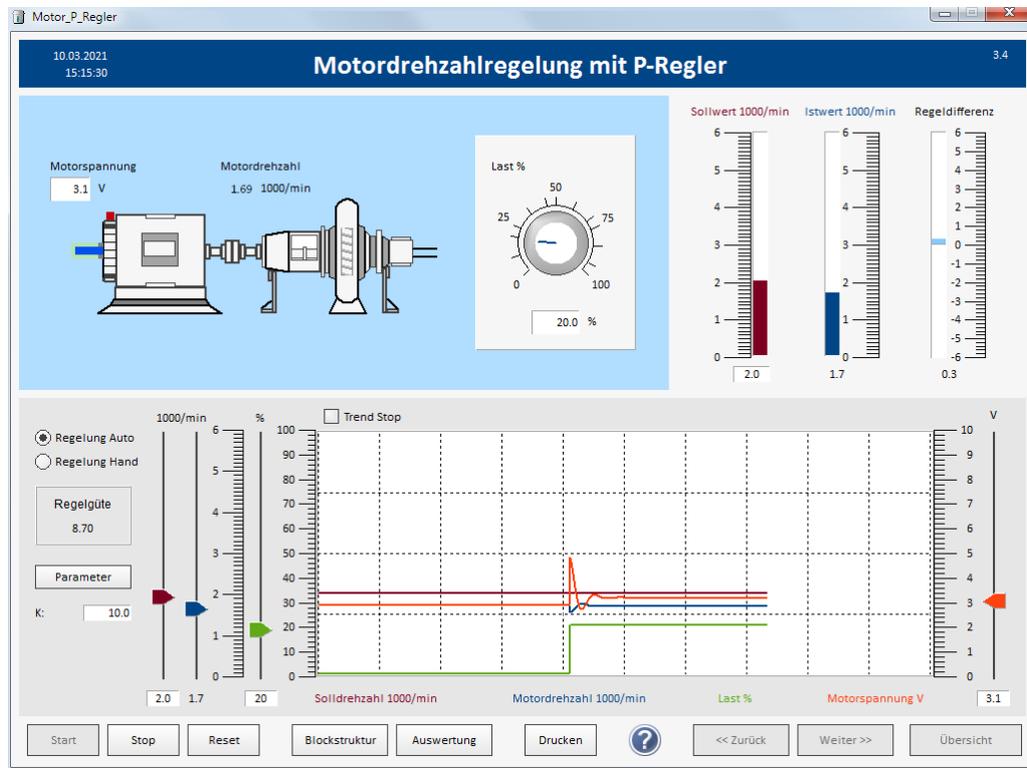
(Über „Auswertung“ lässt sich der Istwert x genauer ablesen als über das obige Bild)

Auch auf eine Störung (Veränderung der Last) reagiert der P-Regler. Hierfür erhält man ebenso eine bleibende Regeldifferenz.

Aufgabe 7:

Verändern Sie die Last von 0% auf 20%.

Was passiert?



Der P-Regler reagiert auf die Störung, die Regeldifferenz bleibt.

Wie am Einschwingverhalten zu sehen ist, reagiert der P-Regler sofort und schnell auf Sollwert- und Störwertänderungen (Führungs- und Störverhalten).

9.2.3 Regelung mit I-Regler

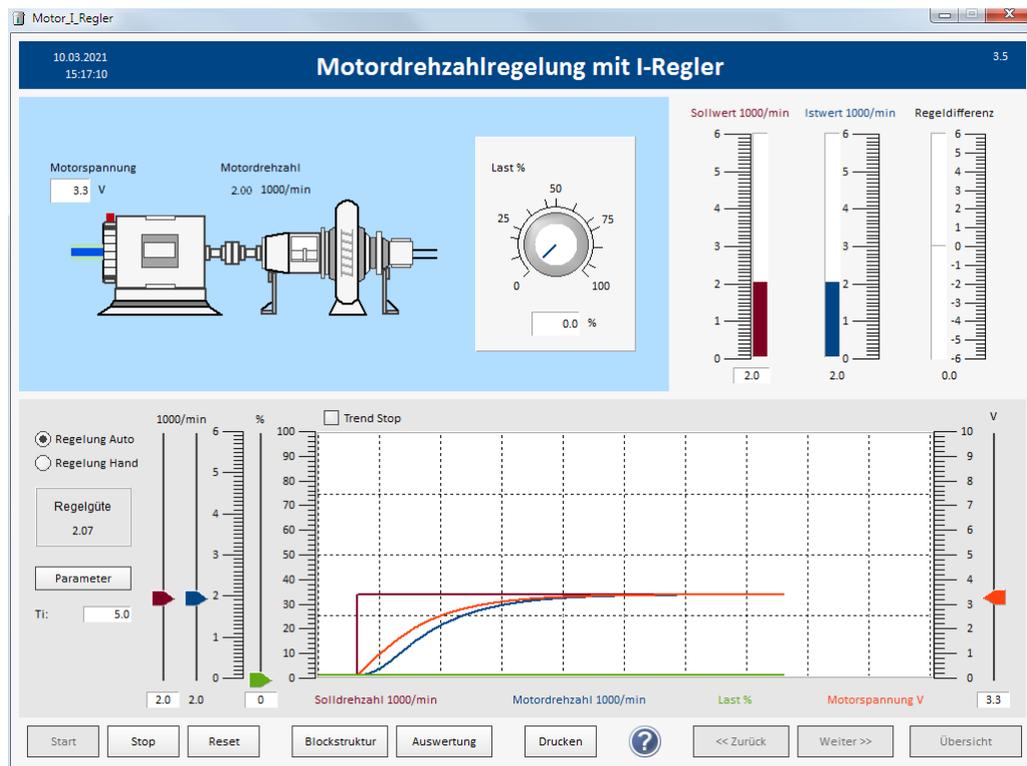
Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.5 „Regelung mit I-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

Aufgabe 8:

Verändern Sie den Sollwert auf 2 (1000/min).

Was passiert?



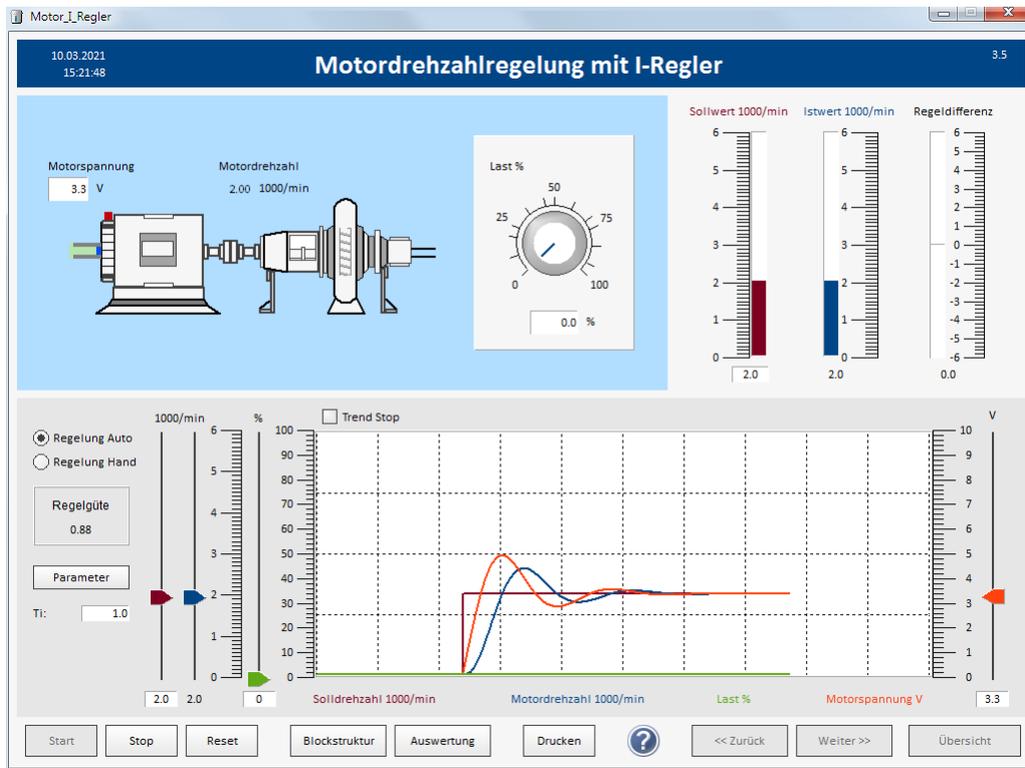
Die Motordrehzahl wird langsam durch den I-Regler erhöht. Der Istwert erreicht den Sollwert nach einer langen Zeitspanne.

Aufgabe 9:

Drücken Sie „Reset“.

