

Jörg Kahlert

# Regelungstechnik spielerisch

Eine experimentelle Einführung  
in die Regelungstechnik

Die Regelungstechnik ist ein Pflichtfach in vielen Studiengängen und Ausbildungsberufen, wird aber von den meisten Studierenden und SchülerInnen als sehr “spröde” empfunden, da der entsprechende Lehrstoff häufig sehr abstrakt (d. h. ohne allzu großen praktischen Bezug) vermittelt wird. Dieses Buch wählt daher einen anderen Ansatz, indem es dem Lernenden die wichtigsten Grundideen der Regelungstechnik spielerisch (nämlich auf Grundlage selbst durchgeführter Experimente) näher bringt. Die Basis dafür bildet die Software-Experimentierumgebung **Regelungstechnik-Spielwiese** des Ingenieurbüros Dr. Kahlert. Diese enthält eine Reihe typischer, praxisnaher Regelstrecken und Reglertypen, die wie in klassischen Hardwareumgebungen miteinander “verdrahtet” und somit zum Aufbau unterschiedlichster Regelkreise genutzt werden können. In insgesamt etwa 40 Experimenten werden schwerpunktmäßig u. a. die folgenden Themen behandelt:

- Komponenten eines Regelkreises
- Festwert- und Folgeregelung
- Regelstrecken mit und ohne Ausgleich
- Statische Kennlinien von Regelstrecken (linear/nichtlinear)
- Sprungantwort einer Regelstrecke
- Typen von Regelstrecken (P-T<sub>1</sub>, P-T<sub>2</sub>, I-, ...)
- Übertragungsbeiwerte und Zeitkonstanten
- Struktur des PID-Reglers
- Güteanforderungen an einen Regelkreis
- Entwurfsverfahren für PID-Regler
- Zweipunkt- und Dreipunkt-Regler

## Über den Autor:

Dr.-Ing. Jörg Kahlert leitet ein Ingenieurbüro für Software-Engineering & Automatisierungstechnik in Hamm. Er lehrt die Fächer “Steuer- und Regelungstechnik” und “Automatisierungstechnik” an der SRH Fachhochschule Hamm sowie an der Fachschule für Technik am Max-Born-Berufskolleg in Recklinghausen.



