

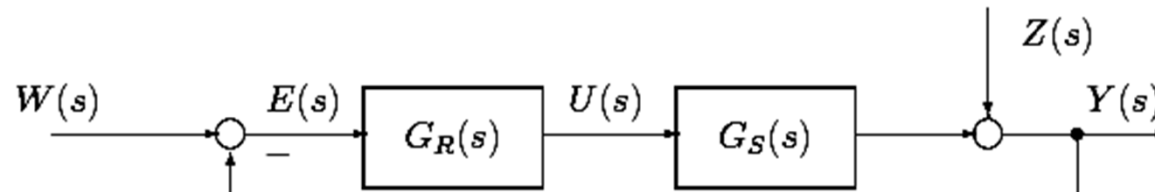
- **Analyse des Regelkreises**
  - **Stationäres Verhalten des Regelkreises**
  - **Bleibende Regelabweichung für Führungs- und Störverhalten**
  - **Bleibende Regelabweichung für verschiedene Eingangssignale und Regler**

## Entwurfsaufgaben

- 1. Festlegung der Regelkreisstruktur**
- 2. Reglerauswahl**
- 3. Einstellung der Reglerparameter**
- 4. Simulation des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises**
- 5. Bewertung der Regelgüte anhand der Güteanforderungen**



## Anforderungen an den geschlossenen Regelkreis



$$G_Z(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{1}{1 + G_0(s)} = 0$$

$$G_W(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} = 1$$

- 1) Als Mindestanforderung muß der Regelkreis stabil sein.
- 2) Die Störgröße  $z(t)$  soll einen möglichst geringen Einfluß auf die Regelgröße  $y(t)$  haben.
- 3) Die Regelgröße  $y(t)$  soll einer zeitlich sich verändernden Führungsgröße  $w(t)$  möglichst genau und schnell folgen.
- 4) Der Regelkreis soll möglichst unempfindlich gegenüber nicht zu großen Parameteränderungen sein.