Verändern Sie die Zeitkonstante T_i auf 1 und geben Sie einen Sollwertsprung von 0 auf 2 (1000/min) vor.

Was passiert?



Durch die Reduzierung der Integrierzeit auf 1 fängt der Regelkreis an zu schwingen. Der Istwert erreicht aber nach einer Zeitspanne den Sollwert.

Info:

Wenn ein I-Anteil (Integrator) im Regler vorhanden ist, schafft es der Regler entweder den Istwert nach einer Einschwingphase auf den Sollwert zu bringen oder der Regelkreis wird instabil.

9.2.4 Regelung mit PI-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Punkt 3.6 „Regelung mit PI-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

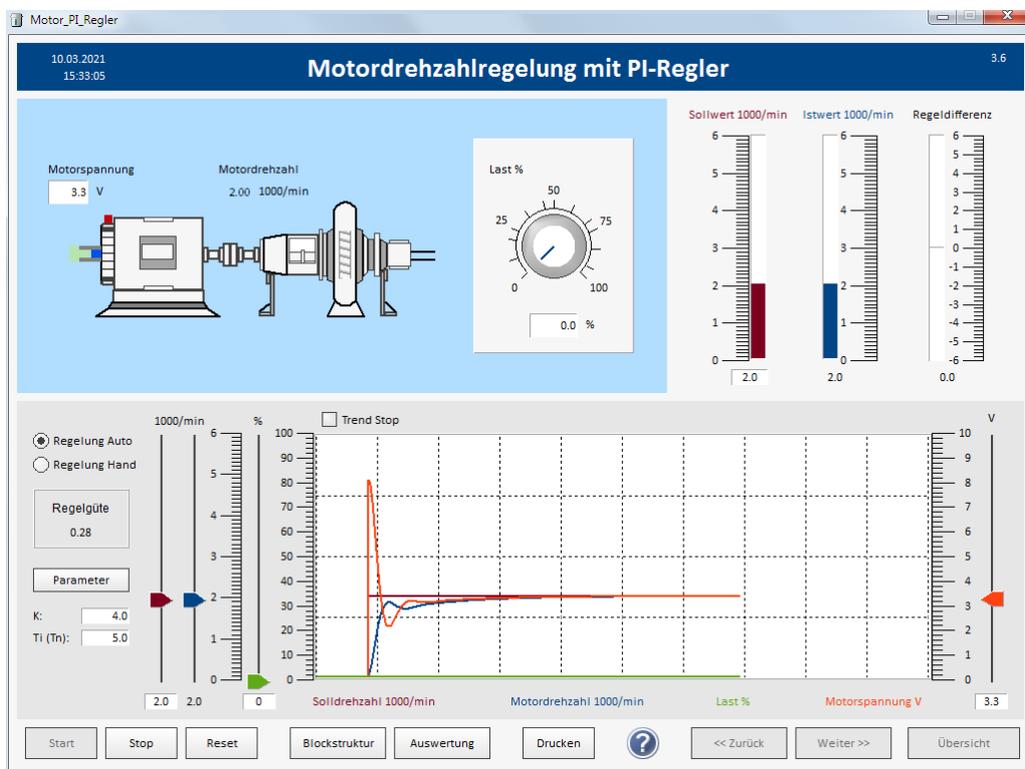
Aufgabe 10:

Behalten Sie die eingestellten Parameter bei:

Verstärkung $K = 4$, Nachstellzeit $T_i = 5$.

Verändern Sie den Sollwert von 0 auf 2 (1000/min).

Beobachten Sie das Einschwingverhalten.



Der Istwert (Regelgröße Motordrehzahl) des Regelkreises mit dem PI-Regler und den eingestellten Parametern erreicht ohne Überschwingen den neuen Sollwert (Führungsgröße Solldrehzahl).

Der Wert für die Regelgüte stellt sich auf 0,28 ein.

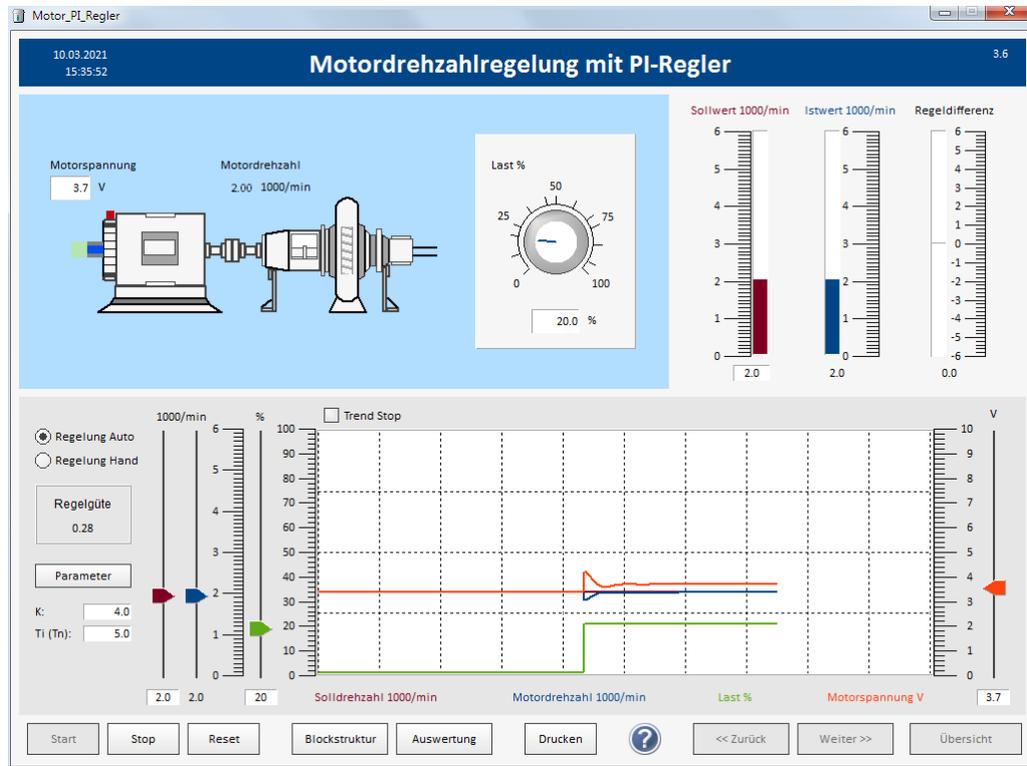
Da der Sollwert geändert wurde, handelt es sich hier um die Untersuchung des Führungsverhaltens.

Aufgabe 11:

Untersuchen Sie das Störverhalten.

Wenn der Regelkreis eingeschwungen ist, verändern Sie die Last von 0% auf 20%.

Beobachten Sie das Verhalten.



Die größere Last bewirkt eine Verkleinerung der Motordrehzahl. Der Regler versucht dem entgegen zu wirken und vergrößert die Motorspannung. Nach einer kurzen Einschwingphase erreicht der Istwert wieder den Sollwert.

Da der Regelkreis auf eine Störwertänderung reagiert spricht man in diesem Fall vom Störverhalten.

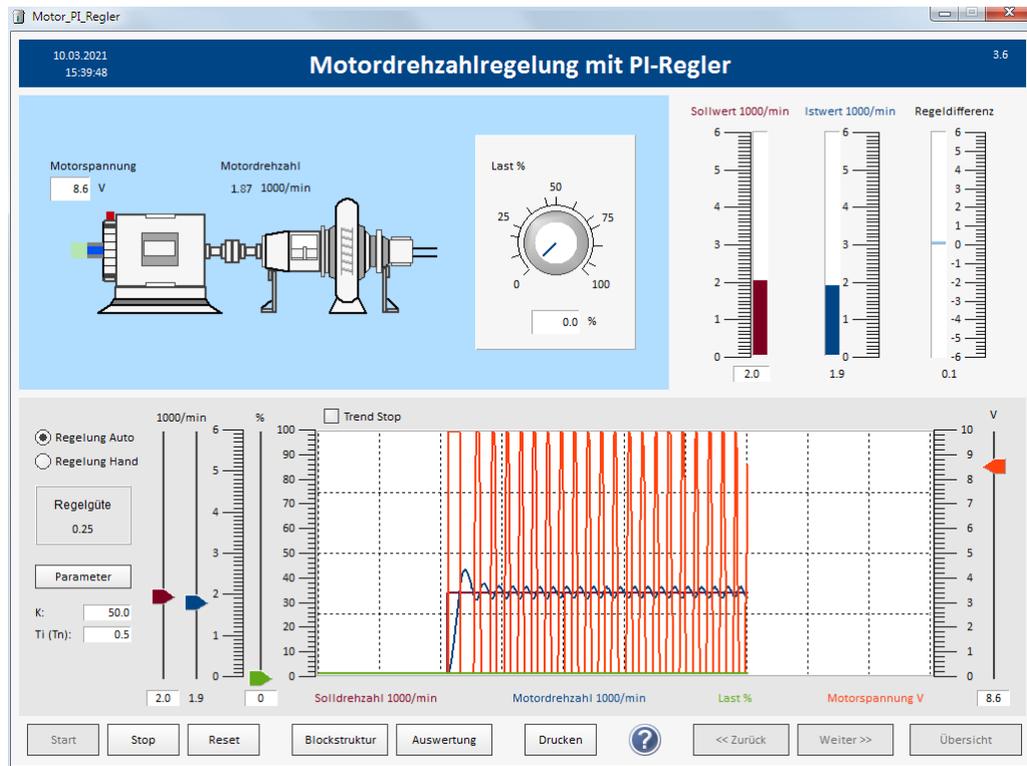
Aufgabe 12:

Drücken Sie „Reset“.