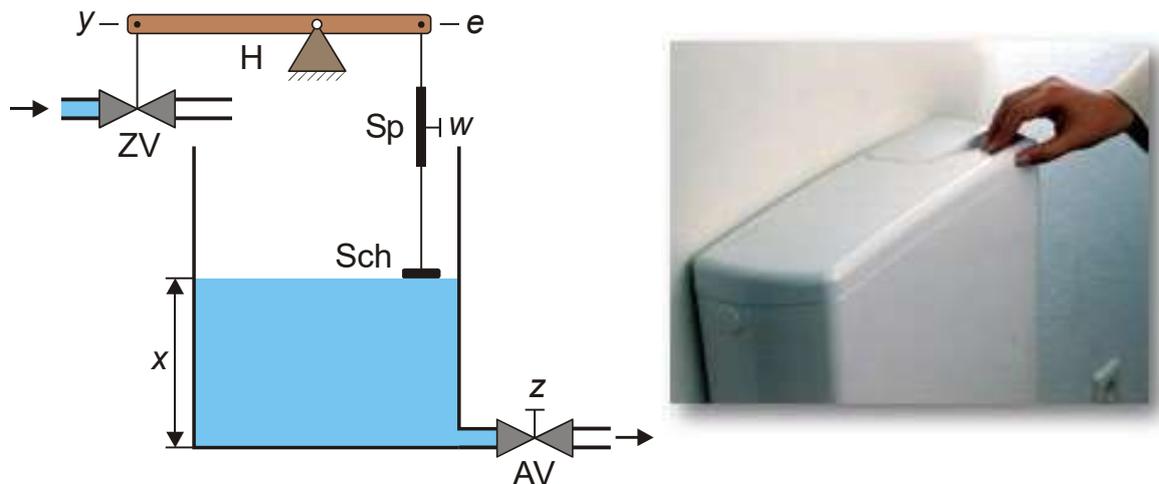
# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>7</b>
1.1	Aufgaben der Regelungstechnik .....	7
1.2	Steuern oder Regeln? .....	8
1.3	Regelkreise im Wirkungsplan.....	12
1.4	Festwert- und Folgeregelung .....	13
1.4.1	Festwertregelung.....	14
1.4.2	Folgeregelung .....	15
1.5	Elemente und Größen des Regelkreises .....	16
<b>2</b>	<b>Die Regelstrecke</b>	<b>19</b>
2.1	Regelstrecken mit und ohne Ausgleich.....	20
2.2	Statisches Verhalten der Regelstrecke .....	26
2.3	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke .....	33
2.3.1	Proportional-Glied (P-T <sub>0</sub> -Glied).....	39
2.3.2	P-T <sub>1</sub> -Glied (Verzögerungsglied 1. Ordnung).....	42
2.3.3	P-T <sub>2</sub> -Glied (Verzögerungsglied 2. Ordnung).....	47
2.3.4	P-T <sub>n</sub> -Glied (Verzögerungsglied <i>n</i> -ter Ordnung) .....	52
2.3.5	Regelbarkeit .....	55
2.3.6	Integrier-Glied (I-Glied).....	56
2.3.7	I-T <sub>1</sub> -Glied .....	59
<b>3</b>	<b>Regelungen mit PID-Reglern</b>	<b>63</b>
3.1	Typen von Reglern.....	63
3.2	Generelle Anforderungen an eine Regelung.....	63
3.3	Der Proportional-Regler (P-Regler).....	65
3.4	Der Integral-Regler (I-Regler) .....	84
3.5	Der Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) .....	87
3.6	Der Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler).....	92
3.7	Der Proportional-Differential-Regler (PD-Regler).....	94
<b>4</b>	<b>Entwurf von PID-Reglern</b>	<b>98</b>
4.1	Anforderungen an den Regelkreis .....	98
4.1.1	Führungs- und Störverhalten.....	98
4.1.2	Gütekriterien für das Führungsverhalten .....	100

4.1.3	Gütekriterien für das Störverhalten .....	101
4.1.4	Problem der bleibenden Regeldifferenz .....	101
4.2	Geeignete Regler-Strecken-Kombinationen .....	102
4.3	PID-Entwurf nach <i>Ziegler/Nichols</i> .....	103
4.4	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones</i> und <i>Reswick</i> .....	109
4.4.1	Einstellregeln für Strecken mit Ausgleich .....	109
4.4.2	Einstellregeln für Strecken ohne Ausgleich .....	115
4.5	PID-Entwurf nach der T-Summen-Regel .....	119
4.6	Weitere Reglerentwürfe .....	123
4.6.1	Reglerentwurf für Licht-Regelstrecke .....	124
4.6.2	Reglerentwurf für Druck-Regelstrecke .....	127
4.6.3	Reglerentwurf für Füllstand-Regelstrecke .....	129
<b>5</b>	<b>Regelungen mit unstetigen Reglern</b> .....	<b>132</b>
5.1	Unstetige Regler ohne Rückführung .....	132
5.1.1	Zweipunkt-Regler ohne Hysterese .....	132
5.1.2	Zweipunkt-Regler mit Hysterese .....	136
5.1.3	Dreipunkt-Regler .....	150
<b>Literatur</b>		<b>153</b>
<b>Hinweise zur Farbgebung</b>		<b>154</b>
<b>Regelungstechnik-Spielwiese</b>		<b>155</b>
Einführung .....		155
Einfügen und Entfernen von Brückensteckern .....		156
Simulationssteuerung .....		157
Funktionsgenerator .....		158
Darstellung und Auswertung der Simulationsergebnisse .....		159
Beschreibung der Regelstrecken .....		161
Aufschalten von Störungen .....		161
Drehzahlregelung (Motor-Generator-Satz) .....		161
Temperaturregelung (Glühofen) .....		162
Druckregelung (Druckbehälter) .....		162
Lichtregelung (Raum) .....		162
Füllstandsregelung (Tank) .....		163
Positionsregelung (Spindelantrieb) .....		164
Reglertypen .....		164
PID-Regler .....		164
Zweipunkt-Regler .....		165
Dreipunkt-Regler .....		165
<b>Übersicht Experimente</b>		<b>166</b>



**Bild 1.10** zeigt als weiteres Beispiel für eine Festwertregelung das Prinzip einer *Füllstandsregelung*, wie sie beispielsweise in einem Toiletten-Spülkasten zur Anwendung kommt.