$$\Delta G_W = G_W - G_W^*$$

$$\Delta G_0 = G_0 - G_0^*$$

$$\Delta G_W = \frac{\Delta G_0}{(1 + G_0)(1 + G_0^*)} = 0$$



Die Anforderungen 2 – 4 könnten mit

$$|G_0(s)| = |G_S(s) \cdot G_R(s)| \rightarrow \infty \Rightarrow$$

**sehr große Regler-  
verstärkung notwendig**

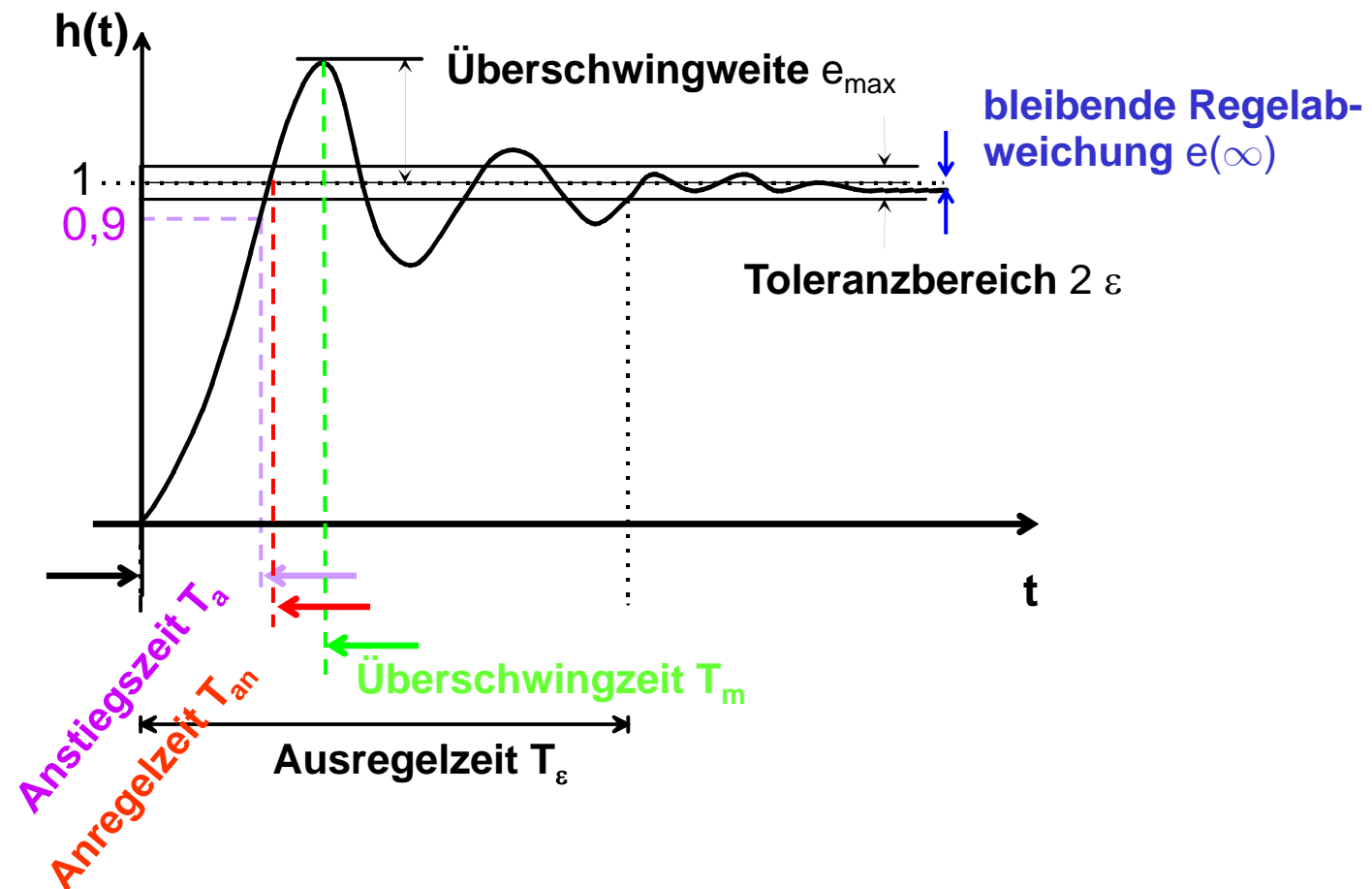
erfüllt werden.