Stellen Sie die Reglerparameter auf Verstärkung $K = 50$ und Nachstellzeit $T_i = 0.5$.

Geben Sie einen Sollwertsprung von 0 auf 2 (1000/min) vor.

Beobachten Sie das Verhalten.



Der Regelkreis wird mit diesen Reglerparametern instabil. Der Istwert (Regelgröße Motordrehzahl) schwingt um den Sollwert (Führungsgröße Solldrehzahl)

Mit diesen Reglerparametern ist der PI-Regler für diesen Regelkreis nicht geeignet.

Aufgabe 13:

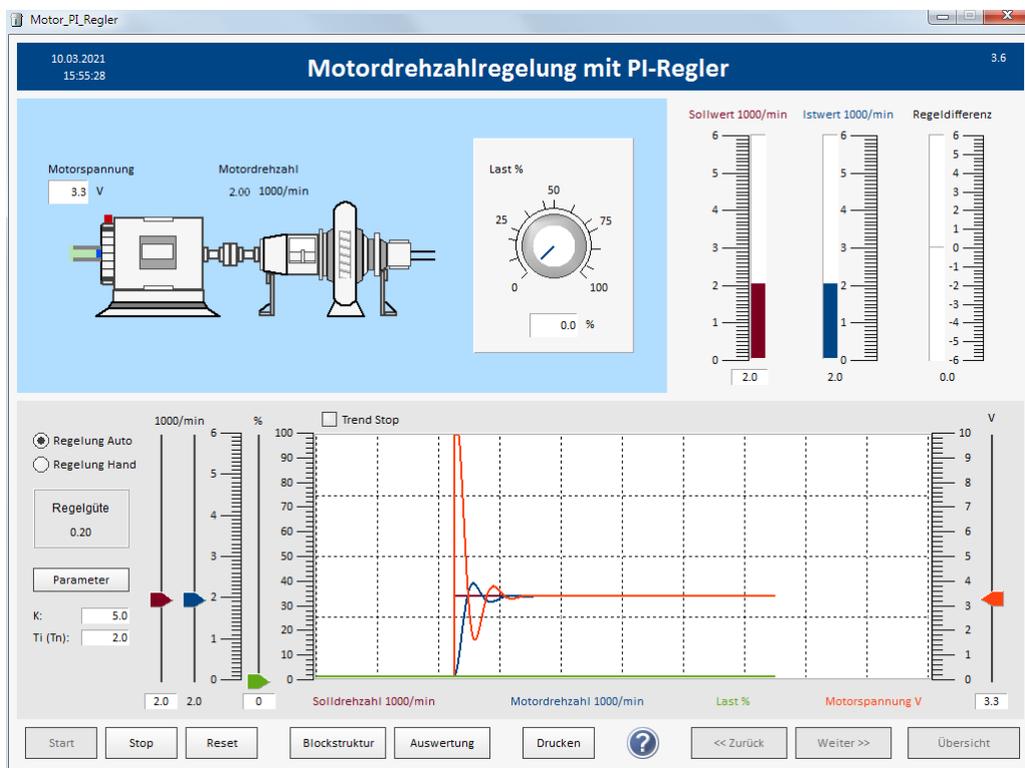
Die in dem Kasten mit „Regelgüte“ bezeichnete Zahl gibt einen Wert über die Güte des eingeschwingenen Regelkreises an. Je kleiner die Zahl wird, desto schneller ist der Regelkreis eingeschwingen, d.h. der Istwert hat den Sollwert erreicht und verändert sich nicht mehr.

Versuchen Sie durch Verstellen der Reglerparameter den Wert für die Regelgüte zu verkleinern.

Mit den Reglerparametern $K = 4$ und $T_i = 5$ wurde eine Regelgüte von 0,28 erreicht.

Damit die Regelgüte bei allen Versuchen vergleichbar ist, müssen die Versuche mit den gleichen Anfangszuständen gestartet werden. Hierfür drücken Sie am besten „Reset“. Sollzahl (Sollwert), Motordrehzahl (Regelgröße), Stellsignal (Motorspannung) und Störung (Last) erhalten wieder ihre Anfangswerte.

Verändern Sie die Reglerparameter und stellen Sie dann den Sollwert auf 2 (1000/min). Warten Sie bis der Regelkreis eingeschwingen ist.



Mit den Parametern $K = 5$ und $T_i = 2$ erreicht man z.B. eine Regelgüte von 0,2.

Führen Sie die Versuche mit weiteren Reglerparametern durch:

- Reset drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 2 stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwingen ist.

Um ein aperiodisches Einschwingverhalten (ohne Überschwingen) zu erreichen, können Sie die voreingestellten Parameterwerte nehmen.

9.2.5 Regelung mit PID-Regler

Gehen Sie zur „Übersicht“ und wählen Sie Punkt 3.7 „Regelung mit PID-Regler“.

Drücken Sie „Start“.

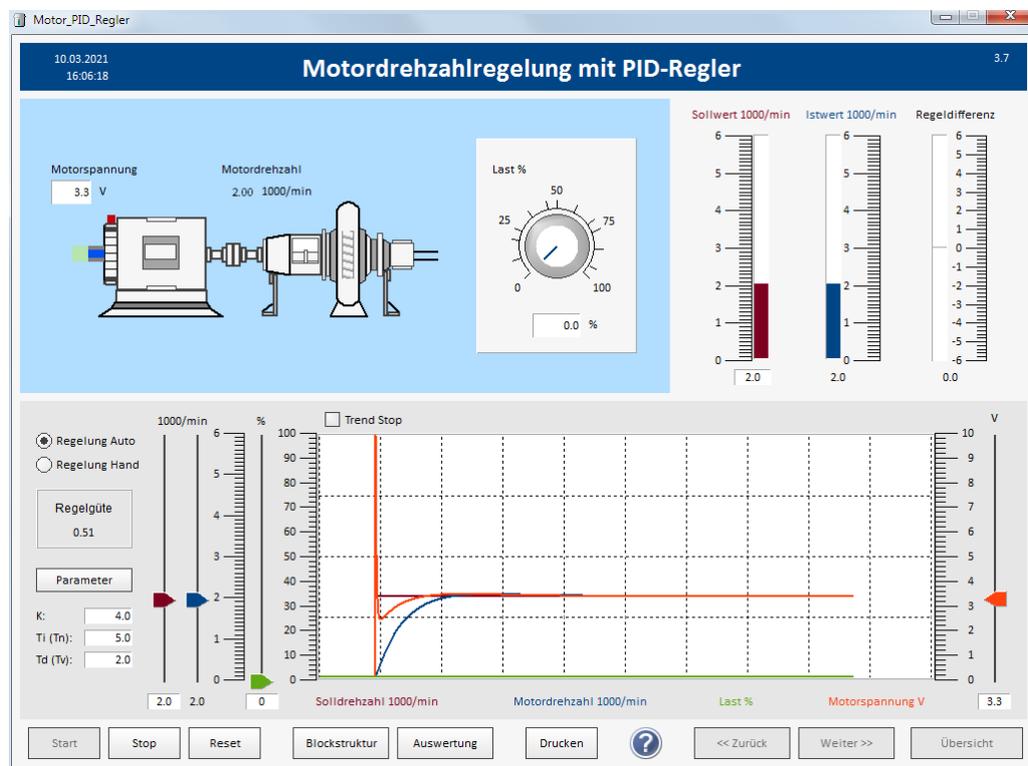
Aufgabe 14:

Untersuchen Sie das Führungsverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 4$, Nachstellzeit $T_i = 5$, Vorhaltezeit $T_d = 2$.

Ändern Sie den Sollwert auf 2 (1000/min).

Beobachten Sie das Verhalten.



Der Regelkreis geht mit einem kleinen Überschwingen in einen stabilen Zustand. Der Istwert erreicht den Sollwert.