**Bild 1.10** Prinzip einer Füllstandsregelung

Im Ruhezustand bei geschlossenem Zulaufventil ZV und geschlossenem Ablaufventil AV entspricht die Füllhöhe (Regelgröße  $x$ ) gerade dem Sollwert  $w$ . Wird nun die Spültaste betätigt, öffnet sich das Ablaufventil, und der Gleichgewichtszustand wird gestört (Störgröße  $z$ ). Der Spülkasten entleert sich binnen kurzer Zeit, wodurch der auf der Wasseroberfläche aufliegende Schwimmer Sch absinkt und über den Hebel H das Zulaufventil öffnet. Dadurch strömt frisches Wasser in den Spülkasten, der Schwimmer steigt mit zunehmender Füllhöhe wieder an und verschließt das Zulaufventil nach und nach, bis wieder die ursprüngliche Soll-Füllhöhe erreicht und das Zulaufventil komplett geschlossen ist. Durch Veränderung der Länge der Spindel Sp kann die Soll-Füllhöhe (und damit die Menge des pro Spülvorgang verbrauchten Wassers) variiert werden. Eine Verlängerung der Spindel senkt den Sollwert ab, eine Verkürzung erhöht ihn.

## 1.4.2 Folgeregelung

Ist die Führungsgröße, d. h. die Größe, der die Ausgangsgröße des Prozesses folgen soll, zeitlich nicht konstant, sondern ändert sich mehr oder weniger ständig, so spricht man vom Problem der *Folgeregelung*. Ein typisches Beispiel dafür stellt die Kursregelung eines Schiffs (z. B. beim Manövrieren durch einen engen Kanal) dar. Abhängig vom Verlauf des Kanals wird hier der Sollwert  $w$  für den Kurswinkel des Schiffs immer wieder neu festgelegt (**Bild 1.11**). Der Regler R bewirkt durch Veränderung der Ruderstellung (*Stellgröße*  $y$ ), dass der tatsächliche Kurswinkel, also die Regelgröße  $x$ , ständig auf den Sollkurs eingestellt wird, so dass die Abweichung zwischen Soll- und Istkurs (*Regeldifferenz*  $e$ ) möglichst zu null wird. Störungen kommen dabei z. B. durch Windeinflüsse oder Wasserströmungen zustande.

Eine vergleichbare Regelungsaufgabe löst beispielsweise auch ein Autofahrer, der mit seinem Fahrzeug auf einer kurvenreichen Landstraße unterwegs ist. Der Straßenverlauf (den der Autofahrer über seine Augen als Sensorik erfasst), entspricht hier dem Sollkurs, der tatsächlich gefahrene Kurs dem Istkurs. Das Lenkrad fungiert als Stellglied, die Arme des Fahrers stellen den Steller dar und der Lenkwinkel die Stellgröße.