**Beliebig große Rückführverstärkungen sind in der Praxis aus diesen Gründen nicht zu realisieren:**

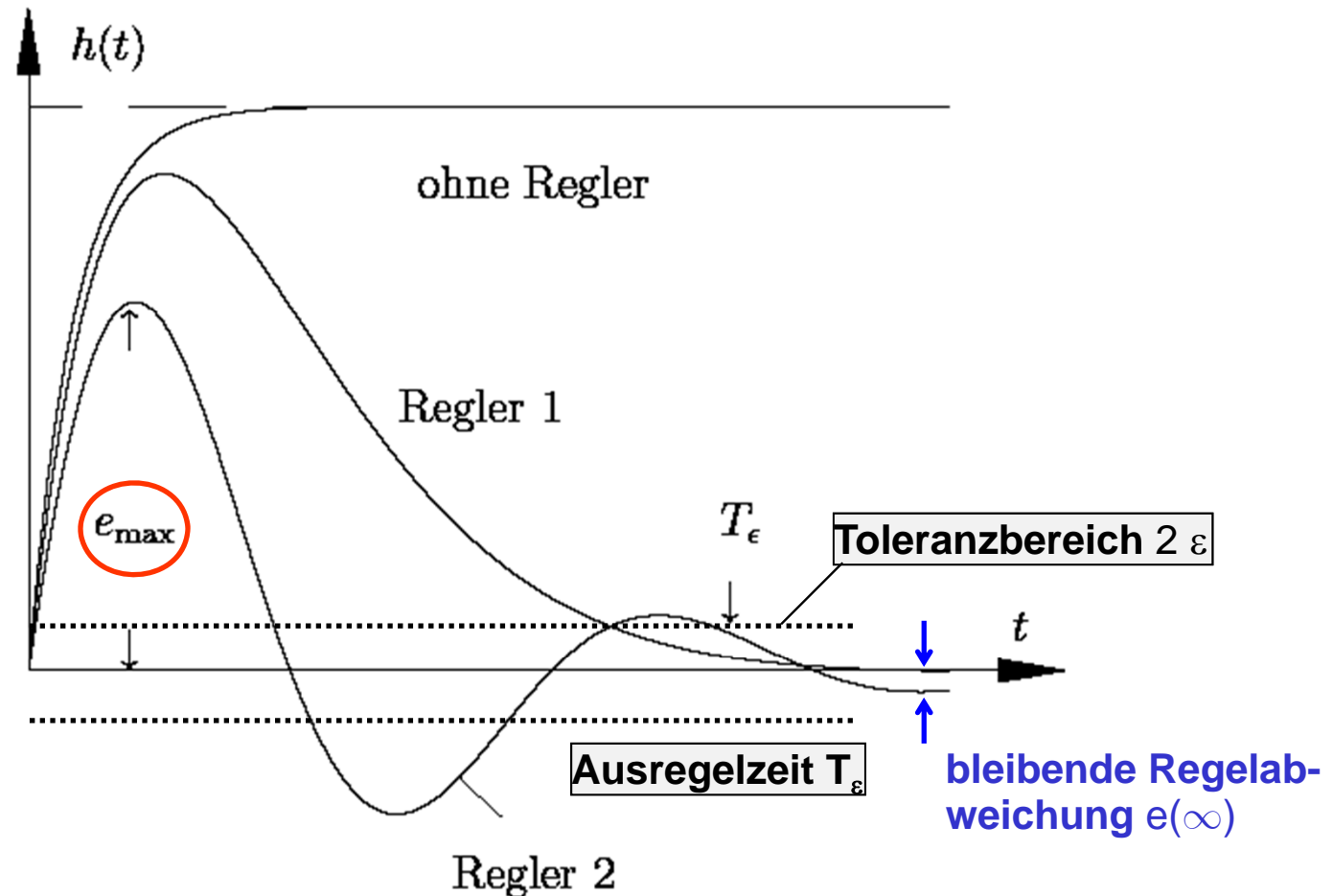
- **Dynamisches Verhalten des Stellgliedes (Stellgrößenbeschränkung).**
- **Zu große Belastung der Regelstrecke.**
- **Verstärkung des Schwingungsverhaltens oder sogar Verlust der Stabilität. (Regelkreis wird bei Polüberschuss von 2 und mehr grenz- oder instabil).**



## Gütemaße im Zeitbereich: **Führungsverhalten**



## Gütemaße im Zeitbereich: **Störverhalten**



Störsprungantworten eines Systems für verschiedene Regler



## Güteanforderungen

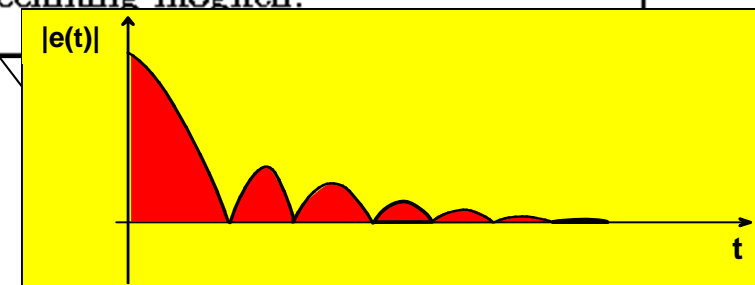
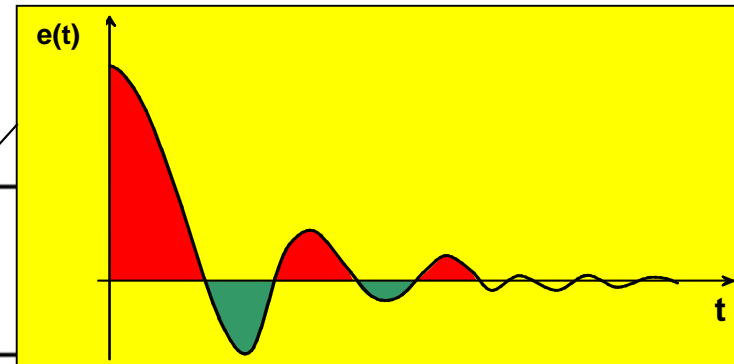
- Die Größen  $e_{\max}$  und  $T_{\varepsilon}$  kennzeichnen die Dämpfung
- Die Größen  $T_a$ ,  $T_{an}$  und  $T_m$  kennzeichnen die Schnelligkeit des geschlossenen Regelkreises
- Die bleibende Regelabweichung  $e(\infty)$  charakterisiert das statische Verhalten