Wie in der Trenddarstellung zu sehen ist, bewirkt die sprunghafte Änderung des Sollwertes einen Peak des Stellsignals. Dieser Peak wird durch den D-Anteil des Reglers ausgelöst. Die Ableitung einer sprunghaften Änderung bewirkt einen (unendlich) großen Wert.

Die Regelgüte geht auf 0,51 und ist damit schlechter als beim PI-Regler mit den Parametern $K = 4$ und $T_i = 5$.

Hinweis zur Trenddarstellung beim PID-Regler:

In der Trenddarstellung kann es vorkommen, dass der Peak nicht dargestellt wird. Sie können aber über „Auswertung“ (Darstellung der gespeicherten Signalwerte) und Auswahl eines entsprechenden Zeitbereichs sehen, dass der Peak vorhanden ist.

Aufgabe 15:

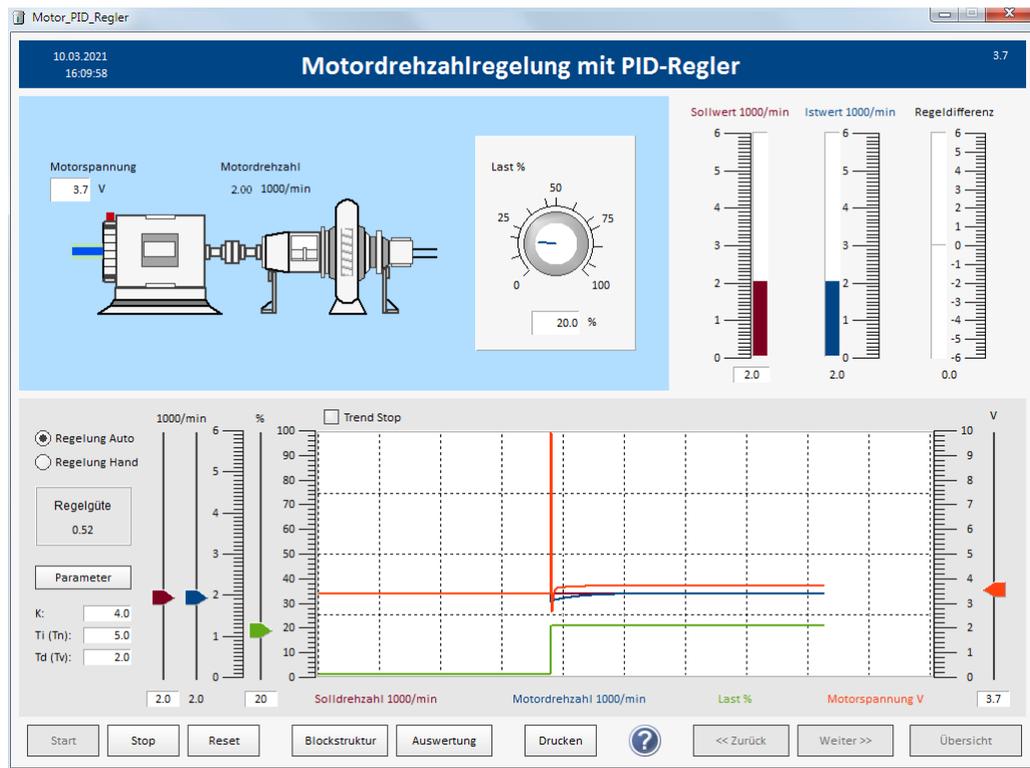
Untersuchen Sie das Störverhalten mit den voreingestellten Parametern:

Verstärkung $K = 4$, Nachstellzeit $T_i = 5$, Vorhaltezeit $T_d = 2$.

Stellen Sie die Soll Drehzahl auf 2 (1000/min) und warten Sie bis der Regelkreis eingeschwungen ist.

Ändern Sie die Last von 0% auf 20%.

Beobachten Sie das Verhalten.

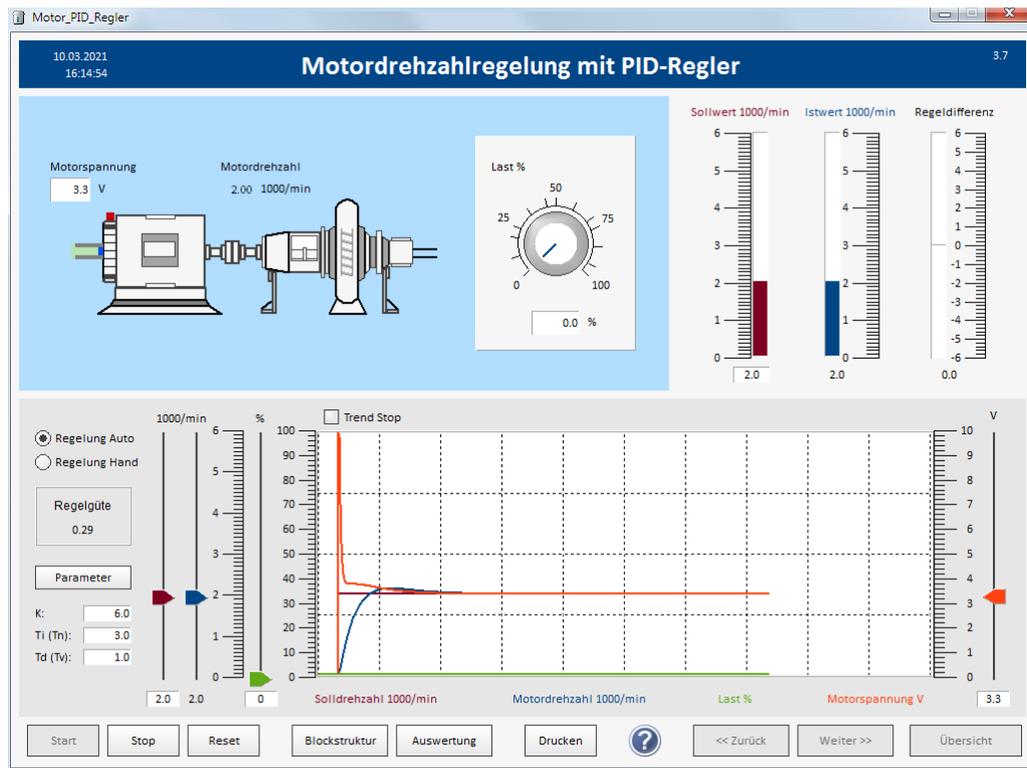


Der Regler regelt die Störung ohne Überschwingen aus.

Aufgabe 16:

Führen Sie Versuche für das Führungsverhalten mit weiteren Reglerparametern durch, um die Regelgüte zu verbessern:

- Reset drücken
- Reglerparameter einstellen
- Sollwert auf 2 (1000/min) stellen
- Warten bis der Regelkreis eingeschwungen ist.



Mit den Parametern Verstärkung $K = 6$, Nachstellzeit $T_i = 3$ und Vorhaltezeit $T_d = 1$ erhalten Sie z.B. eine Regelgüte von 0,29.

Info:

In der Praxis wird hauptsächlich der PI-Regler eingesetzt. Vielfach wird, wenn ein PID-Regler eingesetzt wird, der D-Anteil weggedreht, so dass der Regler nur als PI-Regler arbeitet.

Dies liegt unter anderem daran, dass das D-Verhalten in einem Regelkreis schwer einzuschätzen ist. Prinzipiell hat man mit dem D-Anteil die Möglichkeit, die Regelung schneller zu machen (was aber oft sehr schwer ist).

Der D-Anteil betrachtet die Änderung zwischen Soll- und Istwert. Nimmt die Änderung zu, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird größer, dann addiert der D-Anteil einen berechneten Wert zum Stellsignal. Wird die Änderung zwischen Soll- und Istwert kleiner, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert nimmt stetig ab, dann zieht der D-Anteil einen berechneten Wert vom Stellsignal ab. Im Prinzip berücksichtigt der D-Anteil den Trend, ob die Differenz zwischen Soll- und Istwert zu- oder abnimmt. Nimmt die Differenz zu, verstärkt der D-Anteil das Stellsignal, wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert kleiner, wird das Stellsignal verkleinert.