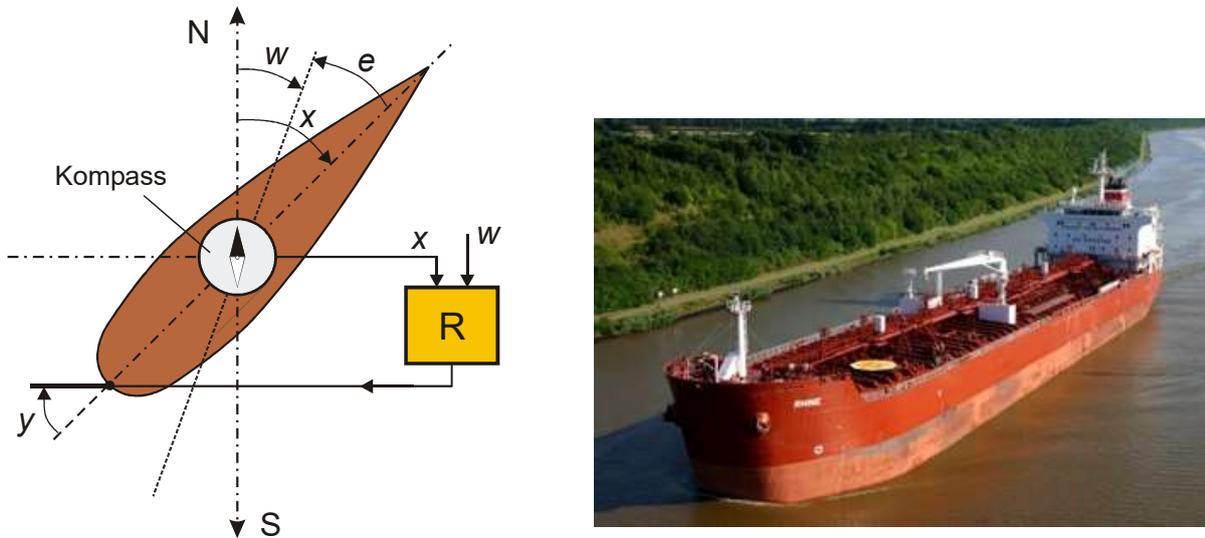


Bild 1.11 Prinzip der Kursregelung

## 1.5 Elemente und Größen des Regelkreises

Wir haben die wichtigsten Elemente und Größen des Regelkreises bereits in den vorangegangenen Abschnitten im Rahmen der vorgestellten Beispiele kennengelernt und wollen unser Wissen nun komplettieren. Bild 1.12 zeigt dazu zunächst den kompletten Wirkungsplan einer Regelung nach DIN IEC 60050-351 mit den dort festgelegten Bezeichnungen und Formelzeichen.

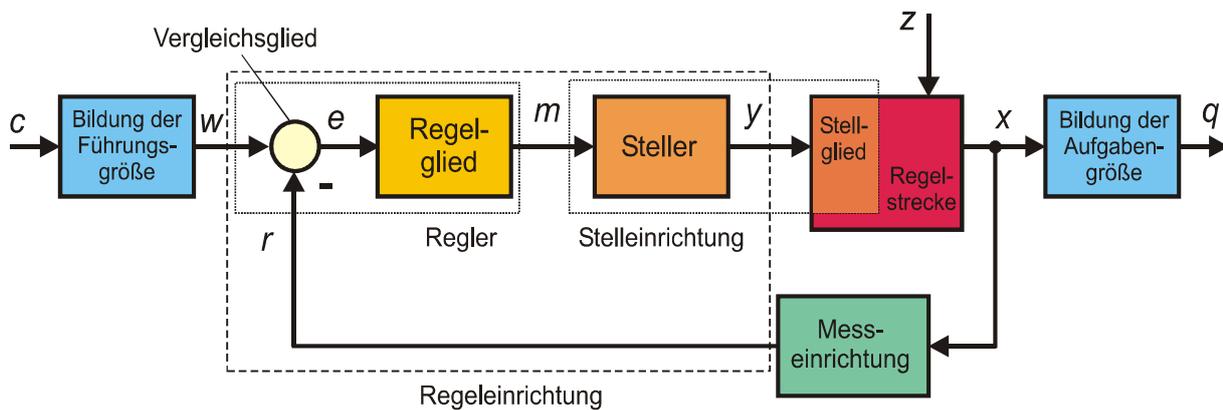


Bild 1.12 Wirkungsplan der Regelung nach DIN IEC 60050-351

Neben den Funktionsblöcken *Messeinrichtung*, *Steller*, *Bildung der Führungsgröße* und *Bildung der Aufgabengröße* sind einige weitere Größen hinzugekommen:

Zielgröße $c$	Die Zielgröße ist eine von der Regelung nicht beeinflusste Größe, die dem Regelkreis von außen zugeführt wird und der die Aufgabengröße in vorgegebener Abhängigkeit folgen soll.
---------------	---