**Das Ziel des Regelkreisentwurfes ist eine Minimierung dieser Größen !**



## Integralkriterien

| Gütemaß                           | Eigenschaft  |
|-----------------------------------|--|
| $I_1 = \int_0^{\infty} e(t) dt$   | <i>Lineare Regelfläche:</i> Eignet sich zur Beurteilung stark gedämpfter oder monotoner Regelverläufe; einfache mathematische Behandlung.                                      |
| $I_2 = \int_0^{\infty}  e(t)  dt$ | <i>Betragslineare Regelfläche:</i> Geeignet für nichtmonotonen Schwingungsverlauf. Umständliche Auswertung.  |
| $I_3 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$ | <i>Quadratische Regelfläche:</i> Starke Berücksichtigung großer Regelabweichungen; liefert größere Ausregelzeiten als $I_2$ . In vielen Fällen analytische Berechnung möglich. |





## Integralkriterien (2)

|  |  |
|--|--|
| $I_4 = \int_0^{\infty} t e(t) dt$                  | <p><i>Zeitbeschwerte betraglineare Regelfläche (Integral of time-multiplied absolute value of error, <u>ITAE-Kriterium</u>): Wirkung wie <math>I_2</math>; berücksichtigt aber zusätzlich die Dauer der Regelabweichung.</i></p> |
| $I_5 = \int_0^{\infty} te^2(t)dt$                  | <p><i>Zeitbeschwerte quadratische Regelfläche: Wirkung wie <math>I_3</math>; berücksichtigt zusätzlich die Dauer der Regelabweichung.</i></p>  |
| $I_6 = \int_0^{\infty} [e^2(t) + \alpha e^2(t)]dt$ | <p><i>Verallgemeinerte quadratische Regelfläche: Wirkung günstiger als bei <math>I_3</math>, allerdings Wahl des Bewertungsfaktors <math>\alpha</math> subjektiv.</i></p>  |
| $I_7 = \int_0^{\infty} [e^2(t) + \beta u^2(t)]dt$  | <p><i>Quadratische Regelfläche und Stellaufwand: Etwas größerer Wert von <math>e_{max}</math>, jedoch <math>t_e</math> wesentlich kürzer; Wahl des Bewertungsfaktors <math>\beta</math> subjektiv.</i></p>                       |



## Entwurfsverfahren

Falls mathematisches Modell der Regelstrecke bekannt ist:

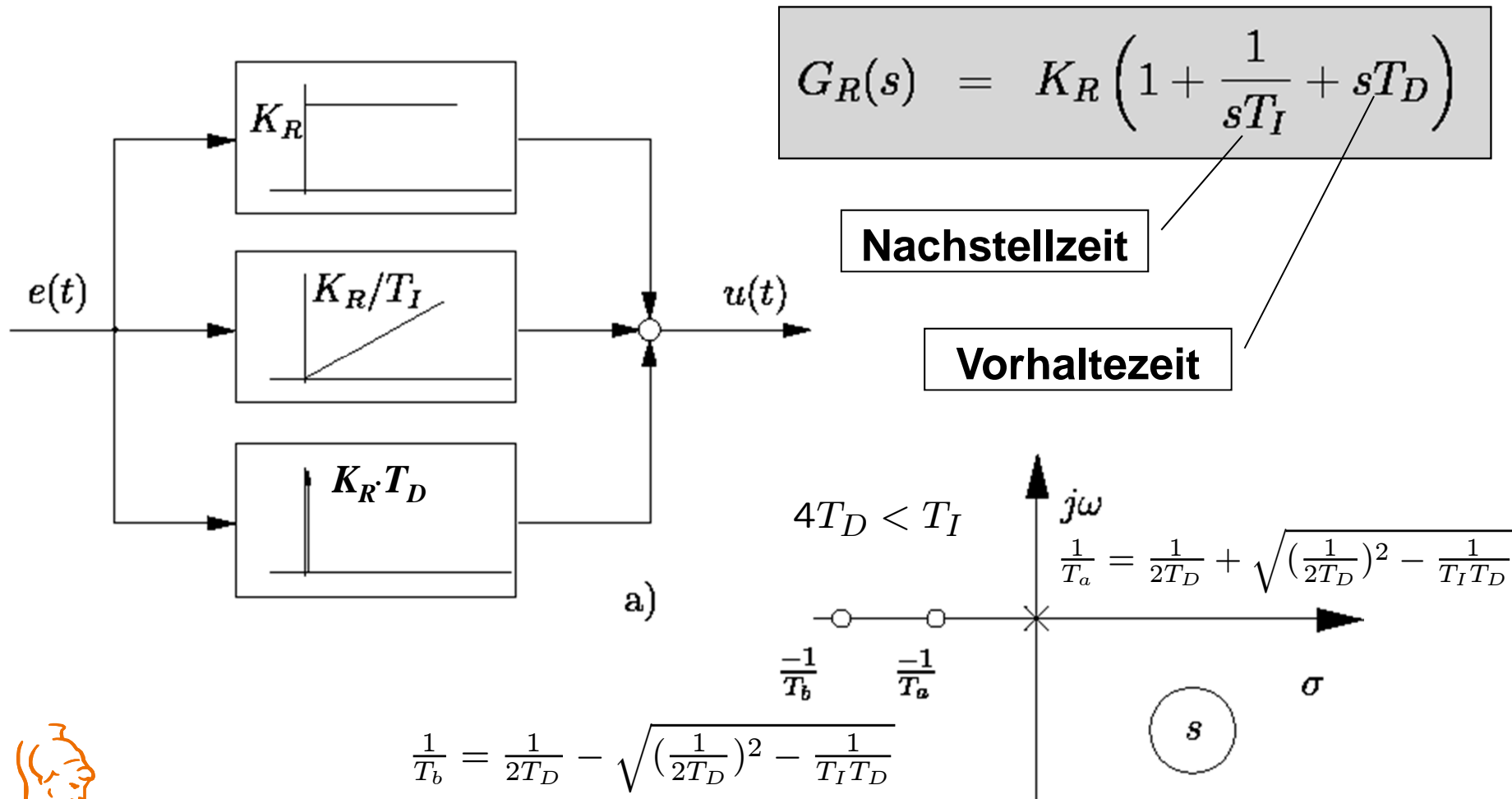
**Synthese der Regelkreise durch Anwendung mathematischer Verfahren vornehmen.**

Es ist **kein** mathematisches Modell der Regelstrecke vorhanden:

**Verwendung empirischer Einstellregeln für Standardregler.**



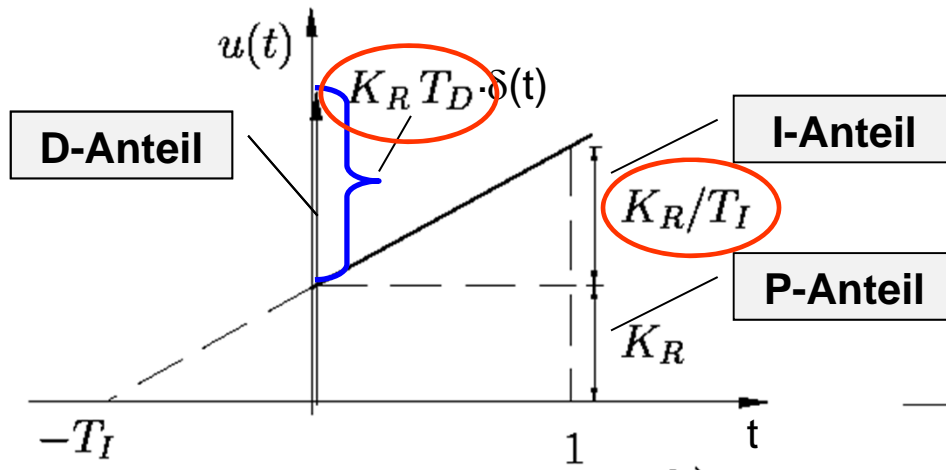
Ein PID-Regler besteht aus einer **Parallelschaltung** eines P-, I- und D-Gliedes:



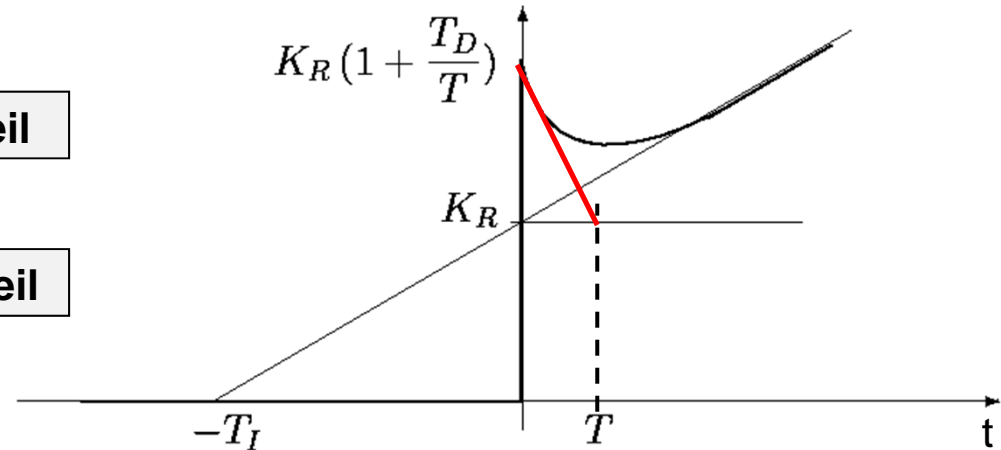
# Einstellung eines PID-Reglers (2)

$$G_R(s) = K_R \left( 1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right)$$

$$G_R(s) = K_R \left( 1 + \frac{1}{sT_I} + \frac{sT_D}{1 + Ts} \right)$$



**Sprungantwort des idealen PID-Reglers**



**Sprungantwort des realisierbaren PID-Reglers**

Die **Nachstellzeit**  $T_I$  ist die Zeit, die vergehen muß, damit die **Sprungantwort** des I-Anteils den Wert erreichen kann, den der P-Anteil beim Sprung sofort erreicht.

$$u_I(t) = \frac{K_R}{T_I} \cdot t$$

$$u_P(t) = K_R \cdot t \cdot 1(t)$$

Die **Vorhaltezeit**  $T_D$  ist die Zeit, die vergehen muß, damit die **Rampenantwort** des P-Anteils den Wert erreichen kann, den der D-Anteil bei einer Rampe sofort erreicht.

$$u_D(t) = K_R \cdot T_D \cdot \dot{e}(t) = K_R \cdot T_D \cdot 1(t)$$



## Wirkungsweise des PID-Reglers

### P-Anteil:

- Je größer die Regelabweichung  $e(t)$ , desto größer ist der P-Anteil in der Stellgröße  $u(t)$ .
- P-Anteil reagiert auf den momentanen Wert der Regelabweichung.
- Berücksichtigt nur die **Gegenwart**.

### I-Anteil:

- Integriert die Regelabweichung.
- Der I-Anteil in der Stellgröße wird so lange größer, bis die Regelabweichung zu Null geworden ist.
- Daher kann er bei stabilen Systemen stationäre Genauigkeit erzwingen.
- Da alle zurückliegende Werte der Regelabweichungen in das Integral eingehen, berücksichtigt der I-Anteil die **Vergangenheit**.



## Wirkungsweise des PID-Reglers

### D-Anteil:

- Je größer die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung, desto größer ist der D-Anteil in der Stellgröße.
- Dadurch verhindert der D-Anteil, dass sich große Regelabweichungen aufbauen können.
- Seine Wirkung ist in die **Zukunft** gerichtet.

## Einstellregeln nach Ziegler-Nichols

Die von **Ziegler** und **Nichols\*** empirisch gefundenen Einstellregeln liefern für viele Regelstrecken erste brauchbare Einstellungen für einen **PID-Regler**.