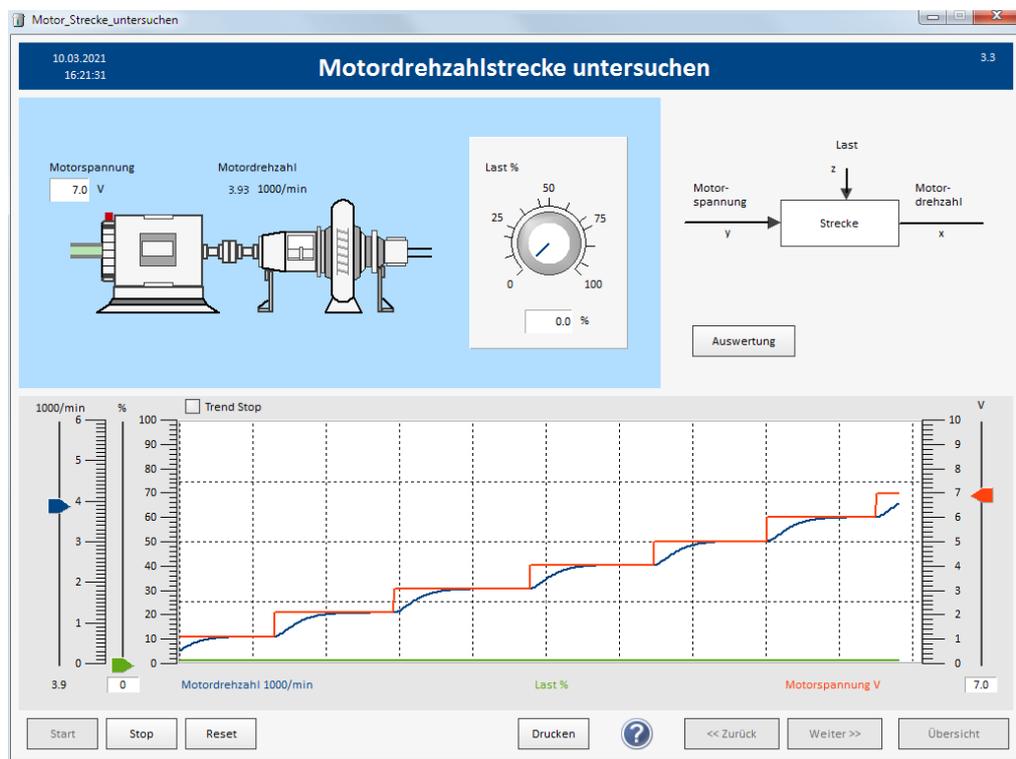
9.3 Strecke untersuchen

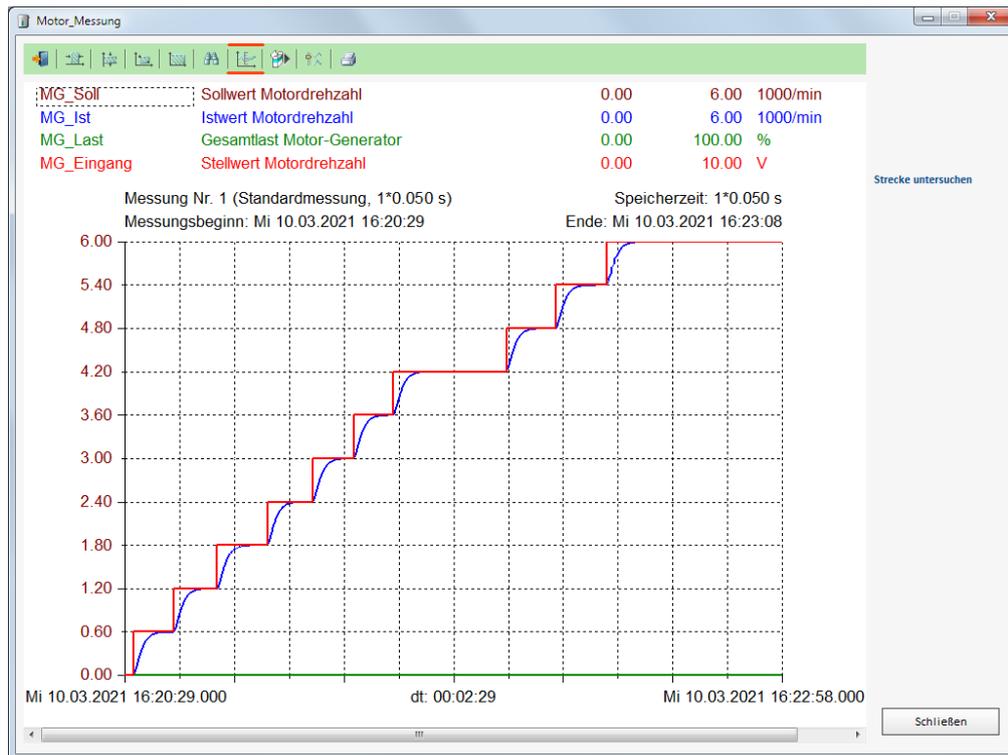
Wählen Sie bei der Motordrehzahlregelung den Punkt 3.3 „Strecke untersuchen“.

Bei der Motordrehzahlstrecke handelt es sich um eine Strecke mit Ausgleich. Bei einer sprungartigen Änderung des Stellsignals schwingt der Istwert (Regelgröße) nach einer endlichen Zeit auf einen konstanten Wert ein.

Aufgabe 17:

Drücken Sie „Start“ und erhöhen das Stellsignal jeweils um 1V. Beobachten Sie das Verhalten der Motordrehzahl (Regelgröße).





Das Verhalten der Motordrehzahl ist über den ganzen Bereich von 0V bis 10V gleich.

Die Strecke ist nicht abhängig vom Arbeitspunkt. Dies ist für viele Strecken nicht so.

Ist das Streckenverhalten unterschiedlich wird auch das Regelkreisverhalten je nach Arbeitspunkt unterschiedlich sein. Deshalb muss bei diesen Strecken immer berücksichtigt werden, in welchem Arbeitspunkt die Regelung betrieben werden soll.

9.4 Reglereinstellverfahren

Um die Reglereinstellverfahren, z.B. nach Chien/Hrones/Reswick zu nutzen, müssen die Strecken untersucht werden.

Auf das Eingangssignal des Systems (Stellsignal der Strecke) wird ein Einheitssprung gegeben. Das Verhalten des Ausgangssignals des Systems (Regelgröße) muss dann ausgemessen werden.

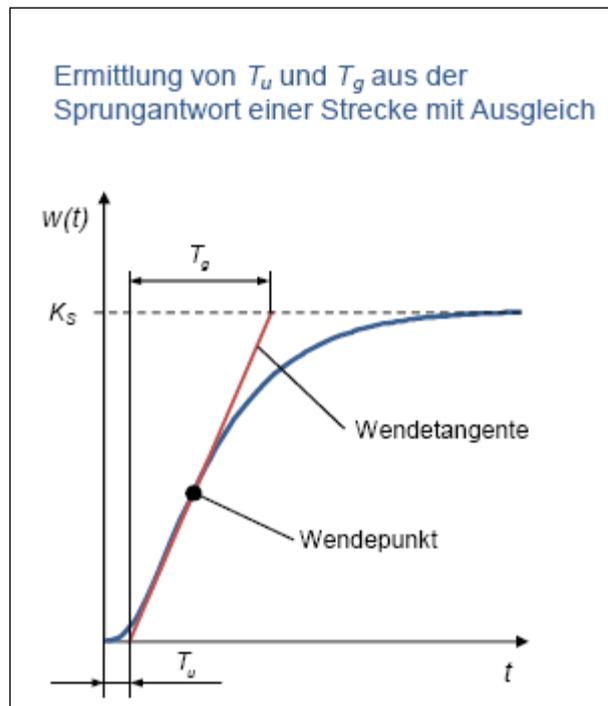
Für die Reglereinstellverfahren für Strecken mit Ausgleich müssen die Parameter T_u , T_g und K_s bestimmt werden, wie in der unteren Abbildung angegeben.

Es bedeuten:

$T_e = T_u =$ Verzugszeit

$T_b = T_g =$ Ausgleichszeit

$K_s =$ Übertragungsbeiwert der Regelstrecke mit Ausgleich



In der neuen Norm werden die Verzugszeit mit T_e , die Ausgleichszeit mit T_b und der Wendepunkt mit P bezeichnet.

Da noch in der überwiegenden Literatur die Bezeichnungen T_u und T_g benutzt werden, verwenden wir beide Bezeichnungen.

Die Reglerparameter können dann aus der Einstelltabelle nach Chien/Hrones/Reswick errechnet werden:

Tabelle 6: Gleichungen zur Berechnung der Reglerparameter nach Chien/Hrones/Reswick

Regler- verhalten	Gütekriterium			
	Mit 20 % Überschwingung		Aperiodischer Regelvorgang	
	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.

[Die Tabelle wurde übernommen aus: E. Samal, Grundriss der praktischen Regelungstechnik, Oldenbourg]

Beachten Sie bitte, dass laut neuer Norm folgende Bezeichnungen genutzt werden: $T_u = T_e$, $T_g = T_b$

Durch Klick auf „Auswertung“ erhalten Sie die gespeicherten Signalverläufe.