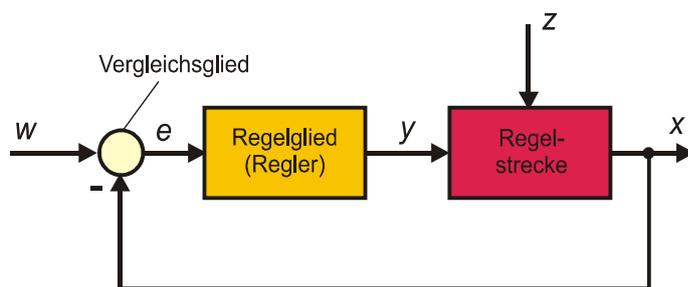
Rückführgröße $r$	Die Rückführgröße ist eine aus der Messung der Regelgröße $x$ hervorgegangene Größe, die zum Vergleichsglied zurückgeführt wird.
Reglerausgangsgröße $m$	Die Reglerausgangsgröße ist die Eingangsgröße der Stelleinrichtung.
Aufgabengröße $q$	Die Aufgabengröße einer Regelung ist die Größe, die zu beeinflussen Aufgabe der Regelung ist.

In der Darstellung sind einige Elemente des Regelkreises zusammengefasst und mit einer eigenen Bezeichnung versehen worden. Das Stellglied wird in dieser Darstellung der Strecke zugeordnet:

Vergleichsglied + Regelglied	⇒	Regler
Steller + Stellglied	⇒	Stelleinrichtung
Regler + Steller	⇒	Regeleinrichtung

Wird die Stellgröße  $y$  in einer gesonderten Einheit aus der Reglerausgangsgröße  $m$  gebildet, so müsste die Bezeichnung „Regeleinrichtung“ durch die Bezeichnung „Regler“ ersetzt werden.

In der Praxis wird anstelle dieses sehr differenzierten Wirkungsplans einer Regelung in den meisten Fällen der in **Bild 1.13** dargestellte, wesentlich vereinfachte Wirkungsplan benutzt, der lediglich noch die Komponenten *Vergleichsglied*, *Regelglied* und *Regelstrecke* aufweist; alle anderen Komponenten sind darin entweder vernachlässigt worden (*Bildung der Führungsgröße* und *Bildung der Aufgabengröße*) oder aber dem Regelglied bzw. der Regelstrecke zugeordnet worden (*Steller*, *Stellglied* und *Messeinrichtung*).



**Bild 1.13** Vereinfachter Wirkungsplan der Regelung

Im vereinfachten Wirkungsplan – den wir in den nachfolgenden Kapiteln praktisch ausschließlich benutzen wollen – treten nur noch die für den späteren Reglerentwurf relevanten Größen des Regelkreises auf, nämlich

- die *Führungsgröße*  $w$  (Sollwert),
- die *Regeldifferenz*  $e$ ,
- die *Stellgröße*  $y$ ,
- die *Regelgröße*  $x$  (Istwert) und

Experimentell wollen wir das Entwurfsverfahren anhand der Temperatur-Regelstrecke (Glühofen) überprüfen. Dazu werden in Experiment 4.6 zunächst die Kennwerte des Glühofens und daraus die Reglerparameter ermittelt, in Experiment 4.7 erfolgt dann die eigentliche Reglererprobung.

### Experiment 4.6: Reglerentwurf nach *Kuhn* für Temperatur-Regelstrecke (Streckenanalyse und Reglerentwurf)

#### Experimentdurchführung

Verbinden Sie den Ausgang des Funktionsgenerators mit dem Eingang des Glühofens (Brückenstecker J1 und J5b) und dessen Ausgang mit der Rückführung (Brückenstecker J6b). Überbrücken Sie den Regler (Brückenstecker J3d und J4d).