Es werden zwei Verfahren unterschieden:

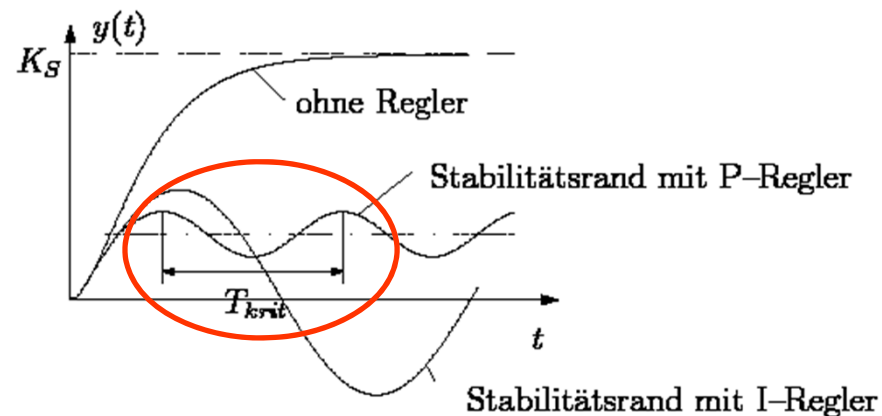
- I. Methode des Stabilitätsrandes
- II. Methode der Übergangsfunktion

\***Ziegler, J. G.; Nichols, N. B.:** Optimum settings for automatic controllers, Trans. ASME, 64 (1942), pp. 759-768;



## Methode des Stabilitätsrandes

1. Der Regelkreis wird mit Hilfe eines **P-Reglers** geschlossen.
2. Die Reglerverstärkung wird solange erhöht, bis der geschlossene Kreis **Dauerschwingungen** ausführt. Die dabei eingestellte Reglerverstärkung wird als  $K_{Rkrit}$  bezeichnet.



3. Anhand der Verstärkung  $K_{Rkrit}$  und der Periodendauer  $T_{krit}$  der Dauerschwingung werden die Reglerparameter mit Hilfe der Tabelle 4.2 festgelegt.





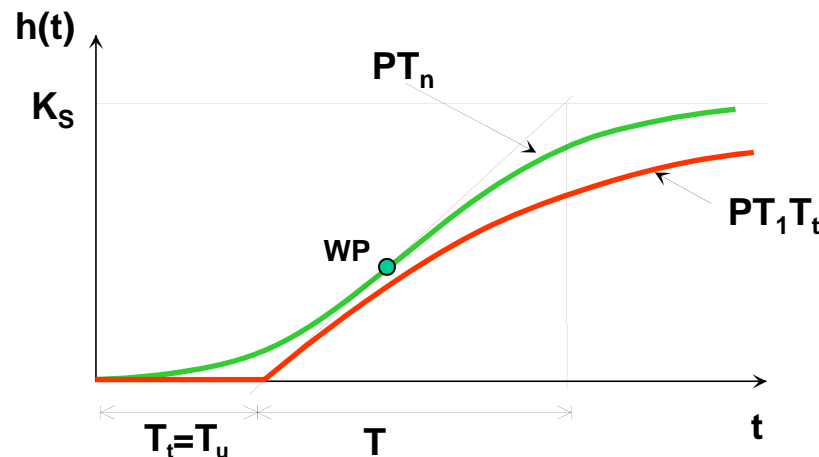
|            | Reglertypen | Reglereinstellwerte             |                 |                 |
|------------|-------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|
|            |             | $K_R$                           | $T_I$           | $T_D$           |
| Methode I  | P           | $0,5 K_{Rkrit}$                 | -               | -               |
|            | PI          | $0,45 K_{Rkrit}$                | $0,85 T_{krit}$ | -               |
|            | PID         | $0,6 K_{Rkrit}$                 | $0,5 T_{krit}$  | $0,12 T_{krit}$ |
| Methode II | P           | $\frac{1}{K_S} \frac{T}{T_u}$   | -               | -               |
|            | PI          | $\frac{0,9}{K_S} \frac{T}{T_u}$ | $3,33 T_u$      | -               |
|            | PID         | $\frac{1,2}{K_S} \frac{T}{T_u}$ | $2 T_u$         | $0,5 T_u$       |

**Tabelle 4.2:** Reglereinstellwerte nach Ziegler und Nichols



## Methode der Übergangsfunktion

1. Durch Experimente mit der Regelstrecke wird die Übergangsfunktion bestimmt.
2. Die Übergangsfunktion wird durch die Reihenschaltung eines **PT<sub>1</sub>-Gliedes** und eines **Totzeitgliedes** approximiert, indem die statische Verstärkung  $K_S$ , die Verzugszeit  $T_u$  und die Zeitkonstante  $T$  bestimmt werden.