Mit Hilfe der oberen Buttonleiste können Sie Zeit- und Darstellungsausschnitte verändern. Versuchen Sie den interessanten Bereich zu zoomen. Klicken Sie auf den Signalnamen „MG_Ist“ (Regelgröße Motordrehzahl) und untersuchen Sie den Signalverlauf des blauen Signals. Versuchen Sie durch Festhalten und Ziehen die Steigung der Motordrehzahlkurve im Wendepunkt zu bestimmen.

Aus dem oben dargestellten Kurvenverlauf kann die Steigung der Tangente im Wendepunkt ungefähr abgelesen werden: $dx/dt = 0,22 \text{ 1000/min/s}$.

Nach der sprunghaftigen Änderung des Stellsignals von 0V auf 1V geht die Motordrehzahl von 0 auf 0,6 (1000/min).

Damit lässt sich die Ausgleichszeit T_g berechnen:

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

$$T_g = (0,6 - 0) / 0,22 = 2,727s$$

Da wir für das Stellsignal eine Sprunghöhe von 1V eingegeben haben und die Motordrehzahl sich von 0 auf 0,6 erhöhte, ist $K_s = 0,6$.

$$K_s = 0,6$$

Die Verzugszeit T_u lässt sich ausmessen und ist ungefähr 0,3s.

$$\text{Also: } T_e = T_u = 0,3s \quad T_b = T_g = 2,727s \quad K_s = 0,6$$

Durch Einsetzen der Werte in die Tabelle erhalten wir für den PI-Regler:

PI-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,6 * T_b / (K_s * T_e) \quad 9,09$$

$$T_n = T_b \quad 2,73$$

Führungsverhalten aperiodisch

$$K = 0,35 * T_b / (K_s * T_e) \quad 5,30$$

$$T_n = 1,2 * T_b \quad 3,27$$

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$$K = 0,7 * T_b / (K_s * T_e) \quad 10,61$$

$$T_n = 2,3 * T_e \quad 0,69$$

Störverhalten aperiodisch

$$K = 0,6 * T_b / (K_s * T_e) \quad 9,09$$

$$T_n = 4 * T_e \quad 1,20$$

Mit diesen Reglerparametern ergeben sich folgende Regelkreisverhalten bei einem Führungssprung der Soll-drehzahl von 0 auf 2 (1000/min)

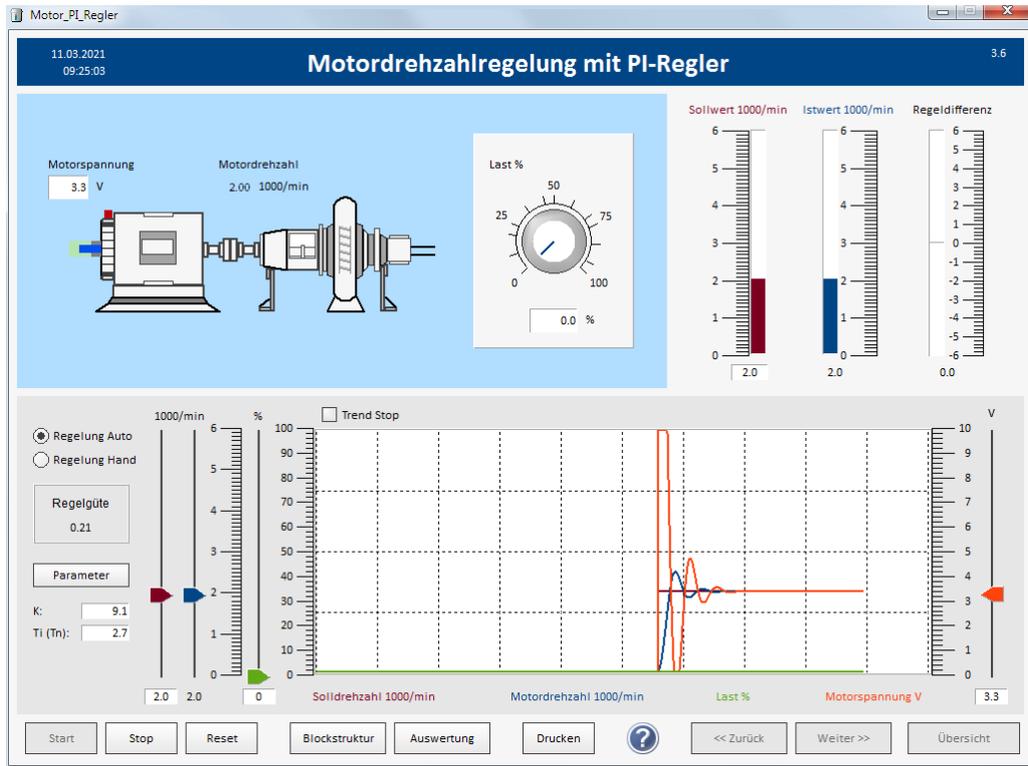


Abbildung 9-1: Führungsverhalten mit 20% Überschwngen

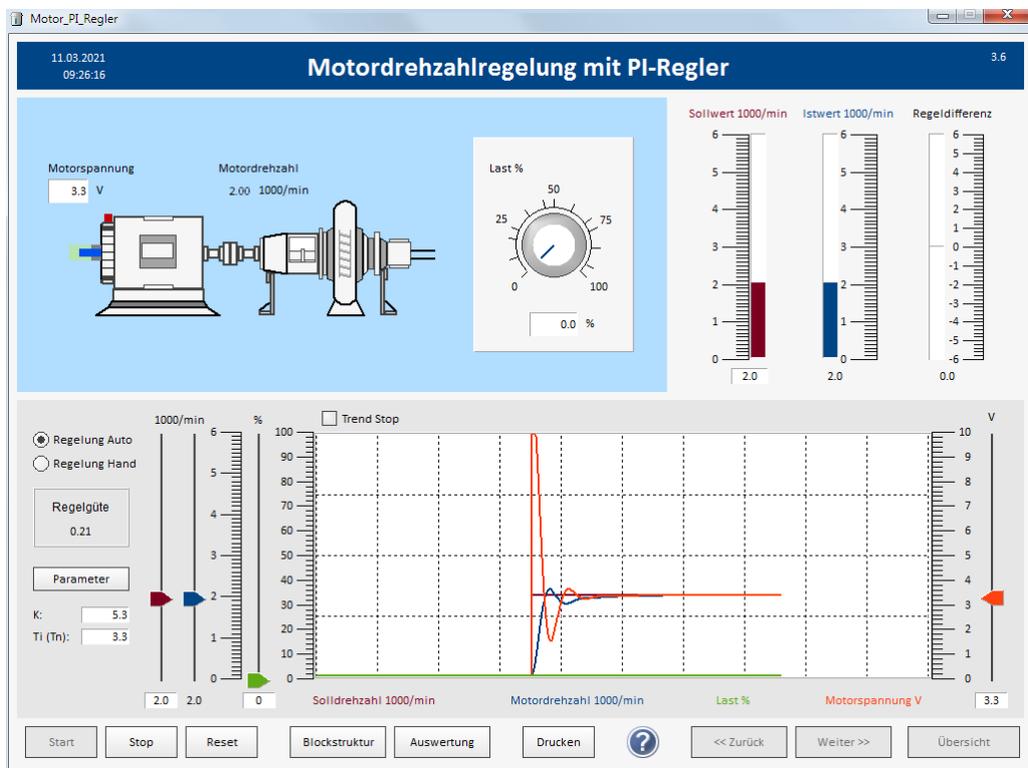


Abbildung 9-2: Führungsverhalten aperiodisch

Störsp rung der Last von 0% auf 20%.