Stellen Sie folgende Parameter ein:

Einstellungen Regelstrecke	
Parameter	Wert
Störgröße z	AUS

Einstellungen Simulation Anzeige	
Parameter	Wert
Simulationsdauer	250 s
Endlossimulation	AUS
Zeitfenster	250 s

Einstellungen Funktionsgenerator	
Parameter	Wert
Betriebsart	SPRUNG
Amplitude	5 V
Verzögerung	0 s
Offset	0 V

Ermitteln Sie die Sprungantwort des Glühofens und daraus seinen Proportionalbeiwert sowie die Summen-Zeitkonstante. Entwerfen Sie auf Basis dieser Kennwerte nach dem Entwurfsverfahren von *Kuhn* einen PI-Regler für gutes Führungsverhalten, und zwar sowohl für normalen als auch für schnellen Regelverlauf.

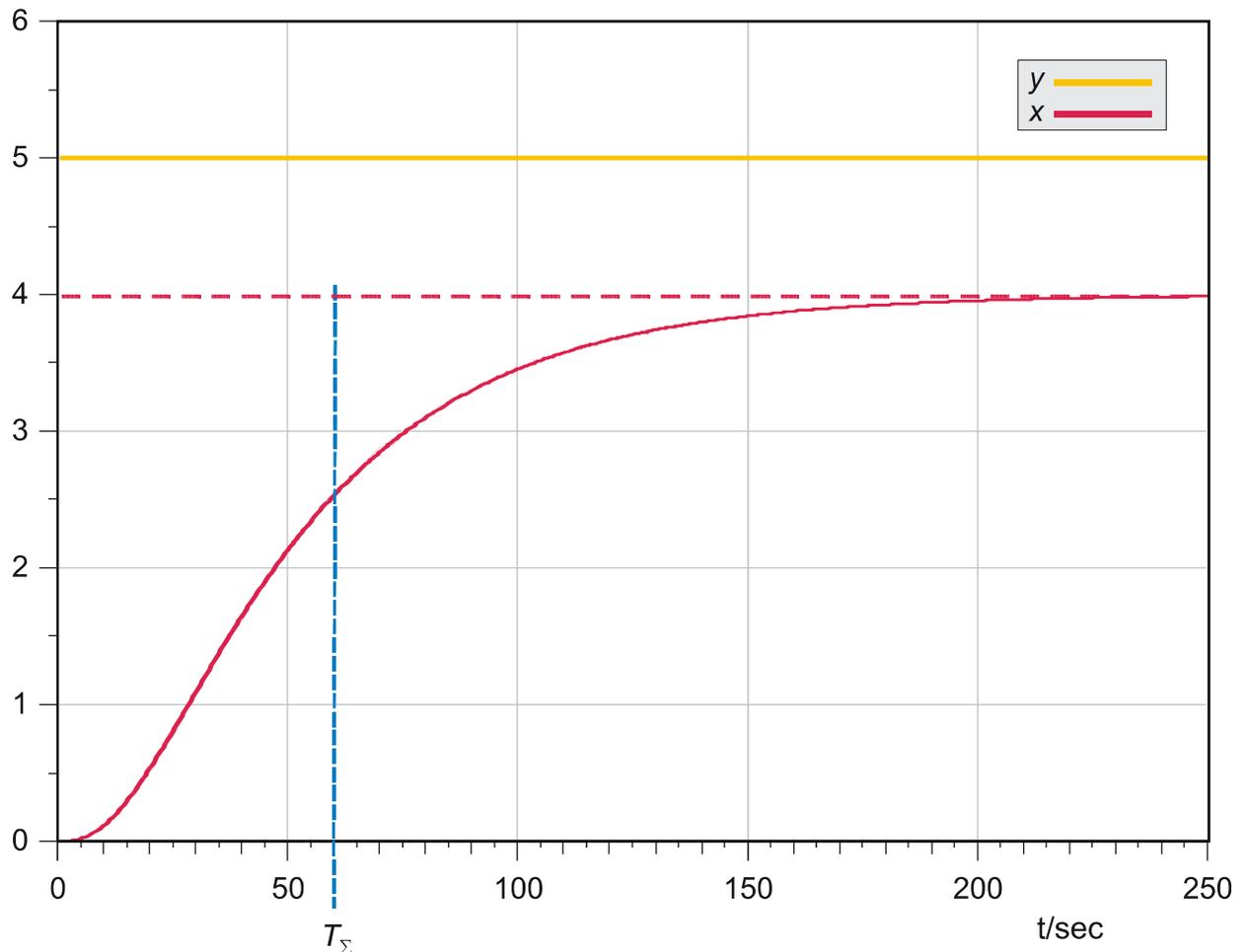
## Experimentauswertung

**Bild 4.17** zeigt die Sprungantwort des Glühofens mit der Ermittlung der Kennwerte. Wir erhalten für den Proportionalbeiwert wie bereits in Experiment 4.3

$$K_P = \frac{4 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 0.8$$

und für die Summen-Zeitkonstanten einen Wert von etwa

$$T_\Sigma = 60 \text{ s.}$$