3. Die Reglerparameter werden mit Hilfe der Tabelle 4.2 festgelegt.



Example 2.3 Textbook "Grundlagen der A Oldenburg Verlag, München 2004 Java Applet developed by Johann Weber

Animation

Wagen 1

Wagen 2

Lokomotive

Control Loop

Input

+

PID Discrete PID

F

ICE

TIS

Xs

Response to Set Point Change

60.4 [m/s]

0.8

0

2000[s]

$K_{Rkrit} = 2,6$

$T_{krit} = 75 \text{ s}$

Set point

Measured value

Velocities

60.4 [m/s]

0.8

0

2000[s]

Locomotive

First compartment

Second compartment

Copyright

AT+ Uni KL

Institute of Automatic Control Prof. Dr.-Ing. L. Litz

University of Kaiserslautern

ControlPanel

Input : Step

Run

Stop

Reset

Info

Applet main started

Sollgeschwindigkeit

Aus Tabelle 4.2 ergibt sich:

$K_R = 0,6 \quad K_{Rkrit} = 1,56$

$T_I = 0,5 \quad T_{krit} = 37,5 \text{ s}$

$T_D = 0,12 \quad T_{krit} = 9 \text{ s}$



**Mozilla**


File Edit View Go Bookmarks Tools Window Help

Back Forward Reload Stop File:///C:/dfs/tex/SRT\_II/FT2005/Litz/index.html Search Print

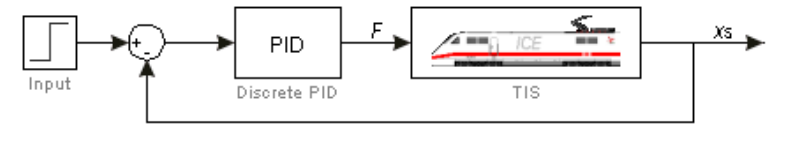
Home Bookmarks Kategorien Wer liefert was? Focus Online

**Example 2.3 Textbook "Grundlagen der Automatisierung"**  
Oldenbourg Verlag, München 2004  
Java Applet developed by Johann Weber

Animation



Control Loop

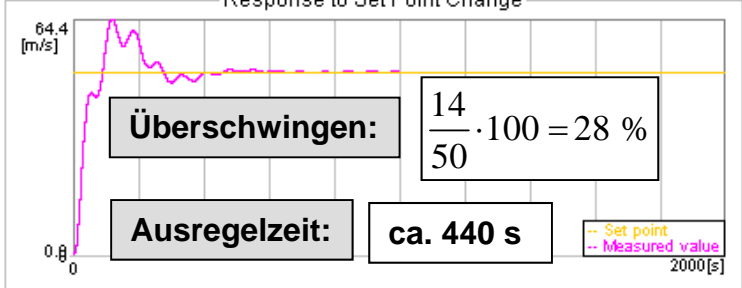


The JVM installed on your computer is 1.4.2\_08  
This applet is best seen using JVM version 1.3.0 or newer  
Please check <http://java.sun.com>

ControlPanel

Input: Step Run Stop Reset Info

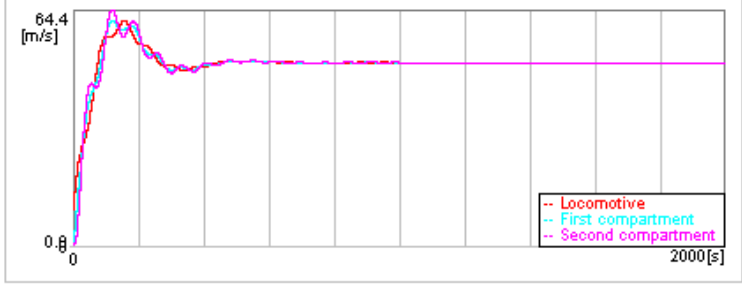
Response to Set Point Change



Überschwingen:  $\frac{14}{50} \cdot 100 = 28 \%$

Ausregelzeit: ca. 440 s

Velocities



Copyright

AT+ Uni KL Institute of Automatic Control University of Kaiserslautern  
Prof. Dr.-Ing. L. Litz



$$K_R = 0,6 \quad K_{Rkrit} = 1,56$$

$$T_I = 0,5 \quad T_{krit} = 37,5 \text{ s}$$

$$T_D = 0,12 \quad T_{krit} = 9 \text{ s}$$