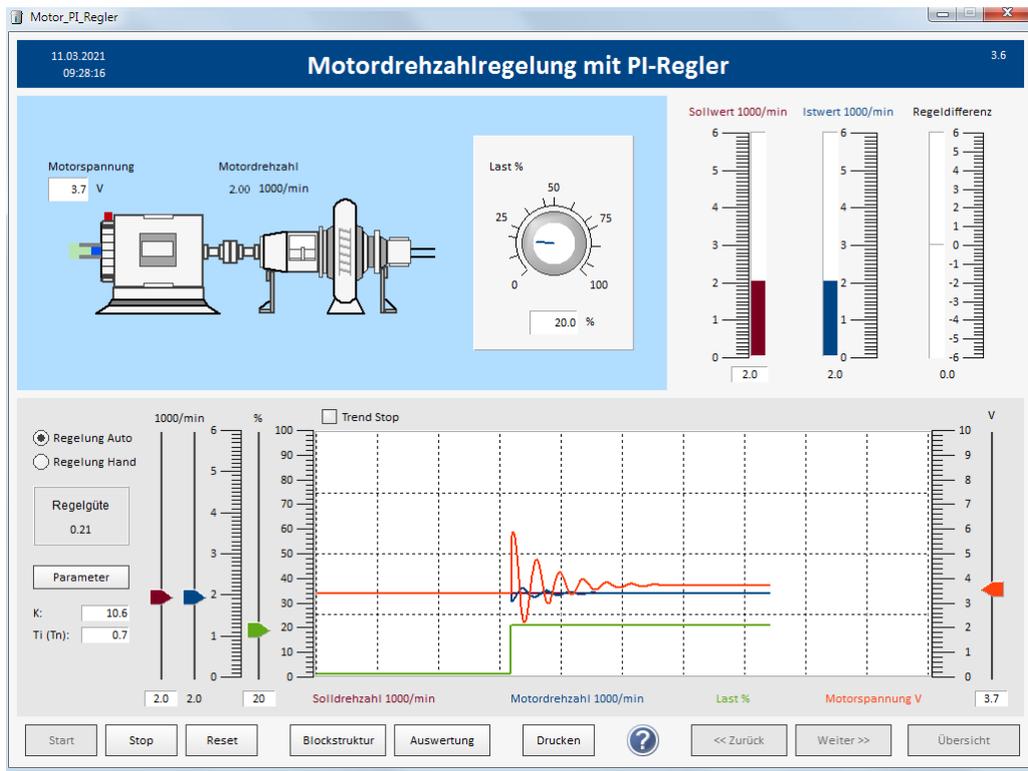


Abbildung 9-3: Störverhalten mit 20% Überschwingen

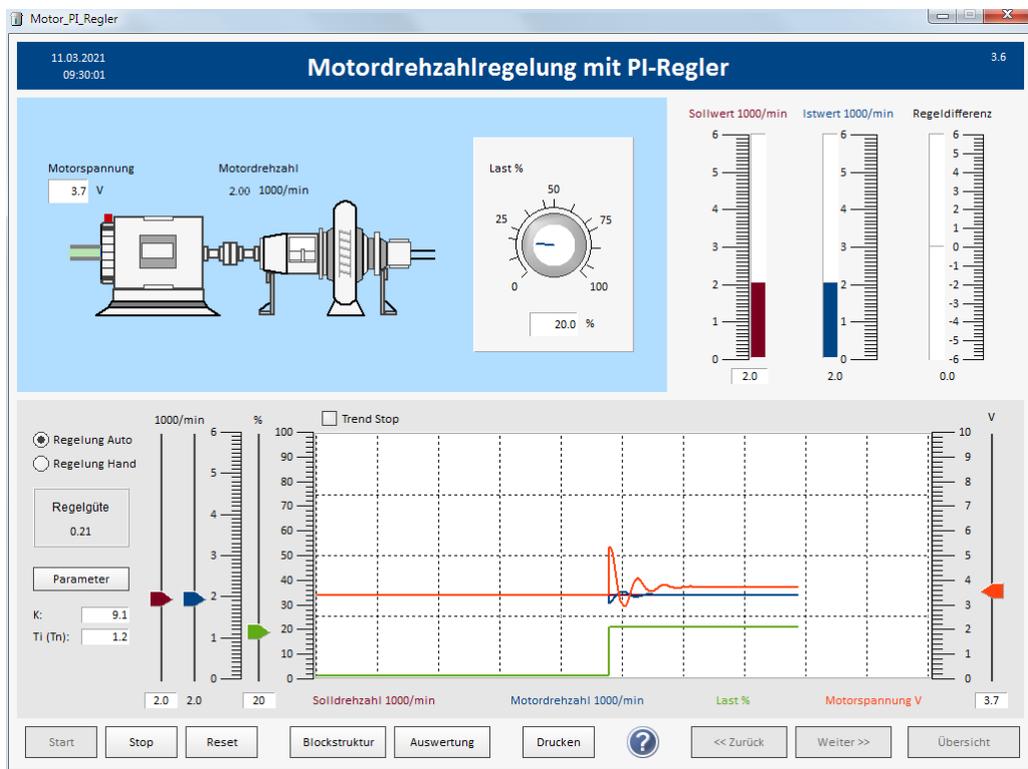


Abbildung 9-4: Störverhalten aperiodisch

Für den PID-Regler ergeben sich laut Tabelle folgende Parameter:

PID-Regler

Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	14,39
$T_n = 1,35 \cdot T_b$	3,68
$T_d = 0,47 \cdot T_e$	0,14

Führungsverhalten aperiodisch

$K = 0,6 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	9,09
$T_n = T_b$	2,73
$T_d = 0,5 \cdot T_e$	0,15

Störverhalten mit 20% Überschwingen

$K = 1,2 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	18,18
$T_n = 2 \cdot T_e$	0,60
$T_d = 0,42 \cdot T_e$	0,13

Störverhalten aperiodisch

$K = 0,95 \cdot T_b / (K_s \cdot T_e)$	14,39
$T_n = 2,4 \cdot T_e$	0,72
$T_d = 0,42 \cdot T_e$	0,13

Mit diesen Reglerparametern ergeben sich folgende Regelkreisverhalten bei einem Führungssprung der Solldrehzahl von 0 auf 2 (1000/min).

Als Vorhaltezeit wurde 0,5s genommen, da die Eingabe auf 0,5s beschränkt ist.