**Bild 4.17** Sprungantwort des Glühofens mit Ermittlung der Kennwerte (gelb: Stellgröße, rot: Regelgröße)

Damit erhalten wir nach Tabelle 4.5 für den PI-Regler für normalen Regelverlauf

$$K_{PR} = \frac{0.5}{K_{PS}} = 0.625$$

$$T_i = 0.5 \cdot T_\Sigma = 30 \text{ s}$$

und für den PI-Regler für schnellen Regelverlauf die Parameter

$$K_{PR} = \frac{1}{K_{PS}} = 1.25$$

$$T_i = 0.7 \cdot T_\Sigma = 42 \text{ s.}$$

### Experiment 4.7: Reglerentwurf nach *Kuhn* für Temperatur-Regelstrecke (Reglererprobung)

#### Experimentdurchführung

Verbinden Sie den Ausgang des Funktionsgenerators mit dem Plus-Eingang des Vergleichers (Brückenstecker J1) und den Ausgang des Vergleichers mit dem Eingang des PID-Reglers (Brückenstecker J3a). Den Ausgang des PID-Reglers verbinden Sie mit dem Eingang des Glühofens (Brückenstecker J4a und J5b) und dessen Ausgang mit der Rückführung (Brückenstecker J6b). Schließen Sie die Rückführung (Brückenstecker J2).

Stellen Sie folgende Parameter ein:

Einstellungen Regelstrecke	
Parameter	Wert
Störgröße z	AUS

Einstellungen Simulation Anzeige	
Parameter	Wert
Simulationsdauer	250 s
Endlossimulation	AUS
Zeitfenster	250 s

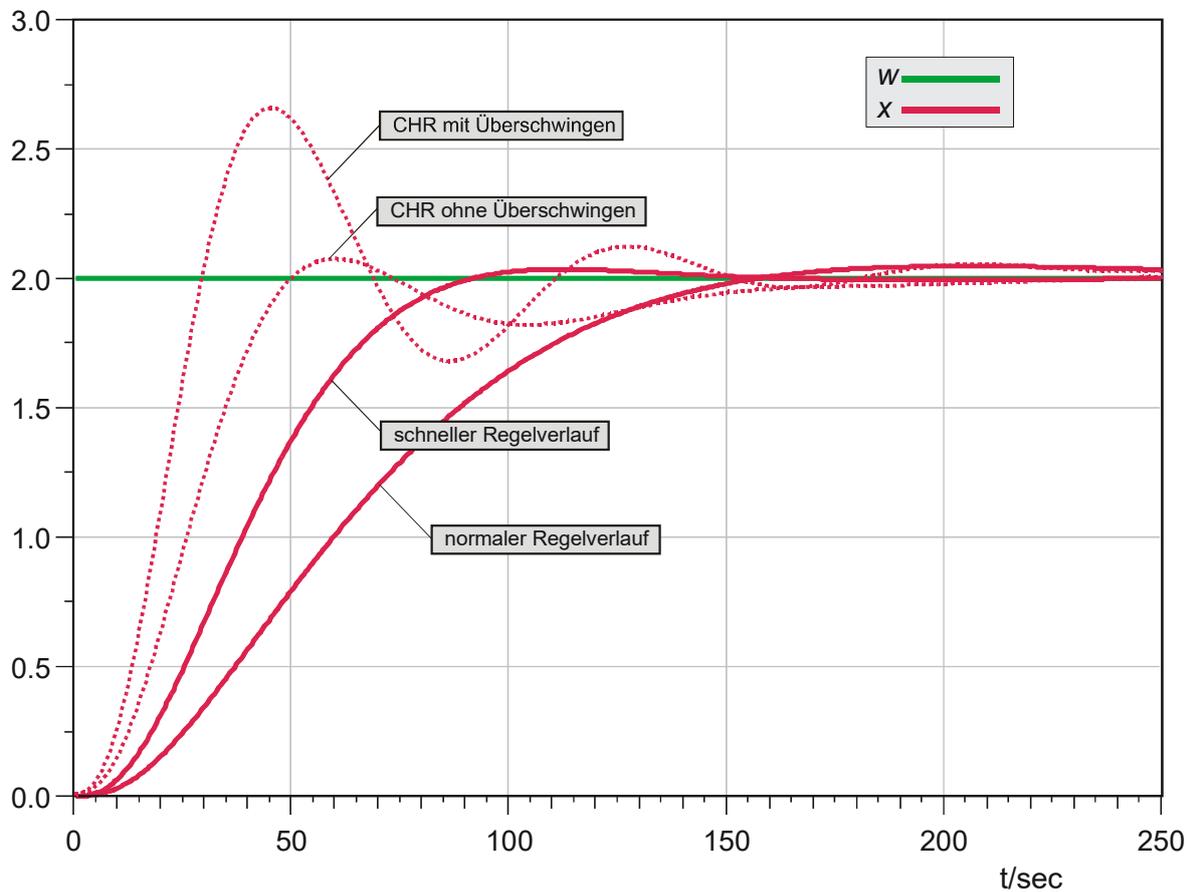
Einstellungen Funktionsgenerator	
Parameter	Wert
Betriebsart	SPRUNG
Amplitude	2 V
Verzögerung	0 s
Offset	0 V

Einstellungen PID-Regler	
Parameter	Wert
P-Anteil	EIN
I-Anteil	EIN
D-Anteil	AUS

Stellen Sie im Regler zunächst die im vorangegangenen Experiment ermittelten Parameter für einen normalen Regelverlauf ein und ermitteln Sie die zugehörige Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises. Wiederholen Sie das Experiment dann für die Reglerparameter für einen schnellen Regelverlauf. Vergleichen Sie die beiden Regler bezüglich stationärer Genauigkeit, Schnelligkeit und Dämpfung (Überschwingen). Vergleichen Sie sie außerdem mit den in Experiment 4.4 entworfenen Reglern nach *Chien*, *Hrones* und *Reswick*.

### Experimentauswertung

**Bild 4.18** zeigt die beiden Sprungantworten im Vergleich. Da beide Regler einen I-Anteil besitzen, liegt jeweils stationäre Genauigkeit vor. Der für schnellen Regelverlauf entworfene Regler reagiert wesentlich schneller auf den Führungsgrößensprung, allerdings mit geringem Überschwingen. Im Vergleich zu den Reglern nach *Chien*, *Hrones* und *Reswick* (gestrichelte Kurven) sind die Regler nach *Kuhn* allerdings wesentlich langsamer; dies ist typisch für dieses Entwurfsverfahren, das eher „vorsichtig“ eingestellte Regler hervorbringt.



**Bild 4.18** Vergleich der Sprungantworten des geschlossenen Regelkreises für beide Reglereinstellungen (gestrichelt: Reglereinstellungen nach *Chien*, *Hrones* und *Reswick*)

## 4.6 Weitere Reglerentwürfe

Bei den bisher vorgestellten Entwurfsverfahren blieben die Licht-Regelstrecke (P-T<sub>0</sub>-Strecke), die Füllstand-Regelstrecke (I-Strecke) sowie die Druck-Regelstrecke (P-T<sub>1</sub>-Strecke) unberücksichtigt. Diese Streckentypen lassen sich theoretisch (d. h. bei Vernachlässigung jeglicher