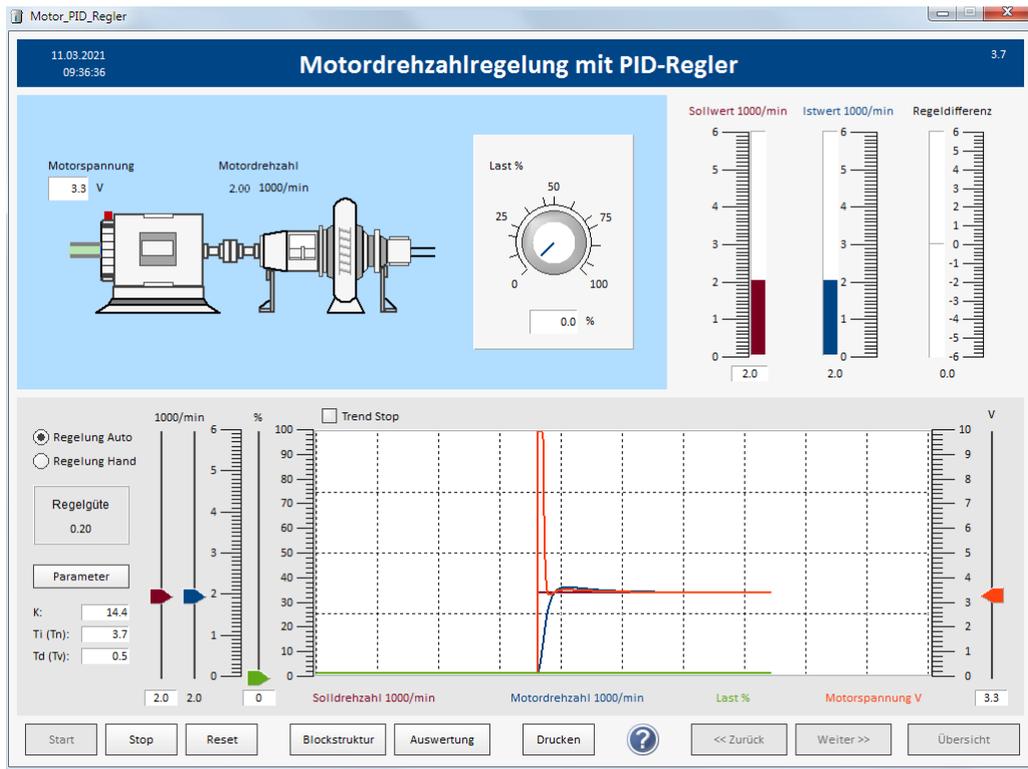


Abbildung 9-5: Führungsverhalten mit 20% Überschwingen

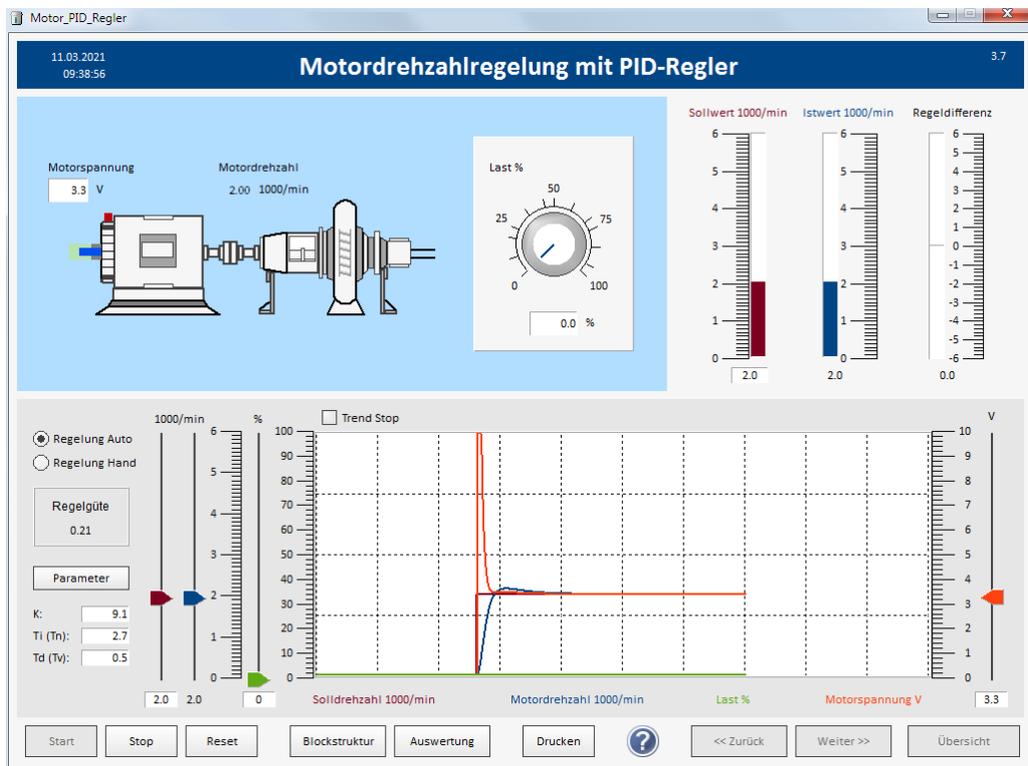


Abbildung 9-6: Führungsverhalten aperiodisch

Störsprung der Last von 0% auf 20%.

Als Vorhaltezeit wurde 0,5s genommen, da die Eingabe auf 0,5s beschränkt ist.

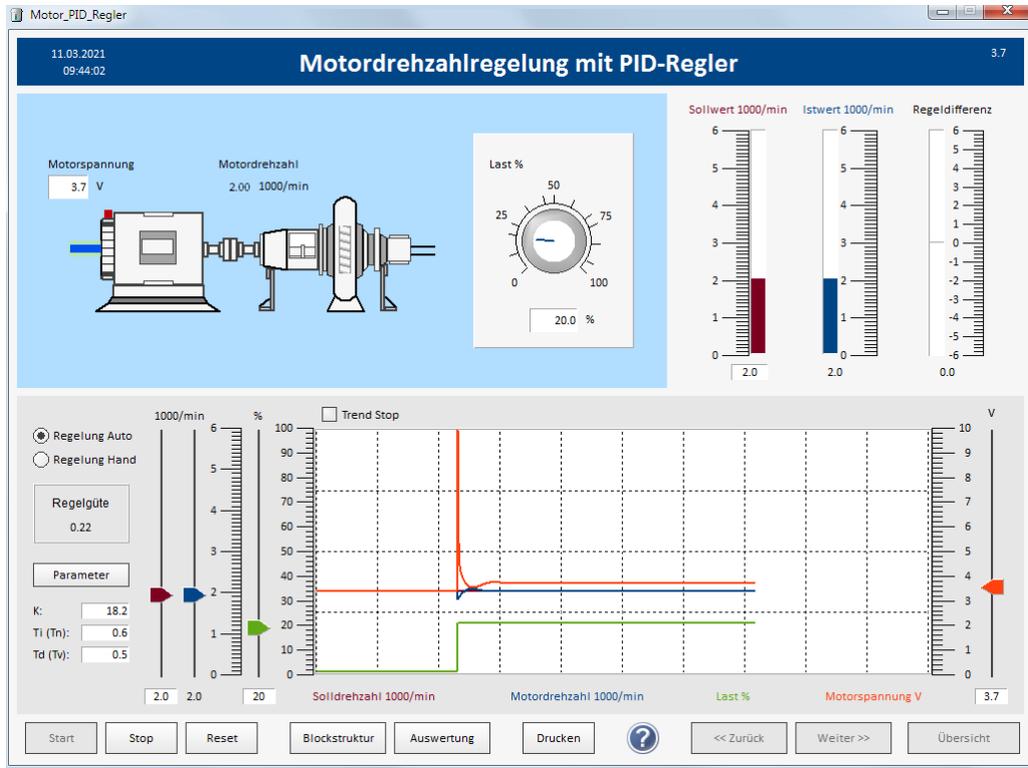


Abbildung 9-7: Störverhalten mit 20% Überschwingen

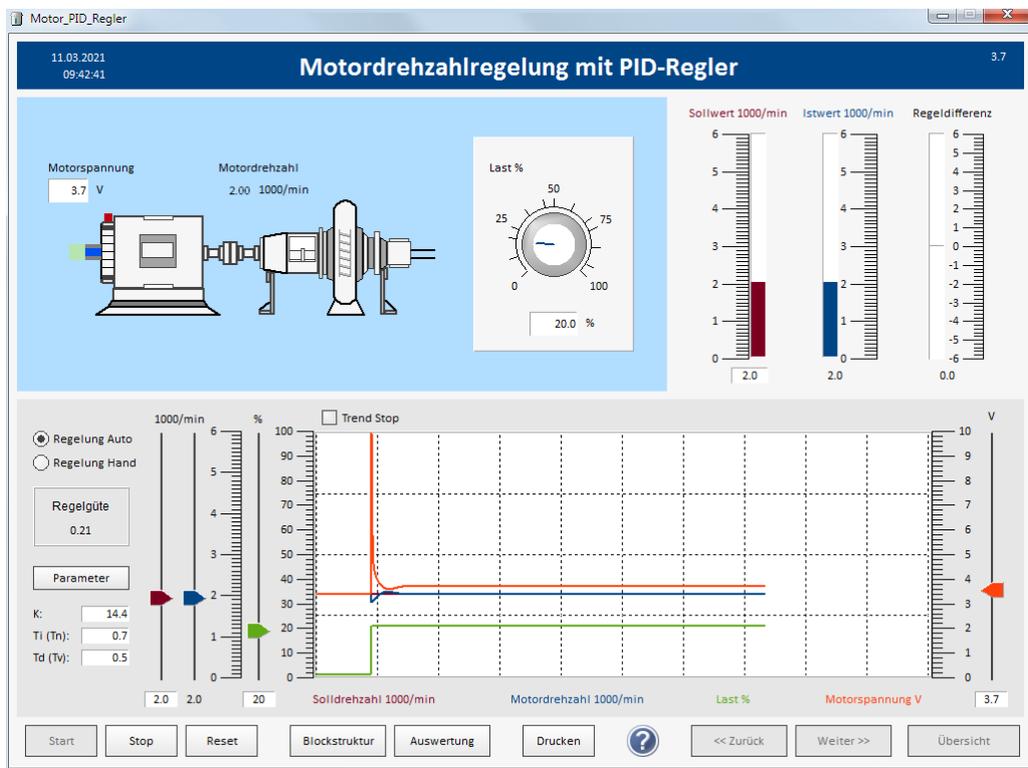


Abbildung 9-8: Störverhalten aperiodisch

9.5 Beurteilung Reglereinstellverfahren

Reglereinstellverfahren sind empirisch bestimmte Verfahren, die geeignet sind, um Daumenwerte für gute Reglerparameter zu berechnen.

Die Einstellungen für die Reglerparameter unterscheiden zwischen Stör- und Führungsverhalten. Es werden unterschiedliche Reglerparameter berechnet.

Will man mit seinen Reglerparametern beide Fälle (Stör- und Führungsverhalten) abdecken, muss man einen Kompromiss zwischen den berechneten Parametern des Störverhaltens und des Führungsverhaltens eingehen.

Die obigen Beispiele zeigen, dass man mit den berechneten Reglerparametern ein vernünftiges Regelkreisverhalten erhält. Allerdings entspricht das Verhalten nicht genau dem Einschwingverhalten, wie es in der Tabelle gewählt wurde.

Dass das System nicht genau aperiodisch bzw. mit 20% Überschwingen eingeschwungen ist, liegt auch daran, dass das Stellsignal teilweise in die Begrenzung gegangen ist und die Zeitkonstanten nicht exakt berechnet werden konnten.

Aber bei den oben gezeigten Beispielen und Aufgaben für die Motordrehzahlregelung waren die von Chien/Hrones/Reswick vorgeschlagenen Reglerparameter gut geeignet für eine vernünftige Regelung.

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.: +49 40 754 922 30
www.schoop.de
Email: info@schoop.de